

1845年创刊·以科技见证世界改变

环球科学 SCIENTIFIC AMERICAN

《科学美国人》杂志独家授权

邮局订阅代号：80-498
2017年1月号 总第133期
定价：¥18



绿色印刷产品

【封面故事】

量子纠缠 创造了虫洞

纠缠和虫洞看似毫无关联，然而物理学家最近意识到，量子纠缠和虫洞可能是等价的：大到黑洞，小到粒子，相互纠缠的物体可能都是由虫洞连接着的。

2016年
《环球科学》
十大科学新闻

人类演化
在这里加速

在地球最不宜居住的环境中，比如严寒的北极、氧气稀薄的高原地带，甚至人口密集的城市，人类基因都在不断产生突变。

HIV疫苗：黎明已来

通向成功的难题似乎都已解决，未来几年应该是收获的时节了。

港币：30.00元 美元：5元

ISSN 1673-5153



9 771673 515177

版权信息

主管单位 **Authorities in Charge**

中华人民共和国教育部 Ministry of Education of the People's
Republic of China

主办单位 **Sponsor**

中国大学出版社协会 China University Presses Association

出版单位 **Publisher**

《环球科学》杂志社有限公司 GLOBAL SCIENCE
MAGAZINES Co. Ltd

社址 **Address:**

北京市朝阳区秀水街1号建外外交公寓4-1-21 Office 4-1-21,
Jianguomen Diplomatic Residence Compound, No. 1, Xiu Shui
Street, Chaoyang District, Beijing, China.

邮编:

100600

社长 / 总编辑 **Editor-in-chief**

陈宗周 Chen Zongzhou

副社长 / 副总编辑 **Deputy Editor-in-chief**

刘芳 Liu Fang

编辑部 **EDITORIAL DEPARTMENT**

执行主编 Executive Editor

褚波 Wave Chu

首席记者 chief Reporter

刘洋 Liu Yang

资深编辑 Senior Editor

韩晶晶 Han Jingjing / 吴兰 Wu Lan

编辑 Editor

廖红艳 Glorious Liao / 罗凯 F. Leocas / 丁家琦 Ding Jiaqi

助理编辑 Assistant Editor

吴非 Wu Fei

审稿编辑 Reviewing Editor

禾苗 He Miao

特约编辑 Contributing Editor

徐寒易 Xu Hanyi / 韩冬 Han Dong

特约记者 Contributing Reporter

万宇 Wan Yu / 陈彬 Chen Bin / 吴好好 Wu Haohao

国际标准刊号：ISSN 1673-5153

国内统一刊号：CN11-5480/N

邮局订阅代号：80-498

广告经营许可证号：京朝工商广字第8144号

版权说明：版权所有，《环球科学》杂志社保留所有权利。未经本社许可，不得为任何目的、以任何形式或手段复制、翻印、传播及以其他任何方式使用本刊的任何图文。

目录

CONTENTS

编者的话

[三篇文章，三个未来](#)

国际版本

[《科学美国人》国际版本速览](#)

研究

[全球学术期刊概览](#)

年度评选

[2016年《环球科学》十大科学新闻](#)

前沿

[【天文学】“盖亚”号：绘制银河系新图景](#)

[【空间科学】木卫二上真的有喷泉？](#)

[【环境】奥巴马的环境保护功绩](#)

[【农业】南非高中生发明迷你蓄水池](#)

[【生物学】狮子比老虎更聪明？](#)

[【简讯】全球科技热点](#)

[【生物学】重新认识溶酶体](#)

[【神经科学】大脑如何感受幽默](#)

[【新技术】浪涌电压保护器](#)

[【化学】铜让硫醇更臭](#)

[【环境】中国五城市空气污染状况调查](#)

[【食品】烹调能降低含镉大米毒性](#)

深度

[【封面故事】量子纠缠创造了虫洞](#)

[【天文学】行星形成只要“3分钟”](#)

[【遗传学】人类演化在这里加速](#)

[【医学】HIV疫苗：黎明已来](#)

[【农业】抗生素滥用调查：养殖场弥漫耐药菌](#)

[【人类学】神话故事：一部人类迁徙史？](#)

[【环境】人工湿地：自然净化污水](#)

[【气候】冻土融化影响气候100年](#)

[【对话】建筑碳排放，30年后下降74%](#)

专栏

- [【健康科学】哪些检查在误导患者？](#)
- [【技术档案】别为耳机插孔哭泣](#)
- [【科学评论】女科学家的透明天花板](#)
- [【反重力思考】佛罗里达，美国最奇怪的州](#)
- [【怀疑论者】什么左右了性取向](#)
- [【图表科学】特斯拉、Facebook创新之道](#)

读来编往

[读来编往](#)

经典回眸

[经典回眸](#)

《环球科学》新媒体平台



官方微信：
环球科学（[huanqiukexue](#)）
讨论最热科学话题，推出“《自然》（*nature*）新闻·一周精选”栏目，还能收听最有趣的英文广播“科学60秒”。



新浪微博 [@环球科学杂志社](#)

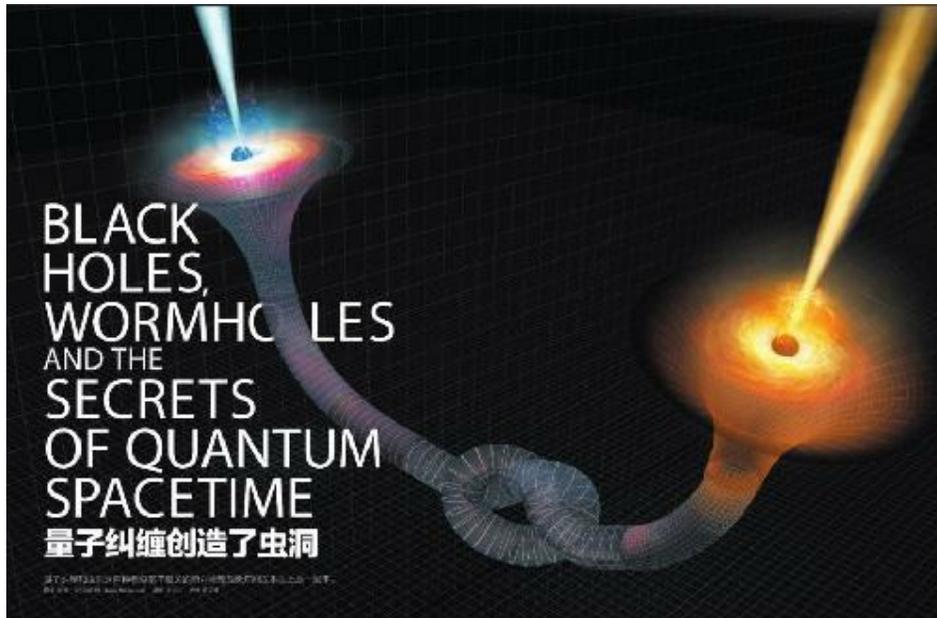


腾讯微博 [@环球科学杂志社](#)



官方网站
www.huanqiukexue.com

三篇文章，三个未来



抗生素的发现，曾是人类历史上最了不起的医学进步之一，在细菌感染面前建立起了一道无比坚固的防线，但现在这道防线正被人类自己瓦解。

随着新年钟声敲响，2017年的《环球科学》与你见面了。

这期杂志内容很精彩，是我们献给读者朋友的新年礼物。在编辑过程中，多篇文章都让我和同事们深受触动与启迪，犹如在看一部部精彩而又韵味悠长的电影，跌宕起伏的情节让人或憧憬或欣喜或忧虑，同时也促人深省。

让人憧憬的是本期封面故事，这像是有着宏大叙事背景的科幻片，把我们带进广袤浩瀚的宇宙深空。故事始于1935年，这一年爱因斯坦发表了两篇重要论文。在其中一篇里，他讨论了量子纠缠——一对量子不论相距多远，身处何处，只要其中一个量子的状态发生变化，那么另一个也会跟着发生变化。对于这一奇妙的现象，就连伟大的爱因斯坦都无法解释，也很难理解，因此他在论文中，把这种现象称作“幽灵般的超距作用”。

在当年的另一篇文章中，爱因斯坦则与另一位物理学家内森·罗森一起，提出了一个新的概念：“爱因斯坦-罗森桥”，描述的是一个连接着两个不同时空区域的时空通道，也就是我们熟悉而又陌生的虫洞。之所以熟悉，是因为我们在科幻作品中，已经看过了太多关于虫洞的描述；之所以陌生，是因为1935年之后的80余年里，科学家虽然一直在研究这神秘的虫洞，但时至今日，别说揭开虫洞的真相，就连它存在与否，科学家可能都不敢肯定。

量子纠缠和虫洞，这两个看似毫无关联的物理概念，却在本期封面故事中发生了“纠缠”：物理学家最近的研究指出，两个黑洞可以通过量子纠缠联系在一起，而量子纠缠可以在这两个黑洞之间创造一个几何连接，也就是虫洞！如果这一研究能得到证实，不仅意味着我们接近了虫洞的真相，更重要的是，为物理学家追寻大统一理论指明了方向。

让人感到欣喜的是《HIV疫苗：黎明已来》这篇文章，它很像催人奋进的励志片——故事主角屡战屡败，但为了达到目标，却又坚持不懈，屡败屡战，历经无数挫折后，终于看见胜利的曙光。

目前，全球有三四千万HIV携带者，每年有上百万人死于艾滋病相关病症。虽然医生可以用药物控制感染者的病情，但只有疫苗，才能真正让人类摆脱HIV的阴影，让人类从此不再恐惧。因此，过去几十年，生物学家千方百计研制HIV疫苗。但遗憾的是，面对HIV的狡诈多变，生物学家始终未尝胜绩。

现在，晨曦初现。我们在HIV面前的劣势，很有可能会在近期得到逆转。撰写《HIV疫苗：黎明已来》的三位作者所带领的国际研究团队，经过20年的研究，合成出一种人工蛋白，可以精确模拟HIV，在动物体内激发快速而强烈的免疫反应，消灭HIV。虽然这种疫苗还需经过人体试验的考验，但作者已经敢于大胆下结论并预测：“通向成功的所有难题已经解决，未来几年应该是收获的时节了。”我们希望，这是人类向HIV吹响反攻号角的关键时刻。

如果说前面两篇文章代表着向往和希望，那么，下面的《抗生素滥用调查：耐药菌弥漫养殖场》一文，则像是反映残酷现实、充满警示的纪录片。

因为抗生素滥用，十余年来耐药菌，甚至能抵抗多种抗生素的超级

细菌都在不断涌现。而作为抗生素滥用的重灾区，养殖场几乎成了耐药菌的孵化工厂。为了弄清楚耐药菌的产生与传播情况，科学家对美国一些养殖场进行了调查，结果让人惊心：他们开车跟在运送牲畜的货车后，居然能在自己车里的空气中检测到耐药菌；一座大型养殖场64%的工人的鼻腔中，都含有耐药菌.....

这虽然是美国故事，但它绝不仅仅在美国发生。2014年，美国的制药公司向养殖场销售了9000多吨抗生素。在中国，这个数字又是多少呢？2015年，中国科学院广州地球化学研究所的一个研究组发布的一篇报告显示，中国一年使用16.2万吨抗生素，其中约48%为兽用药。如果抗生素使用方式不发生改变，耐药菌肯定还会源源不断地产生。抗生素的发现，曾是人类历史上最了不起的医学进步之一，在细菌感染面前建立起了一道无比坚固的防线，但现在这道防线正被人类自己瓦解。

这三篇扣人心弦的文章，讲述了三个不一样的未来。而人类未来的故事，终归要由人类自己来书写。

新的一年又开始了，祝愿人类朝着正确的方向踏上伟大的新征程。

执行主编 

1

德国版

植入芯片，治疗截瘫



截瘫患者的大脑神经元与身体其他组织的连接被破坏了，因此患者不能控制身体某些部分，甚至失去对这部分身体的知觉。通过在大脑植入芯片，患者能重新感受到手指上的触觉，尽管这并不是患者自己的手指。研究人员在一位因事故造成上肢截瘫患者的脑部植入了芯片。这些纽扣大小的芯片与一个机械臂相连接。当机械臂被触碰时，它会通过芯片把电信号传送到大脑。患者就能感受到机械臂上的触碰，就像触碰发生在自己的手上一样。通过在大脑植入芯片，截瘫患者还可以在一段时间内控制机械臂或者自己的四肢。这是截瘫治疗技术上的一个突破，并能应用在神经控制假肢上。（译/陈禾）

2

日本版

量子纠缠与全息原理



科学家从黑洞中熵的独特性质出发，提出了“宇宙全息原理”，认为含有重力的三维空间是从不含重力的二维空间中诞生的。或者说，我们生活的三维宇宙，其实只是一个二维全息宇宙产生的立体投影。从超弦理论出发，我们可以推导出全息原理的重要标志，即AdS/CFT对偶（即这两种物理理论间的假想联系）。而在二维空间产生三维空间的过程中，一种被称为“量子纠缠”的量子力学现象扮演着重要角色。在量子纠缠现象中，“纠缠熵”是一个重要的物理量，而由日本物理学家笠真生和高柳匡共同提出的“笠·高柳公式”使相关领域的计算和研究取得了新的进展，也开创了全新的全息纠缠熵方向。这项工作被弦理论之父爱德华·威滕（Edward Witten）评价为2000年以来弦理论领域中最重要的工作之一。两名提出者因此赢得了2015年基础物理学突破奖。（译/赵维

杰)

3

法国版

宇宙不需要暗物质？



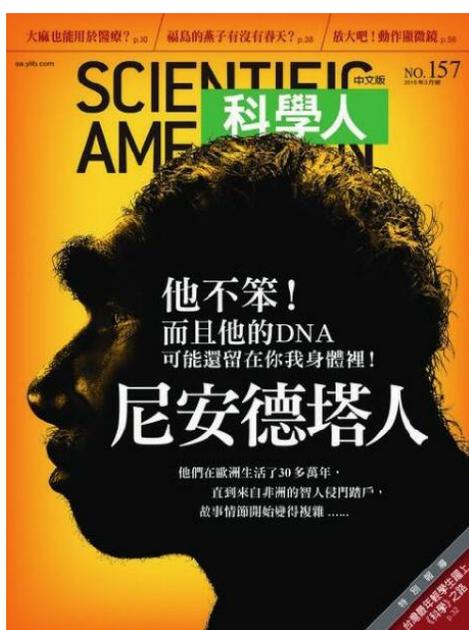
最近，美国凯斯西储大学天文学家斯泰西·麦高（Stacy McGaugh）带领的团队宣布，宇宙也许可以不需要暗物质。研究人员研究了153个星系内星际气体速度的分布情况，同时计算出星系引力下的气体加速度。同时他们还确定了源于普通重子物质（非暗物质）的加速度。两者比较后，研究人员发现，153个不同星系的观测数据都表明，普通重子物质的质量分布与其围绕星系中心的运动方式存在一个简单的对应关系。这种对应关系即使在不引入暗物质的情况下也是成立的。对此，麦高团队提出了三种解释。第一种，这种对应关系和星系形成时的动力学特性有关。第二种，星系中暗物质的分布和可见物质的分布存在着关联。第三种，这一现象可由以色列物理学家莫蒂·米尔格罗姆（Moti Milgrom）于1983年提出的修正牛顿引力理论（MOND）解释，不需要

暗物质理论来解释。新研究并未说明暗物质不存在，但对暗物质理论提出了一个新的挑战。目前有几个研究团队正试图通过模拟有暗物质的星系的形成过程，找出暗物质与重子物质之间的联系。（译/孙荣奇）

4

中国台湾版

读者喜欢看什么



中国台湾中正大学通识教育中心黄俊儒教授针对台湾主流平面媒体的科学新闻报道进行了一项全面调查。研究结果发现，台湾地区的科学新闻报道明显集中在两种类型的新闻，一种是“电脑、资讯、网络”类，另一种是“健康、医疗、食品”类，仅这两种类型的科学新闻加起来就占了将近一半。健康医疗类的新闻占比高，是许多国家的共同点，毕竟这是与一般民众最贴近的科学主题；但“电脑、资讯、网络”类新闻也占比这么高，可以说是比较特别的，但这类科学新闻大多报道水平不高，看起来就像是帮厂商作免费广告。在比较不受媒体青睐的主题方面，许多常见的科学领域都遭到一定程度冷落，例如太空、航天、化学、化工、材料、半导体是最不受媒体重视的科学新闻类型。这些数据一方面反映出民众对科学话题的喜好，另一方面可能也显示了新闻媒体较不擅长处

理某些科学主题。（编/廖红艳）

全球学术期刊概览

化学

硅基生命第一步？



SCIENCE 354, 6315, 25 NOV 2016

硅与碳属于同族元素，可以形成类似的结构，硅也是地球上储量仅次于氧的元素，然而，生命在漫长的演化进程中，竟从未将硅原子纳入有机结构的框架和生化机制，如红细胞中的铁元素以及叶绿素中的镁元素那样。加州理工学院的化学工程师近期利用一种来自冰岛海底温泉的细菌——海洋嗜热盐菌（*Rhodothermus marinus*）所产生的酶，这种酶能够催化硅原子与碳原子以化学键结合，将产生这种酶的基因植入大

肠杆菌当中，大肠杆菌就得以利用含硅前驱体产生含硅有机物。为了提高效率，负责这项研究的弗朗西斯·阿诺德（Frances Arnold）利用了她在上世纪90年代发明的定向进化（directed evolution）技术，在酶的活性区域引入突变，然后选取酶活性有所提升的细菌。经过几代突变和筛选，足以显著提升酶的产量，催化效率比人工合成的催化剂高15倍。利用细菌产生含硅有机物的这一新研究，不仅提供了高效环保地合成含硅有机物的新方法，或许也能帮助科学家探索能否将硅纳入生命体的课题。

行星科学

冥王星的“心”可能是被寒冰压垮的



NATURE 540, 97–99, 01 DEC 2016

冥王星上的史波尼克平原（Sputnik Planitia）位于其表面的心形区域内，宽约1000千米，被明亮的冰雪覆盖。关于这一盆地的形成原因有几种猜测，一种认为它最初形成于一次撞击，撞击之后地下的海洋在边缘地区上涌，形成盆地，随后冰自然而然地在此聚集，引力效应让盆地逐渐调整到如今远离卫星“卡戎”的那一侧。但最近，马里兰大学的研究者提出了新的观点：或许不是先有盆地再有冰，而是先有冰再有盆地。他们通过模拟发现，即使原本不存在撞击带来的盆地，寒冰也会在此位置聚集，因为这是冥王星表面最寒冷的地方。冥王星与卡戎的潮汐锁定（即卡戎总是以同一面面向冥王星）决定了积冰的位置必然位于远离卡戎的那一侧，而寒冰的聚集最终导致了冥王星表面坍塌，形成盆地。该盆地形成于卡戎诞生后不久，自此以来就一直保持稳定，不过体积逐渐

变小。

研究 RESEARCHES

责任编辑：丁家琦

生命科学

北大发现全新通用疫苗制备方法



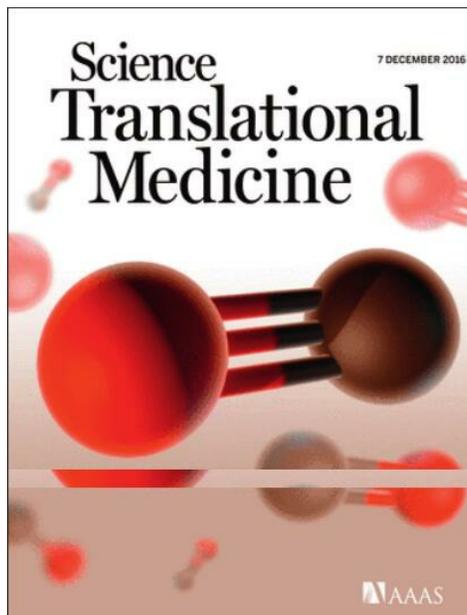
SCIENCE 354, 6316, 02 DEC 2016

疫苗接种是指通过灭活、减毒等方式，消除或减轻病原体的危害性，并注射到人体内，使人体免疫系统对这种病原体产生免疫力，以预防疾病的方法。然而灭活疫苗效果不尽如人意，减毒活疫苗又可能变异而恢复致病力，产生严重的后果。美国研究者曾研究出将病毒的一个基因片段切除，使病毒能够正常地感染人体，但却失去复制能力的活病毒疫苗，但工艺复杂，每种病毒都需要长期的独立研发过程，因此成本高且不具有普适性。近日，北京大学药学院周德敏教授和张礼和院士带领的团队开发出了一种普遍适用的活病毒疫苗制造方法，或许可用于制造几乎所有病毒的疫苗。他们给病毒引入一个终止密码子，使病毒能够正常感染人体，但会失去复制能力，只有在他们实验室自主研发的细胞系中，同时满足三个苛刻的条件，病毒才能启用复制能力，高效地批量生

产这种疫苗。这种方法已在动物试验上取得了非常好的效果。

医学

一氧化碳中毒有救了



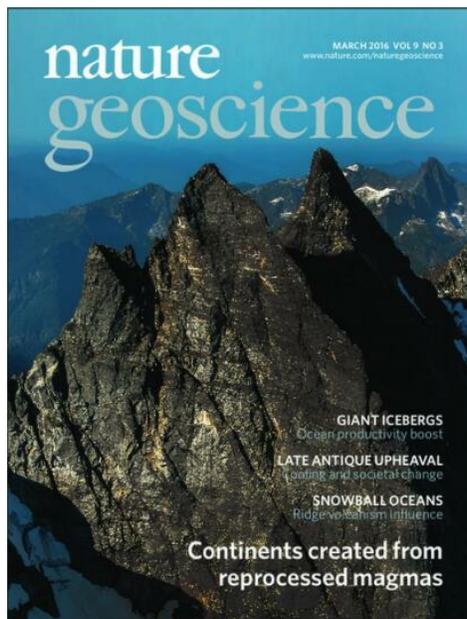
SCIENCE TRANSLATIONAL MEDICINE 8, 368, 07 DEC 2016

一氧化碳是全球中毒死亡事件的最大元凶。这种无色无味的气体是碳不完全燃烧的产物，因为它与血红蛋白的结合能力比氧气与血红蛋白的结合能力强，因此它会阻碍血红蛋白和氧气结合，让全身组织缺氧而致死。一氧化碳中毒此前没有任何有效解药，不过，匹兹堡大学的研究者近期首次开发出了一种药物。他们对大脑中的一种类似血红蛋白的物质——脑红蛋白（neuroglobin）进行了重新改造，让它结合一氧化碳的能力比血红蛋白更强。当向一氧化碳中毒的小鼠注射这种脑红蛋白之后，这种蛋白就会把一氧化碳从血红蛋白那里夺走，让血红蛋白得以重新与氧气结合。结果表明，这种脑红蛋白能让一氧化碳中毒的小鼠恢复心跳和血压，在5分钟之内就救活了87%的小鼠。研究组正进一步研究脑红蛋白对大鼠、更大的哺乳动物，乃至人类的解毒效果，并研究大量

生产这种药物的方法。一旦这种药物能够投入临床使用，势必能拯救无数人的性命。

气候学

6000年前，撒哈拉还是大草原

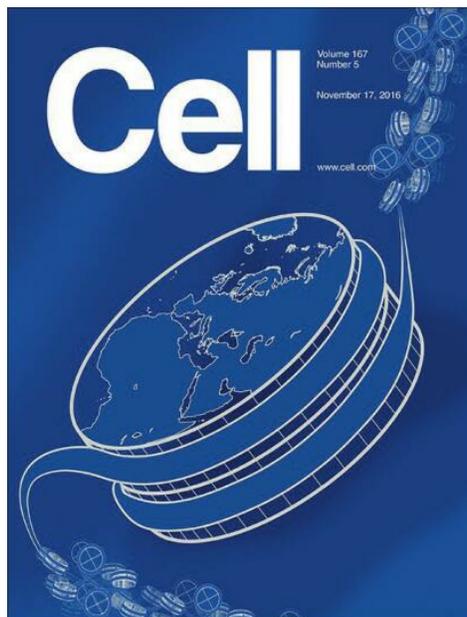


NATURE GEOSCIENCE 9, 892–897, OCT

6000年前，撒哈拉还是雨量充沛的大草原，为何如今就变成了全球最干燥的地方之一？学界常用的热带辐合带（强降雨的热带地区）移动理论无法解释这类现象，而美国得克萨斯农工大学与耶鲁大学的合作团队分析了全新世（从11700年前至今的地质年代）撒哈拉地区的降水模式，并与如今热带辐合带做了对比，结果发现热带雨带的迁移不仅受纬向能量流动的影响，也受经向能量流动的影响。根据这些因素，他们建立了预测降水的模型，发现能很好地解释全新世中期撒哈拉地区的降水变化，这一新模型也能帮科学家更准确地预测降水。

生命科学

多吃膳食纤维，保护肠道健康

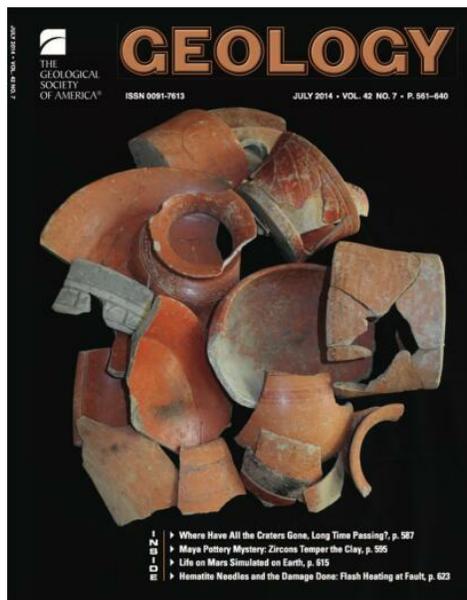


CELL 167, 5, 17 NOV 2016

我们都知道膳食纤维对肠道健康有多种好处，但它们究竟是怎么保护肠道健康，或者说，把它们从食物中去掉会给健康带来怎样的危害，科学家还知之甚少。美国密歇根大学医学院的研究者培养出了一系列限菌小鼠（*gnotobiotic mouse*），即让小鼠肠道中只含有特定种类的人类肠道微生物，对这类小鼠的研究揭示了膳食纤维、肠道菌群和结肠黏液屏障之间的关系。研究人员发现，肠道菌群需要以膳食纤维为食，而慢性或是间歇性的膳食纤维缺乏会导致肠道菌群转而依赖肠道黏液糖蛋白作为营养来源，这就会侵蚀结肠的黏液屏障，增加有害细菌感染的可能性。该研究进一步支持了膳食纤维有益于肠道健康的观点。

地球科学

25亿年前的细菌

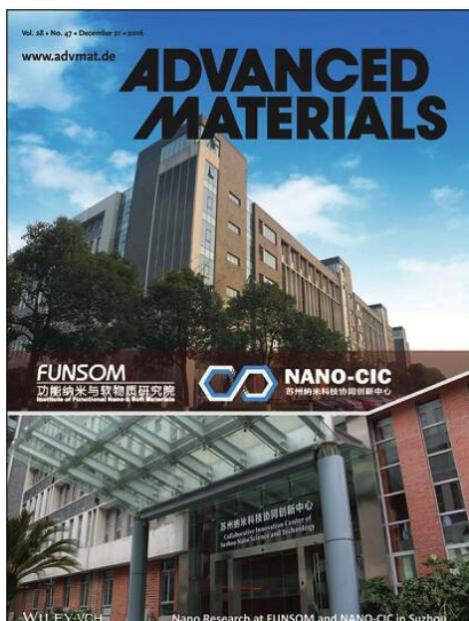


GEOLOGY 44, 12, DECEMBER 2016

在生命形成初期，地球上的环境与现在大不相同，当时地球大气层中的氧气含量不到现在的0.001%，生命是怎么存活下来的呢？了解当时的古细菌，对我们了解地球的演化史也非常重要。近日，美国辛辛那提大学的研究者宣布，他们在南非的卡普瓦尔克拉通找到了25.2亿年前的古细菌化石。这种细菌呈球形，比现在的细菌大很多，其细胞器也比现在的细菌大很多，倒有些接近如今深海里的单细胞生物。地质学家猜测这些古细菌以火山产生的硫化氢为食，通过把硫化氢氧化为硫酸盐而获取能量，这和如今将有机物分解成矿物质和气体的细菌扮演的角色类似。这一新发现平息了关于硫氧化细菌起源的争议，也帮助我们了解了氧气大量出现之前地球的生物和物质循环。

材料科学

寻找导电的超硬材料

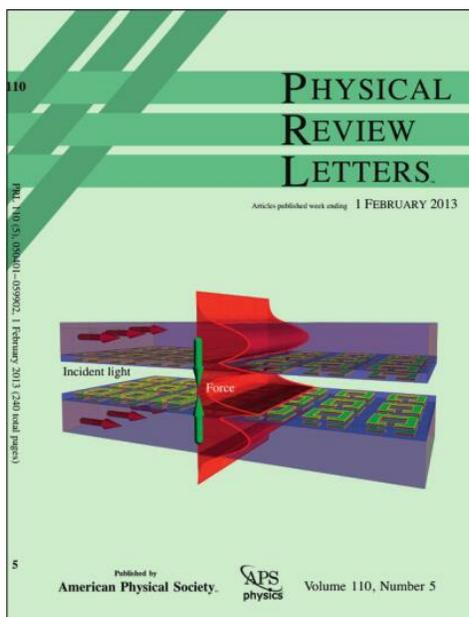


ADVANCED MATERIALS, PUBLISHED ONLINE 15 NOV 2016

超硬材料一直是凝聚态物理领域重要的研究方向，在实际的工业生产中也有巨大的应用前景。传统的超硬材料诸如金刚石、立方氮化硼等，通常由轻元素（B-C-N-O）以共价键的形式组成，这种共价键有极高的力学强度，但导电性通常都比较差，因此，寻找超硬的低电阻甚至金属性的材料成为近年来一个重要的研究热点。中科院物理所的研究员和合作者一道，合成出一种导电性相当于金属的超硬材料——一种新型锆硼化合物 ZrB_{12} ，硬度达到超硬材料的标准，且电阻率与金属铂（Pt）相当。随着温度的降低，材料的电阻率变化也表现出金属性，并在5.5 K左右出现了超导特性。

物理学

中科大制备出**10**个光子的纠缠态



PHYS. REV. LETT. 117, 210502, 15 NOV 2016

中国科学技术大学潘建伟团队又做出量子纠缠新成果了：这次，他们首次在实验中实现了10个光子的量子纠缠。我们知道，量子计算机的运行依赖于多个量子比特的纠缠，而潘建伟团队把纠缠的最大光子数一下子提升了一倍。目前光子纠缠主要采用非线性晶体来实现，实验团队采用的是 β -硼酸钡（BBO）晶体，它可以将一小部分入射光子变为一对偏振互相垂直的纠缠光子，并往不同的方向出射。要将10个光子纠缠在一起，需要5片非线性晶体和多次折射反射，因此，提高光子的接收效率就至关重要。潘建伟团队用中间夹着一片偏振片的两片BBO晶体代替了单片BBO晶体，把系统整体的收集效率从40%提高到70%，这是实验成功的关键。这一工作表明，我国在量子信息领域已经处于世界领先地位。

年度评选

2016年《环球科学》十大科学新闻

作为一年一度的年终盘点，我们着重关注三类事件：重大科研进展、某一领域的重要发现、引起全球关注的科技新闻事件。这些新进展、新发现和重大事件，不断扩展着我们的认知边界，也让我们的生活变得更加丰富多彩。本年度十大科学新闻的评选得到40余位科学家的参与和支持，在此向他们表示感谢。



① LIGO首次直接探测到引力波

入选理由：广义相对论的预言得到验证，天文学进入引力波时代。

爱因斯坦创立广义相对论后不久，就预言弯曲的时空会产生水波一样的“涟漪”——也就是引力波。在这之后的100年中，尽管天文学家曾根据一些观测数据，间接证明了引力波的存在，但始终没有直接探测到这一现象，直到2016年2月11日：这天，激光干涉引力波天文台

（LIGO）宣布，LIGO的两台探测器捕捉到了30多亿光年外的两个黑洞在合并时产生的引力波。作为近年来最重要的物理学成就之一，LIGO的这一发现不仅再次证实了广义相对论，还开辟了引力波天文学的新时代——通过探测引力波，天文学家可以更好地认识遥远的天体和广袤的宇宙。

② AlphaGo击败世界围棋冠军李世石

入选理由：人工智能又一次震惊世界，人工智能发展史上新的里程碑。

2016年3月9日到15日，韩国首尔，谷歌旗下DeepMind公司开发的

人工智能程序AlphaGo，与世界围棋冠军李世石展开了一场五局制的较量，最终AlphaGo以4: 1的比分取得压倒性胜利，举世皆惊。虽然曾有“深蓝”击败国际象棋大师卡斯帕罗夫的先例，但在此之前，人们普遍认为围棋的复杂性远大于国际象棋，人工智能想要战胜围棋高手至少在目前还很难实现。

但AlphaGo依靠近年来快速发展的深度学习（deep learning）技术，利用大量棋局数据进行训练，最终达到了打败人类顶尖棋手的水平。AlphaGo与李世石的这次对弈，不仅是人工智能发展史上新的里程碑，也标志着人工智能的强势崛起，并在公众中掀起关注人工智能的热潮。

③ 中国发射世界首颗量子通信卫星

入选理由：拉开了量子通信时代的帷幕，将催生第二次信息革命。

2016年8月16日凌晨，人类历史上第一颗用于量子通信研究的量子科学实验卫星“墨子号”在酒泉发射升空，为建立覆盖全球、天地一体化的量子通信网络奠定了技术基础，也拉开了量子通信时代的帷幕。半个世纪前，物理学家基于量子理论，研制出了晶体管和激光器，催生了第一次信息革命，让计算机、智能手机和互联网重塑了人类世界；今天，量子信息技术的高速发展，则在催生第二次信息革命。以“量子密钥分发”和“量子态传输”为代表的量子通信技术，以超高计算能力为特征的量子计算机，必将在未来再次重塑人类世界。

④ 全球最大口径球面射电望远镜启用

入选理由：世界上灵敏度最高的射电望远镜，极大拓展了人类探测宇宙天体的能力。

2016年9月25日，500米口径球面射电望远镜（FAST）在中国贵州省平塘县正式启用，一举超过350米口径的阿雷西沃射电望远镜，成为世界最大的单口径射电望远镜。FAST的天线面积相当于30个足球场，巨大的接收面积使其具有极高的观测灵敏度。而且，FAST镜面由许多的三角形反射板组成，每一块都可以移动，从而可以让天线调节形状，观测不同方向的天体。因为这些独特的设计，FAST能够捕捉到来源极为遥远的电磁信号，观测范围可达可观宇宙边缘。借助这只巨大

的“天眼”，天文学家将能窥探星际之间互动的信息，观测暗物质，测定黑洞质量，甚至搜寻可能存在的地外文明。

⑤ 科技力量在美国总统大选中崭露头角

入选理由：最具“科技色彩”的一次总统大选。

2016年11月8日，美国共和党候选人特朗普击败民主党候选人希拉里，将成为新一任美国总统。虽然这是时政类重大新闻，但整个大选过程中，科技力量却一直在发挥重要作用。大选期间，Facebook、Twitter等重要的科技新媒体平台上，特朗普聚集数千万粉丝为他摇旗呐喊，压倒了传统主流媒体，这股力量成为特朗普获胜的重要因素。戏剧性的一幕发生在对大选结果的预测上。当主流媒体一边倒预测希拉里大概率当选时，主要从新媒体平台采集数据的人工智能系统MogAI做出的预测和主流媒体截然相反。最后，MogAI赢了，这是它连续4次正确预测美国总统大选。选举结束后余波未了，经常在科学议题上有出格言论的特朗普，大选前就遭到美国科学家的集体反对，当选后又引起科学家的集体担忧。美国科技政策的未来走向，格外引人关注。

⑥ 百余位诺奖得主集体发声，支持转基因

入选理由：权威科学家在转基因问题上最大规模的集体发声。

2016年6月29日，百余位诺贝尔奖得主发布联名公开信，强烈要求绿色和平组织不再反对转基因技术。这次公开信由1993年诺贝尔生理学或医学奖的得主理查德·J·罗伯茨（Richard J. Roberts）和菲利普·A·夏普（Phillip A. Sharp）发起，诺贝尔奖得主们在公开信中表示，全球科学机构和监管机构的长期研究表明，通过生物技术改良的农作物和食物即使不比其他农作物和食物更安全，至少也是同等安全的，至今从未有过一起经过确认的转基因食品致病案例。百余名诺奖得主罕见地为转基因技术集体发声，有助于让转基因争论回归科学，让公众信赖科学，打消不必要的疑虑。

⑦ 天宫二号和神舟十一号载人飞行任务圆满成功

入选理由：中国发射第一个真正意义上的空间实验室。

2016年9月15日，天宫二号空间实验室成功发射并进入预定轨道。10月17日，神舟十一号载人飞船成功发射，并于19日凌晨与天宫二号成功对接，两名航天员景海鹏、陈冬进入天宫二号空间实验室，开展了为期30天的科学实验。天宫二号是中国第一个真正意义上的空间实验室，第一次实现航天员中期驻留，并成功开展了50余项空间科学实验与应用实验。天宫二号与神舟十一号载人飞行任务是最接近未来中国空间站要求的一次载人飞行，也标志着中国具备了开展较大规模空间应用的基础条件。

⑧ 全球第一个三亲婴儿诞生

入选理由：生殖医学领域的革命性事件。

2016年4月6日，全球第一个“三亲”婴儿在墨西哥诞生。这位婴儿的母亲虽然自身健康，但携带有导致罕见神经系统疾病——莱氏综合征的基因突变。为帮助这位母亲，确保致病突变不会遗传给孩子，美国纽约新希望生育中心的张进（John Zhang）采用了一种名为纺锤体核移植的技术，将母亲卵子中健康的细胞核转移到捐赠者提供的、已经去除细胞核的卵子中，最终得到的卵细胞含有母亲的细胞核DNA和捐赠者的线粒体DNA。卵细胞受精后，产生了全球首个含有三个人的遗传物质的胚胎。尽管存在伦理争议，但这一成果依然被认为是生殖医学领域的重大进展，有可能为遗传疾病、高龄妇女的不孕不育等提供解决方案。

⑨ 科学家发现距离地球最近的宜居行星

入选理由：这是人类已发现的3500颗系外行星中最接近地球的一颗。

2016年8月25日，英国伦敦玛丽王后大学的科学家吉列姆·安格拉达—埃斯契德（Guillem Anglada-Escudé）在《自然》杂志上宣布，他利用欧洲南方天文台（ESO）的望远镜，以及其他天文观测设施，找到了一颗围绕比邻星运行的宜居行星。比邻星是距离太阳系最近的恒星（一颗红矮星），仅有4.2光年的距离。这颗行星则被命名为比邻星b，是1995年以来发现的3500颗系外行星中，最接近地球的一颗。而且，科学家认为比邻星b的表面温度允许水以液态的形式存在，温和的红矮星也可能

给这颗行星营造一个适合生命繁衍生息的环境。

⑩ SpaceX完成全球首次海上火箭回收

入选理由：实现火箭的可重复利用，航天将进入廉价时代。

2016年4月9日凌晨，美国太空探索技术公司SpaceX的“猎鹰9号”运载火箭发射升空后，在大西洋的海上回收平台成功着陆。在经历了4次失败尝试后，SpaceX首次成功实现海上火箭回收，这是该公司在2015年底成功进行陆上火箭回收之后又一个里程碑。相比于陆上回收，海上回收的难度更高，但也具有前者不可比拟的优势：在一些飞行任务中，受剩余燃料所限，火箭不具备飞回陆地着陆场的条件，而海上回收则可以直接自然降落。这两次火箭回收试验的成功意味着运载火箭不再是一次性用品，可重复利用的火箭将使火箭发射成本降低30%，大大提升火箭发射效率，这也标志着，商业航天将进入新的阶段。

天文学

“盖亚”号：绘制银河系新图景

绘制新的银河系地图有助于天文学家更好地理解恒星物理学和银河系的历史。

撰文 香农·霍尔（Shannon Hall） 翻译 张哲



“恒星是宇宙的地标。”——约翰·赫舍尔（John Herschel, 1792–1871）

天文学家将展开一幅新的宇宙图景。2013年底，欧洲空间局（European Space Agency）发射了“盖亚”号航天飞船。它将在为期5年的任务中，以前所未有的精度绘制宇宙星图——第一批恒星坐标已经发布了。任务完成后，这幅星图将能以极高的分辨率，准确定位银河系及周边星系中约10亿颗恒星的位置，甚至能够辨认出5微角秒的物体——相当于在地球上能看见月球表面的一枚硬币。“盖亚”号装备的十亿像素摄像机，还能够记录每颗行星的距离以及二维速度，让我们有机会重新认识周边星系。

美国哥伦比亚大学的天文学家凯瑟琳·约翰斯顿（Kathryn Johnston）认为，绘制这幅星图的意义相当于首次绘制出了地球的大陆——把一幅只有模糊的蓝、绿色块的图像，变成了有着山川溪谷的世界。“很奇怪的是，人类对银河系的了解并不比其他星系准确，”约翰斯顿说，“原因可能是我们身处星系之中，无法给自己拍一个全景。不过这正是“盖亚”号要做的。”

负责“盖亚”号项目的科学家蒂莫·普鲁斯蒂（Timo Prusti）称，新地图备受期待，在2016年9月首批数据发布的当天，就至少有1万人访问了数据库。发布的数据中包含10亿颗恒星的初步位置（后续数据发布后，该数字还会增加），以及星空中最明亮的200万颗恒星的距离和侧向运动信息。之后还会发布银河系中离我们更远的恒星的距离和运动数据，从而形成以太阳为中心向外延展的连续地图，就像池塘中的波纹一样。

目前已经有了很多发现。比如，“盖亚”号项目的科学家已经使用这些初步结果，解决了有关昴宿星团（Pleiades star cluster，即著名的“七姊妹”星团）距离的争论。这个争论源于“盖亚”号的前任——“依巴谷”卫星（Hipparcos）任务发布的最后一批数据。这些数据非常重要，因为没有准确的距离，天文学家无法确定任何恒星的亮度或半径。对昴宿星团的准确测量同样也很重要（依巴谷的测定值是错误的），因为昴宿星团是理解恒星起源的基准星团。普鲁斯蒂称，“建立关于年轻恒星的理论非常困难，因为它们并不稳定，有多种可能的变化。因此需要准确的观测，以建立更精确的模型。

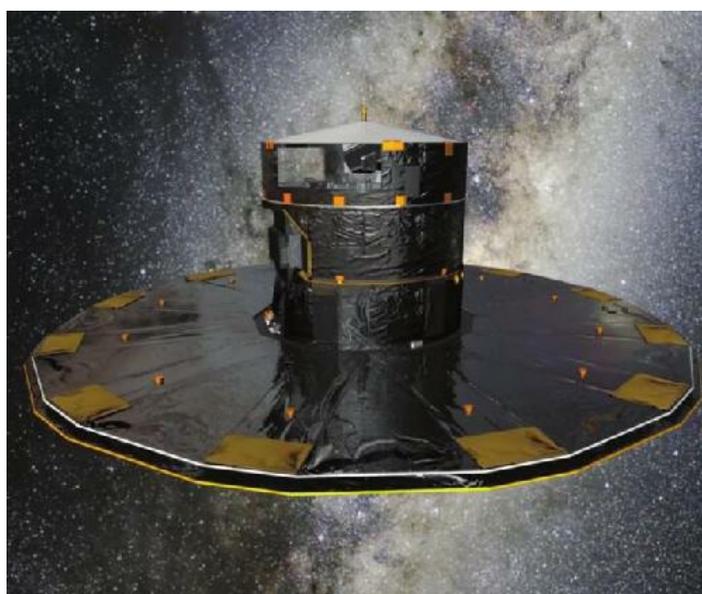
其他研究团队也在使用这些新的数据，研究一些不同寻常的恒星（比如看起来特别亮或特别暗，或者移动速度特别快或特别慢）。美国普林斯顿大学的天文学家戴维·施佩格尔（David Spergel）说，“天文学家认为自己已经很了解恒星运动。但我怀疑，随着更精确数据的发布，我们也许会发现一些在大方向上没问题，但在细节方面会颠覆我们认知的地方。”行星科学家对“盖亚”号发布的数据也非常感兴趣，因为他们需要寻找有行星的恒星。尽管“盖亚”号还没有发现任何这样的恒星，但科学家希望，它最终可以发现数千甚至数万颗这样的恒星。

尽管在2016年9月已经收获了一大批数据，天文学家仍在热切盼望着“盖亚”号的下一次观测数据（还会发布4批数据）。美国纽约大学的天文学家戴维·霍格（David Hogg）称，尽管用第一批数据我们就可以

做很多研究了，但当任务结束时，能做的将远不止于此。所有的数据将于2022年发布，届时研究人员将能够实现此次任务的主要科学目标：揭示银河系的结构和演变，从而理解银河系狂暴的历史。比如，银河系中有些恒星原本诞生在附近的小星系内，但后来庞大的银河系吞并了它们所在的小星系。如今，那些小星系的残骸还能以贯穿星空的微弱恒星流的形式看到，为我们提供周边星系演化的时间线索。约翰斯顿说，“你发现了曾经存在的星系，它们曾经的轨道，以及与它们有关系的恒星。因此，你能还原银河系吞并其他星系的历史。”

我们现在还无法确定“盖亚”号将书写怎样的传奇。除了完成主要科学目标，它还会观测太阳系中数千个非恒星物体，或许还能绘制出银河系中的暗物质分布，确定数十万个类星体（古代星系仍在燃烧的内核）的位置。从长远看，“盖亚”号还能改善其他望远镜的观测结果，因为它们将知道准确的观测位置，普鲁斯蒂说。同时，霍格还在美国纽约和德国海德堡组织了名为“盖亚冲刺”（Gaia Sprints）的活动，让各类天文学家有机会共聚一堂，共同探索如何更好地利用这些数据。霍格说，“‘盖亚’号打开了发现的大门，我认为这是它的意义所在，同时也是每个人都兴奋的真正原因。它将带给我们一个新的世界，而首批数据的发布只是这个新世界的精彩预告片。”

数据统计



整理 萨拉·古达尔兹 (Sara Goudarzi)

150万千米

“盖亚”号与地球的距离

50倍

“盖亚”号上相机的分辨率比哈勃太空望远镜高出的倍数

30多倍

“盖亚”号主镜收集的光线比星测绘卫星“依巴谷”高出的倍数

70

“盖亚”号将对10亿个目标中的每一个进行观测的次数

资料来源：Preceding page: Courtesy of Stéphane Guisard and ESO; This page: Courtesy of C. Carreau ESA; Sources for statistics: European Space Agency (distance, primary mirror, number of observations); “Astrometry: Europe's Star Power,” By Decin Powell, in Nature, VOL. 502; October 2, 2013 (resolution)

空间科学

木卫二上真的有喷泉？

木卫二上疑似有“喷泉”从厚厚冰层下喷出，这意味着科学家不必钻穿厚度未知的冰层，就能分析这片海洋的有机化学成分，甚至探测其中的生命迹象了。

撰文 李·比林斯（Lee Billings） 翻译 李想



《天体物理学杂志》（*Astrophysical Journal*）上的一项最新研究表明，木卫二上被冰层覆盖的海洋似乎在间歇性地向外喷发水汽。这意味着，潜藏在近百千米厚冰层下的木卫二海洋，可能比之前预想的更适于孕育生命，对天体生物学家来说，他们也可以更容易开展相关研究了。

“如果木卫二上真有喷涌出的水蒸汽，那就非同小可了。这意味着科学家不必钻穿厚度未知的冰层，就能分析这片海洋的有机化学成分，甚至探测其中的生命迹象了，”这项研究的领导者、就职于美国太空望远镜科学研究所（Space Telescope Science Institute）的威廉·斯帕克斯（William Sparks）说。

这些水汽还暗示，木卫二表层下可能存在一个能维持生命活动的热源。

2013年末至2015年初，斯帕克斯的研究小组在木卫二经过木星表面时，借助哈勃太空望远镜的成像摄谱仪进行了10次天文观测。在紫外光下，木卫二的冰层呈暗色，研究人员可以借此从木星亮白柔和的云层图中寻找水蒸汽柱的轮廓。经过大量的图像处理，在木卫二暗区的南端边线上似乎可以看到3处紫外谱的阴影。如果这些阴影确是蒸汽柱而非哈勃望远镜的仪器故障所为，那么总计约有几百万千克（上千吨）的水喷射到了距木卫二表面近200千米高的地方。

斯帕克斯坦承，他们小组的观测结果存在不尽如人意的模糊处。“这些观测结果已经达到了哈勃的极限，”他说，“我们并不是宣称已经证实了水蒸汽柱的存在，只是提供了它们可能存在的迹象。”

2014年《科学》（*Science*）杂志上也报道了这类蒸汽柱的存在，但后续的观测又显示喷发似乎已经停止，或从未有过。就这一点来看，“新的观测与之前的结果相符”，乔治亚理工学院的行星科学家布兰妮·施密特（Britney Schmidt，未参与此项研究）说。

这样的谨慎是合理的，木卫二上是否存在水蒸汽柱，将在很大程度上影响行星际探索的未来，包括为新探索任务所准备的数十亿美元的去向。

美国航空航天局（NASA）和欧洲空间局（European Space Agency）已经计划在2020年前后向这颗诱人的木星卫星进发了。

环境

奥巴马的环境保护功绩

奥巴马给继任者留下了一笔宝贵的环境保护遗产。

撰文 赖安·F·曼德尔鲍姆 (Ryan F. Mandelbaum) 翻译 黄安娜

美国总统奥巴马曾称，环境保护是他“任期内最重要的任务”，下面的数据可以证明，他所言非虚。与之前历届美国总统相比，奥巴马保护的陆地和海洋面积最多，而这部分得益于1906年罗斯福总统颁布的《古迹保护法案》(Antiquities Act)。该法案赋予行政部门相对自由的权力，可以直接颁布保护环境的公告，而无需国会批准。除此以外，在奥巴马执政期间，得到恢复并从濒危物种保护列表上除名的动植物种数，比之前各届政府的加在一起还多。塞拉俱乐部 (Sierra Club) 旗下Our Wild America项目的负责人褚丹 (Dan Chu, 音译) 说，“我们相信奥巴马总统将给继任者留下一笔宝贵的环境保护遗产。”

数据统计

36万平方英里 (约93万平方千米)

罗斯福政府保护的陆地面积

6250平方英里 (约1.6万平方千米)

奥巴马政府保护的陆地面积

85.6万平方英里 (约221.7万平方千米)

奥巴马政府保护的海洋生态系统

奥巴马执政期间，得到恢复并从濒危动植物保护列表上除名的物种数目

数据来源：National Park Service (Roosevelt-protected land and new parks); U.S. Department of the Interior (Obama-protected land and water); U.S. Fish & Wildlife Service (endangered species delisted)

农业

南非高中生发明迷你蓄水池

16岁的尼尔金发明了一种能缓解农作物干旱的新材料，并获得了谷歌科学挑战赛大奖。

撰文 凯瑟琳·卡鲁索（Catherine Caruso） 翻译 侯政坤

有一天，在翻看报纸时，基娅拉·尼尔金（Kiara Nirghin）注意到了几则关于农民抗旱的新闻。尼尔金是南非约翰内斯堡的一名高中生，虽然她知道南非正遭受严重旱灾，但在读报一瞬间，她突然意识到，干旱不仅仅是南非一个国家面临的问题，“整个世界都受到了影响，而且迄今为止，并没有能应对旱灾的革命性的措施。”

随后，尼尔金开始思索，如何才能让植物获取到水分——即便是在最干旱的时候。在2016年9月举行的谷歌科学挑战赛（Google Science Fair，《科学美国人》是这个奖项的共同发起者之一）上，尼尔金提出的简单易行的方案赢得了最终大奖。

在展示方案时，尼尔金说，她研制出了一种可生物降解、吸水能力超强的材料，这种材料可以被“种”在作物旁边，在土壤中形成一个“迷你蓄水池”。首先，她将橘子皮放在水中煮沸，使水中含有大量胶质——一种吸水能力超强的碳水化合物。然后，她向煮好的果胶液中投入一些干橘子皮、牛油果皮，将混合物烘干后再捣成粉末。最后，尼尔金将捣碎的粉末和更多的橘子皮和牛油果皮混在一起。最终得到的材料能够吸收相当于自身重量300倍的水。在实验中，这个新发明可以保持土壤潮湿，同时使生长在土壤中的作物长得更茁壮。

尼尔金希望，她研发的材料可以提高干旱地区的农作物产量。“尼尔金的研究让评委深受鼓舞和启发，” 马里耶特·迪克里斯蒂娜（Mariette DiChristina，《科学美国人》主编）评价说“尼尔金设计的方案、研究的潜在影响力，以及她致力于通过科学推进世界发展的激情，

给评委留下了深刻的印象。”

生物学

狮子比老虎更聪明？

利用狮子开展的研究表明，动物的社交行为可以提升其认知水平。

撰文 詹森·G·戈德曼（Jason G. Oldman） 翻译 赵昌昊



一头非洲狮仰头注视着悬吊的木箱，箱中有一大块生牛肉。要想吃到这块肉，它需要拉动木箱上垂下的绳子，从而打开弹簧门闩。研究人员设计这个实验，是为了测试这些威风凛凛的狮子认知能力如何。

“社群智力假说”（social intelligence hypothesis）认为，由于群居动物要应对复杂的社群生活，例如记住每个个体是否属于自己的社群，因此它们逐渐演化出了一套心理机制，以应对一些对心智水平要求较高的情境，比如上述的木箱实验，并且记住解决方法。换句话说，复杂的社群行为使得动物拥有了复杂的认知能力。

长久以来，研究人员一直在通过观察黑猩猩、海豚、大象等动物的

行为来研究这一理论。南非夸祖鲁-纳塔尔大学（University of KwaZulu-Natal）的生物学家纳塔莉亚·博雷格（Natalia Borrego）则主要研究大型猫科动物，她说：“猫科动物中有许多与我们密切相关的物种，它们面对的生态环境压力不同，所构成的社会系统也不同。”

在美国佛罗里达州的狮子王国游猎园（Lion country safari），博雷格的研究团队对12只狮子进行了前面所描述的木箱实验。最终，11只狮子成功吃到了牛肉，其中7只独立找到了打开木箱的方法，另外4只则通过观察其他狮子，也学会了如何打开木箱。在5至7个月后，11只狮子中仍有10只还记得木箱的正确打开方式。相关实验结果发表在了近期的《动物认知》（*Animal Cognition*）杂志上。

“狮子能够记得它们学到的技能，这不算新鲜。”奥克兰大学的认知心理学家珍妮弗·冯克（Jennifer Vonk）说，她研究的是熊的认知行为。然而，她认为狮子能表现出社交互助行为，即一些个体能够在与其他个体共处时通过学习而掌握一项技能，这一点非常重要，因为“即使在灵长类动物当中，这种行为也不常见”。

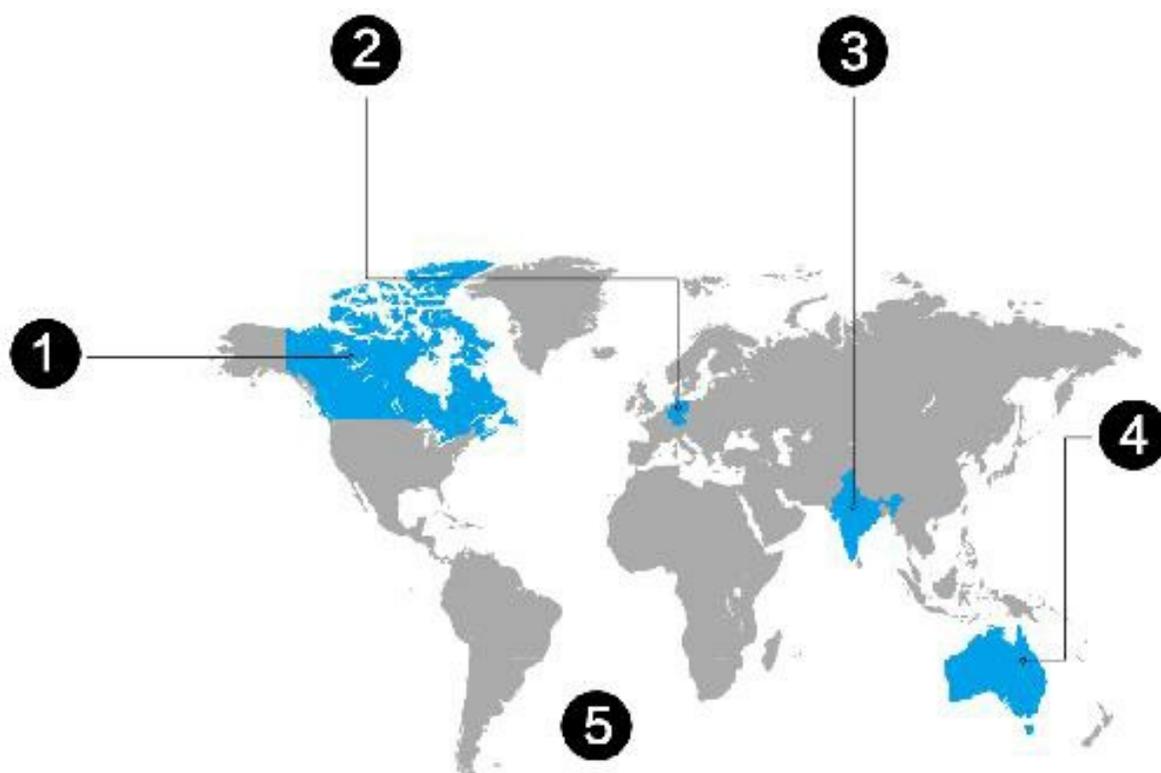
在后续实验中，研究人员对美洲豹和老虎也进行了类似的认知测试，结果发现，狮子的表现优于美洲豹和老虎。豹和老虎都是独居的大型猫科动物，因此这一实验结果进一步支持了社交智力假说。但是，博雷格也指出，栖息地环境、饮食结构等因素也都可能影响动物认知能力的演化。她说：“认知复杂性的演化本身就是一个复杂的问题。”

资料来源：柯布斯·斯考曼（Kobus Schoeman），Getty Images

简讯

全球科技热点

翻译 马骁骁



① 加拿大

加拿大总理贾斯汀·特鲁多（Justin Trudeau）宣布，碳排放的最低税额为每吨7.62美元。这个税收政策将于2018年开始实施，并将在2022年增至每吨38.11美元。

② 德国

阿尔斯通铁路公司（Alstom）推出了由氢燃料电池提供动力的火车。这辆载客量为300人的无排放火车最早将于2018年投入运行，最高时速可达140千米。

③ 印度

印度农民及环保主义者向政府提出请愿，抗议政府批准抗除草剂的转基因芥菜上市。抗议者担心这样的转基因作物只会有益于种子销售者，而且除草剂的大量使用可能会使负责人工除草的农民失去工作。芥菜或将成为印度的第一个转基因作物。

④ 澳大利亚

古生物学家在昆士兰发现了一个全新的恐龙物种——长颈蜥脚类恐龙（*Savannasaurus elliottorum*）。这种体长12~15米的蜥脚类恐龙，生活在大约9800万到9500万年前的陆地上。恐龙残骸在澳大利亚非常罕见，至今为止，古生物学家总共在这里发现了不到12具恐龙骨架及少量的单个骨头。

⑤ 南极洲

25个国家达成协议，在南极洲海岸建立全球最大的海洋自然保护区。该协议最早于2011年提出，保护区的面积覆盖了59.8万平方英里（约155万平方千米）的海域。

生物学

重新认识溶酶体

溶酶体不仅仅是细胞的垃圾处理站，还能控制细胞代谢，影响生物寿命。

撰文 莫尼克·布鲁耶特（Monique Brouillette） 翻译 颜磊

溶酶体曾被认为是细胞内的垃圾回收站，细胞碎片在那里被处理掉。不过越来越多的研究表明，这个包含多种酶的囊泡可能比预想的更活跃。一些科学家将溶酶体称为细胞代谢的控制中心，它内部发生的一系列化学反应，可使细胞更加健康并充满活力。加利福尼亚大学伯克利分校的细胞生物学家罗伯托·宗库（Roberto Zoncu）称：“过去十年间的发现已经表明，溶酶体是一个决策中心，能影响细胞生长和存活。”他撰写的关于溶酶体新功能的综述已经发表在了2016年9月的《细胞生物学杂志》（*Journal of Cell Biology*）上。

大部分高中课本告诉我们，溶酶体负责废物处理和回收。在名为“自噬”（意为吃掉自己）的过程中，溶酶体会吸收老旧细胞组分和不需要的大分子，如蛋白质、核酸和糖，并在酶和酸的协助下分解它们。细胞可以把这些碎片当作能量来源或是构筑新分子的原料。理解自噬过程非常重要，大隅良典（Yoshinori Ohsumi）就因上世纪90年代在这方面做出重要贡献，而获得2016年诺贝尔生理学或医学奖。不过，这并不是溶酶体的全部功能。

例如，一项尚在进行的研究表明，溶酶体能够感知细胞（及更大生命体）的营养状况。当一个生物处于禁食或饥饿状态时，该细胞器会促使细胞产生更多溶酶体，这些溶酶体内含有的酶能消化体内脂肪，从而为生物体提供能量；与此相反，当生物营养充足时，溶酶体会向细胞发出信号，表明现在的营养物质可用于生长和繁殖。安德里亚·巴拉比奥（Andrea Ballabio）是意大利泰勒桑基因和医学研究所（Telethon Institute of Genetics and Medicine）的遗传学家，研究方向是溶酶体对健

康的作用，他认为溶酶体是控制细胞分解或合成物质的主要开关。

由于溶酶体能控制脂肪代谢，美国弗吉尼亚大学的生物学家埃伊伦·奥鲁尔克（Eyleen O'Rourke）预言，未来，溶酶体或许会成为治疗肥胖等代谢疾病的靶点。

除了能够控制细胞的代谢，研究人员发现，溶酶体还有可能影响生物寿命的长短。

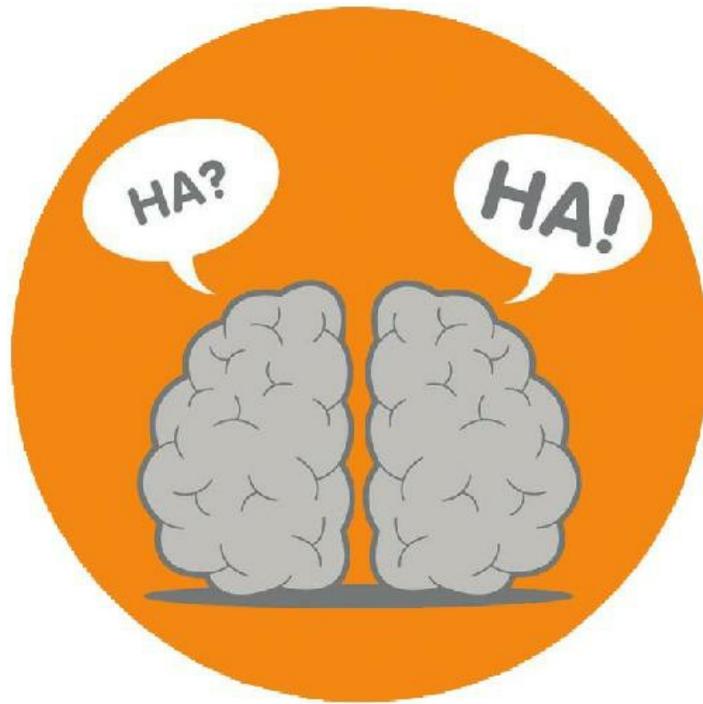
已有研究表明，如果溶酶体不能正常工作，生物体就不会活太久，这可能是由于细胞碎片和其他废物的堆积。纽约大学的研究人员发现，一个溶酶体基因的缺陷会加速阿尔茨海默病的进程。一些科学家据此认为，溶酶体可能是神经退行性疾病的罪魁祸首。凡此种种都清楚地表明，溶酶体不单单是细胞内的垃圾终结者，相反，它们可能是通向新一代药物的大门。

神经科学

大脑如何感受幽默

处理幽默信息时，行使不同功能的大脑的左右半球必须通力合作，才能形成最后的喜剧二重唱。

撰文 罗尼·雅各布森（Roni Jacobson） 翻译 张文韬



制图：托马斯·富克斯（Thomas Fuchs）

在喜剧中使用双关语，历来有争议。评论家认为这是“最低等的智力形式”，这个论述被很多作者引用。但是，也有不少人喜欢使用双关语，包括莎士比亚。在最近的一项研究中，研究人员发现大脑本身是把双关语分割处理的，相关研究发表在《偏侧性：身体、大脑和认知的不对称性》（*Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*）杂志上。研究表明，在处理双关语时，大脑的左右半球行使不同功能，最终

需要互相“交流”才能真正理解幽默之意。

为了搞清楚大脑是如何理解双关语的，加拿大温莎大学的研究人员先在受试者的左侧视野或右侧视野（分别对应着右脑和左脑）展示一个与双关语有关的词。然后，研究人员分析了每种情况下受试者的反应时间，确定哪一侧大脑在其中起主要作用。论文作者之一、心理学教授洛丽·布坎南（Lori Buchanan）解释说，左侧大脑是语言半球，所以它负责处理双关语的本意，稍后右侧半球才领会到这个词的言外之意。

大脑半球之间的互动让我们理解了这些双关语的笑点。作为一种文字游戏，双关语具有幽默的基本要素：预期和不一致性产生了幽默。双关语有多重含义，人们首先用左半球结合上下文做出特定的解释，右半球随后引导人们发现另一层意想不到的意义，触发布坎南所说的“令人惊讶的重新解释”，幽默就出现了。

这项研究与早前的一些观察结果一致，一些大脑右侧受伤的人会变得很没有幽默感，他们知道笑话的意思，“但是并不觉得滑稽可笑”，布坎南说。她希望这方面的研究能发展出一些康复疗法，帮助这些人找回幽默感。毕竟，幽默的双关语能使人神经放松。

新技术

浪涌电压保护器

丹麦一家高电压实验室正在研究如何保护风力发电机免遭雷击。

撰文 卡尔·J·P·史密斯（Karl J. P. Smith） 翻译 林清



左图：霍尔伯尔和高压放电器球隙避雷器合影

右图：40万伏单相变压器

图片来源：阿尔斯泰尔·菲利普·威帕（Alastair Philip Wiper）

风力发电机非常容易被闪电击中，如果这些高空旋转的庞然大物遭到雷击，无疑将是一场灾难，结果就是叶片爆炸，发电机和控制系统元器件烧毁。如何才能安全避开雷电，为找到解决方案，风力发电机制造商将目光投向了丹麦科技大学的高电压实验室（High Voltage Lab）。该实验室通过应用标准电气设备（如放电器球隙避雷器、变压器和电容器）的巨型版本，就可以产生巨大电弧——高达80万伏的交流电。利用该设备，制造商可以现场测试新涡轮部件或机械对电涌的反应。

“许多高电压实验室看起来和上世纪60年代的实验室有几分相像，”丹麦科技大学电力和能源中心（Center for Electric Power and Energy）教授、副主管乔基姆·霍尔伯尔（Joachim Holbøll）说，“但我们通过应用最新的设备，在现场开展工作时得心应手。设备有些地方看起来有点老式，但这只是因为它的确能派上用场。”

同时，实验室还试图解决一个新问题：风力发电机所处的位置太高，经常会触发“上行闪电”。这种类型的闪电是发电机自身的电场造成的，当叶片末梢触发到下行的闪电时就会产生。霍尔伯尔认为，闪电的方向不会改变发电机所需保护的形式。但了解这些，对模拟风力发电场遭受雷击的频率至关重要。现在，高电压实验室正通过理论论证和计算机建模，验证这一现象。2015年，风能为丹麦提供了42%的电力。

化学

铜让硫醇更臭

依附在鼻黏液内的铜微粒会让含硫化合物的气味更刺鼻。

撰文 马克·安德森 (Mark Anderson) 翻译 李春艳



煤气、蒜、臭鼬都有一股难闻的硫醇味。人类的鼻子对此类含硫化合物总是非常敏感。当然这也不足为奇，毕竟它们所对应的往往是一些令人反感的事物。不过人类及其他哺乳动物的鼻子为什么对硫醇味这么敏感，而对其他味道（如漂白剂和醋的味道）却没这么敏感，必须要在这些气味分子的浓度更高时才能闻到呢？

一个由美国和中国化学家组成的团队发现，动物对硫醇味的高度敏感主要源于金属铜。在2016年秋季发表于《美国化学会杂志》（*Journal of the American Chemical Society*）的一篇论文中，研究人员指出，鼻子

中接收这些难闻气味分子的嗅觉感受器，还会与依附在鼻黏液中的铜微粒结合。而这一“金属伙伴”可将硫醇的气味增强1000倍。实验中，化学家们还制造了不能与铜结合的硫醇嗅觉感受器，结果对硫醇味的高度敏感完全消失了。

从演化角度而言，拥有能闻到极低浓度硫醇的鼻子是有好处的，美国纽约州立大学奥尔巴尼分校的化学家、上述论文作者之一埃里克·布洛克（Eric Block）说。比如，腐烂的食物会释放含硫化合物，一些食肉动物也会散发这种气味。

耶鲁大学的化学家罗伯特·克拉布特里（Robert Crabtree）早在1977年就开始猜测，铜与硫醇的嗅阈值有关，他表示，让金属与嗅觉有了联系，这一研究可谓开创了先河，新发现或许会促使更多有志探索嗅觉奥秘的科学家，寻找此类“金属伙伴”。

环境

中国五城市空气污染状况调查

通过对北京等五城市PM2.5数据的统计学分析，研究人员找出了各地环境问题的症结。

本刊记者 吴非



近年来，全国各地对空气污染（尤其是PM2.5，即直径小于2.5微米的可吸入微粒）的关注度与日俱增。北京大学光华管理学院陈松蹊教授的团队对北京、上海、广州、沈阳和成都五座城市2013–2015年的PM2.5浓度数据以及气象数据进行了统计学分析，全面展现这五座城市的空气污染状况，并揭示了制约城市空气质量的因素。近日，该研究发表在《地球物理学研究杂志·大气》（*Journal of Geophysical Research Atmospheres*）期刊上。

在这项研究中，陈松蹊团队采用了各地美国使领馆的数据以及使领馆附近的环境保护部监测数据。

由于城市的PM2.5浓度受到污染物排放和气象因素双重作用，而气象因素具有不可控性，因此陈松蹊更希望找出污染物排放对PM2.5浓度的影响，并提出相应的解决策略。研究团队分析发现，风向、累积风速和降水量对PM2.5浓度均有显著影响。运用他们此前提出的统计方法，研究团队剔除了气象因素对PM2.5浓度的影响。

利用排除了气象因素的PM2.5浓度数据，陈松蹊团队对五城市的污染情况进行了系统的分析。在这五座城市中，广州与上海的PM2.5浓度相对较低，年度均值分别在每立方米40~50微克和每立方米50~60微克之间，但也高于每立方米35微克的国家空气质量标准。而另外三座城市面临的PM2.5污染状况要严重很多。北京的年度均值在五座城市中排名榜首，达到每立方米80~100微克。其90%分位数浓度更是远高于其他四座城市，这反映出北京的重度污染天气最为严重。而成都的中位数浓度在五座城市中是最高的，表明成都长期处于中度污染状态。

此外，研究团队分析了各城市年度平均指标的变化趋势。2015年，五城市的PM2.5浓度出现较为明显的下降。陈松蹊认为，导致空气质量有所改善的原因主要有二：政府实施了更严格的大气环境监管措施，且自2013 年以来中国的经济增速放缓。但该趋势能否在今年得到延续，陈松蹊表示，目前研究仍在进行之中。

进一步的分析揭示，导致北京、沈阳和成都污染困境的原因各不相同。辽宁的经济发展倚重于重工业，其煤炭和柴油消耗量与成渝地区相近，高于其他3座城市所在区域。此外，每年11月至次年3月的燃煤供暖使得沈阳冬季的空气质量雪上加霜。

与此相反，在这五座城市所在的区域中，成渝地区的各项能源消耗指标均处在较为靠后的位置，然而，成都仍长期处于中度污染状态，导致这一局面的是成都的先天劣势——地形条件。四川盆地由青藏高原、云贵高原、大巴山等高山环绕而成，因此盆地中产生的大气污染物难以扩散。

相比之下，北京所面临的空气问题更加复杂而严峻，这里几乎聚集了所有不利条件：北京所处的华北平原北靠燕山、西邻太行山，不利于污染物扩散；其次，华北地区的单位能源消耗量仅次于长三角地区，并且拥有大量重工业产业；此外，这项研究显示，北京具有十分显著的供

暖效应，这项因素共同导致了北京的高PM2.5浓度。

在陈松蹊看来，目前华北平原的空气污染状况本不应该如此严重。本世纪初，在北京获得2008年夏季奥运会的主办权后，首钢集团被搬迁至河北唐山。包括首钢在内，河北聚集了大量由首都迁来的重工业企业。管理者试图借此改善北京的空气质量，但是，“这些搬迁措施是缺乏远见的，”陈松蹊说，“在进行规划时，规划者没有考虑到污染物在华北平原半封闭地形中的积累。”最终的结果是，不仅北京的PM2.5浓度居高不下，华北平原更是成为中国空气污染最严重的区域。

“基于各地的地理环境和气象条件，每一座城市都有不同的能源消耗和工业活动承载的上限，”陈松蹊说，“在进行投资、布局时，都应该考虑并尊重各地的承载上限。”

2014年，陈松蹊首次将目光投向空气污染问题。运用统计学手段，研究团队已经发布了两份空气评估质量报告。目前，团队正在对京津冀地区多个站点的空气质量数据进行细致分析，研究报告预期于2017年春季出炉。

空气污染的治理和预防，注定是一场持久战。关于具体的时间，可能不同的学者有着不同的看法，但有两点是可以确定的：频繁出现的重度空气污染不会立即消失，它还将伴随我们很长一段时间；而决定倒计时要走多久，是我们的行动：大到政府的城市布局和工业监管，小到个人习惯，每一项导致空气污染的因素都需要被研究透彻，每一项控制污染的举措都不应被放过。

食品

烹调能降低含镉大米毒性

研究人员发现烹饪能降低大米和蔬菜中重金属的毒性。

本刊记者 廖红艳



制图：彼得·赫希（Peter Hirsch），Yale School of Forestry and Environmental Studies

20世纪30年代初，日本富山县曾出现一种怪病，刚开始人们只是劳动后感到腰背、关节痛，但几年后，疼痛开始遍及全身，骨骼也软化变形，变得脆弱易折。由于患者总是不停喊痛，日本医生把这种病因不明的病称为“痛痛病”。调查数年后才发现，怪病的源头，居然是当地人灌溉农田的神通川河。河上游的一家炼锌厂，排出的污水含有大量镉（Cd），通过食用稻米等作物，这些有毒的镉进入人体，富集下来，痛痛病实际就是典型的慢性镉中毒。

今天，对重金属污染造成的疾病，研究人员已经有深入了解，上世纪发生在日本的悲剧应该不会再重演。不过，值得警惕的是，随着工业化、城镇化加剧，我国一些地方的农耕地正受到重金属污染。如何减少重金属污染对人体健康造成的风险？中国科学院华南植物园副研究员庄萍认为，在短时间无法完成土壤治理的情况下，在食物链末端寻求有效方法，或许是一条捷径。为此，庄萍的研究团队，研究了烹饪对大米中镉、砷（As）和蔬菜中镉、铅（Pb）生物毒性的影响，相关研究分别发表在近期的《食物化学》（*Food Chemistry*）和《环境科学与污染研究》（*Environmental Science and Pollution Research*）杂志上。

庄萍和同事的研究对象是南方常见的长粒米，分别是普通市售镉未超标大米、粤北矿区附近土地上产出的镉超标大米和实验室种植的镉高污染大米（镉污染水平分别为低、中、高）。研究人员按中国人的习惯，以一份米、两份水（质量比）将生米煮成熟饭后，将米饭冷冻磨细，放入体外消化模型（PBET），模拟肠胃系统的消化过程，最后测出消化前后，重金属在大米样本以及消化残留物中的浓度，进而得出镉和砷的生物可给性（Bioaccessibility，在胃肠道消化过程中，污染物从基质，如土壤、食物等，释放到胃肠液中的量与总量的比值，表示基质中污染物可能被人体吸收的最大量）。结果表明，烹饪处理后，三种大米中镉和砷的生物可给性都有一定程度降低，且中、高污染水平大米中镉的生物可给性降低得尤为明显。

有意思的是，研究人员还惊喜地发现，对大米进行烹饪处理后，在最后剩余的、无法消化的残余物中，镉、砷的含量都有很大提升。“可能是因为，这部分镉和砷与一些膳食纤维（比如晶状纤维素中的微细纤维）结合，生成了某种复合物，所以很难被人体吸收，”研究人员在论文中表示，“对这些残余物进行深入研究，或许能揭示，食物消化时，重金属形态到底发生了怎样的改变，从而可以找出降低污染物毒性的方

法。”

既然水煮大米能产生一定效果，那多加些水是不是效果会更好？为了验证这个猜想，研究人员又以1:4和1:6的米水比重复了上述试验，结果发现，溶于沸水的镉非常少，加水并不能改变米饭中镉的生物可给性，但对降低大米中砷的生物可给性有一定作用。

“在中国、日本、孟加拉和印度的一些地区，大米在居民食谱中有着不可替代的地位。而相比其他农作物，镉和无机砷又更容易在稻米中富集，”庄萍介绍说，“所以，在这些地区评估食用受污染大米可能造成的健康风险非常有必要”。

随后，研究人员又对6种蔬菜，分别是叶菜类的菠菜、生菜，果实类的西红柿、黄瓜，以及根菜类的土豆、胡萝卜，分别进行体外消化试验，并检测了其中镉、铅的浓度变化。全部270份蔬菜样本，都是从珠江三角洲9个城市的超市和地摊中随机选取的。按照叶菜类和果实类煮8分钟，根菜类煮12分钟的标准，研究人员对蔬菜进行了烹饪试验，结果发现，对于不同蔬菜品种中的重金属污染物，烹饪产生的效果并不相同，总体来说，水煮对叶菜类蔬菜影响比较大，叶菜中镉、铅的浓度和生物可给性均有显著下降；但对果实类和根菜类蔬菜则影响不明显。

好消息是，检测结果表明，所有蔬菜样本中的镉、铅含量，都在安全范围内。相对而言，粤北矿区附近土地上产出的大米，污染水平已经超出了国家标准，长期食用这种中度污染水平的大米，会造成健康风险。当然，除了考虑污染水平及食用量，不同群体对重金属的吸收水平也可能不同，比如，与成人相比，儿童的风险一般都会更高。此外，个体营养水平、肠道环境、膳食纤维、肠道菌群、重金属形态等，都可能影响人体吸收。

研究人员希望，在坚持土壤治理的同时，一方面，在食物链过程中寻求重金属的解毒机制，另一方面，在食物链末端，寻找实用有效的减少重金属生物毒性的策略，实质性减少污染区居民的健康风险。“传统的日常饮食方法是烹调、食物搭配等，”庄萍说，“下一步，我们将探讨食物搭配或营养素调剂等。”

深度

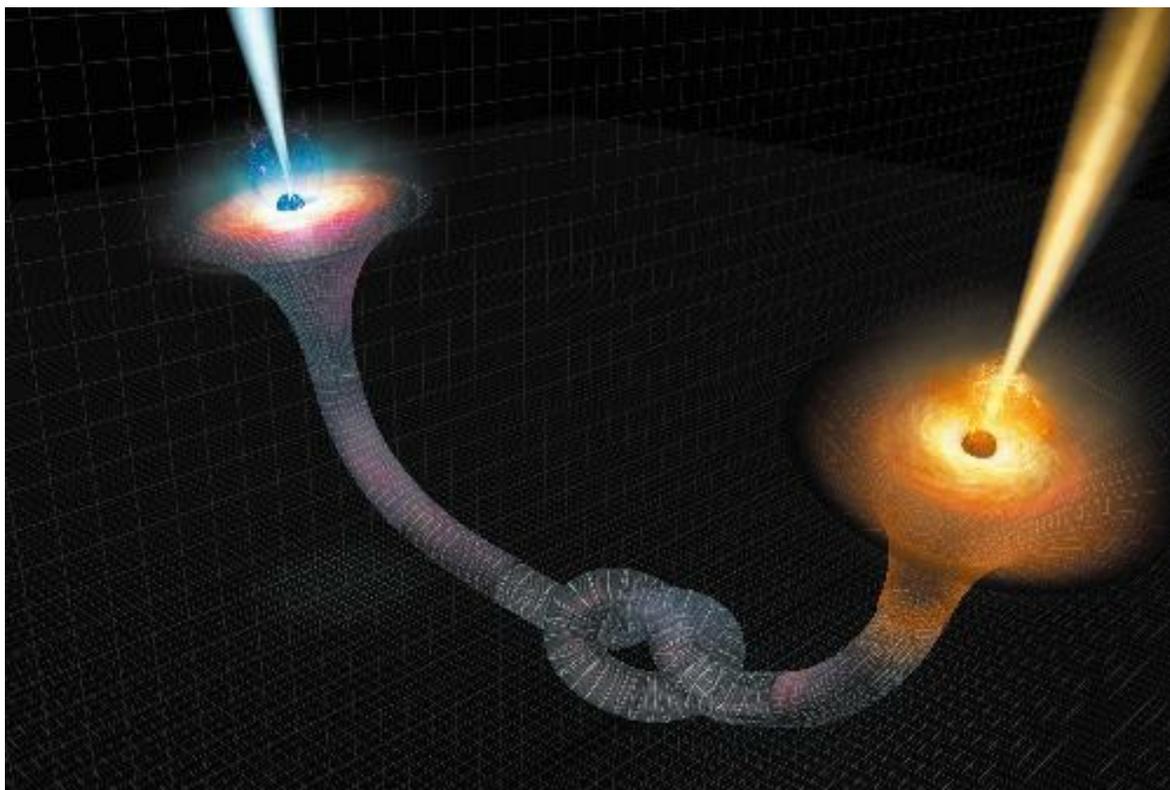
责任编辑：韩晶晶

封面故事 COVER STORY

量子纠缠创造了虫洞

量子纠缠和虫洞这两种看似毫不相关的奇异物理现象可能在本质上是一回事。

撰文 胡安·马尔达西纳（Juan Maldacena） 翻译 王少江 审校 蔡荣根





胡安·马尔达西纳是美国普林斯顿高等研究院的理论物理学家，在量子引力和弦论研究上做出了重要贡献，并在2012年荣获了基础物理突破奖（Breakthrough Prize in Fundamental Physics）。

精彩速览

量子物理学定律允许相距遥远的物体互相纠缠，从而互相影响，即使它们没有物理联系。

描述时空几何结构的相对论方程允许虫洞存在，即连接相距遥远的两个时空区域的捷径。

物理学家提出，这两种现象可能是等价的，而且这种等价性可以为时空的量子化描述提供线索。

理论物理充满了令人难以置信的想法，但是其中最诡异的两个还要数量子纠缠和虫洞。前者由量子力学理论预言，是指两个没有明显物理联系的物体（通常是原子或亚原子粒子）之间存在一种令人惊异的关联。而虫洞由广义相对论预言，是连接时空里相距遥远的两个区域的捷径。最近，包括我在内的几位理论物理学家的研究暗示，这两个看起来截然不同的概念之间存在联系。基于对黑洞的计算，我们意识到量子力学的纠缠和广义相对论的虫洞或许在本质上是等价的，是同一个现象的不同描述，而且我们相信，这种相似性同样适用于黑洞以外的场合。

这种等价关系会带来深远的影响。这说明，宇宙中还存在更基本的微观成分，而时空本身则是从这些成分间的纠缠中呈展（emerge）出

来。还有一点，尽管科学家一直认为纠缠物体之间没有物理联系，但它们可能实际上是通过某种方式连在一起的，而且这种方式远没有我们认为的那般奇异。

此外，纠缠和虫洞的这种联系可能还有助于建立一个量子力学和时空的统一理论——物理学家称之为量子引力理论，它能从原子和亚原子领域的相互作用定律中导出宏观宇宙的物理规律。这样一个理论对于理解宇宙大爆炸和黑洞内部是必要的。

有趣的是，量子纠缠和虫洞都能追溯到由爱因斯坦及其合作者们在1935年所写的两篇文章。表面上看来，两篇文章是在处理完全不同的现象，而爱因斯坦可能从未想到它们之间竟然存在着某种联系。事实上，纠缠这个量子力学的特性曾经让爱因斯坦无比烦恼，还被他称为“幽灵般的超距作用”。但讽刺的是，它如今可能为爱因斯坦的相对论提供桥梁，使其延伸到量子领域。

黑洞和虫洞

为了解释我为什么认为量子纠缠和虫洞会联系到一起，我先得描述黑洞的几个性质，这些性质与我的想法密切相关。黑洞是弯曲的时空区域，与我们所熟知的、相对而言未被扭曲的空间非常不一样。黑洞的一个显著特征是我们能够将它的几何结构分隔为两个区域：一个是空间被弯曲，但物体和信息仍能逃离的外部区域；一个是物质和信息进去之后就再也无法出来的内部区域。内部和外部被一个名为“事件视界”的表面分隔开来。广义相对论告诉我们，视界只是一个想象出来的表面，当一个宇航员穿越视界的时候并不会在那里感到任何异样。但是一旦穿过它，这个空间旅行者将注定被挤压进一个有着巨大曲率且无法逃离的区域。（事实上，黑洞内部相对外部而言实际上是在未来，所以旅行者无法逃离，因为他无法穿越回过去。）

在爱因斯坦提出广义相对论仅仅一年后，德国物理学家卡尔·史瓦西（Karl Schwarzschild）找到了爱因斯坦方程的一个最简单的解，描述了日后被称为黑洞的天体。史瓦西计算出的时空几何结构是如此的出人意料，以至于科学家直到20世纪60年代才真正理解到，这个结构描述的其实是连接两个黑洞的虫洞。从外部看，两个黑洞是相距很远的两个独立实体，然而它们共有一个内部区域。

在1935年的论文中，爱因斯坦和他的合作者内森·罗森（Nathan Rosen，当时也在普林斯顿高等研究院）预料到，这个共有的内部其实是某种虫洞（虽然他们没有完全理解虫洞所代表的几何结构），因此虫洞也被称为“爱因斯坦-罗森桥”。

史瓦西的虫洞解与宇宙中自然形成的黑洞不同的地方在于，前者不包含物质，仅仅是弯曲的时空。因为有物质存在，自然形成的黑洞只有一个外部区域，而大多数研究者认为一个完整的史瓦西解有两个外部区域，因此这个解是一个与宇宙中的真实黑洞无关的有趣数学结果。但不管怎样，它都是一个有趣的解，物理学家对它的物理解释也很好奇。

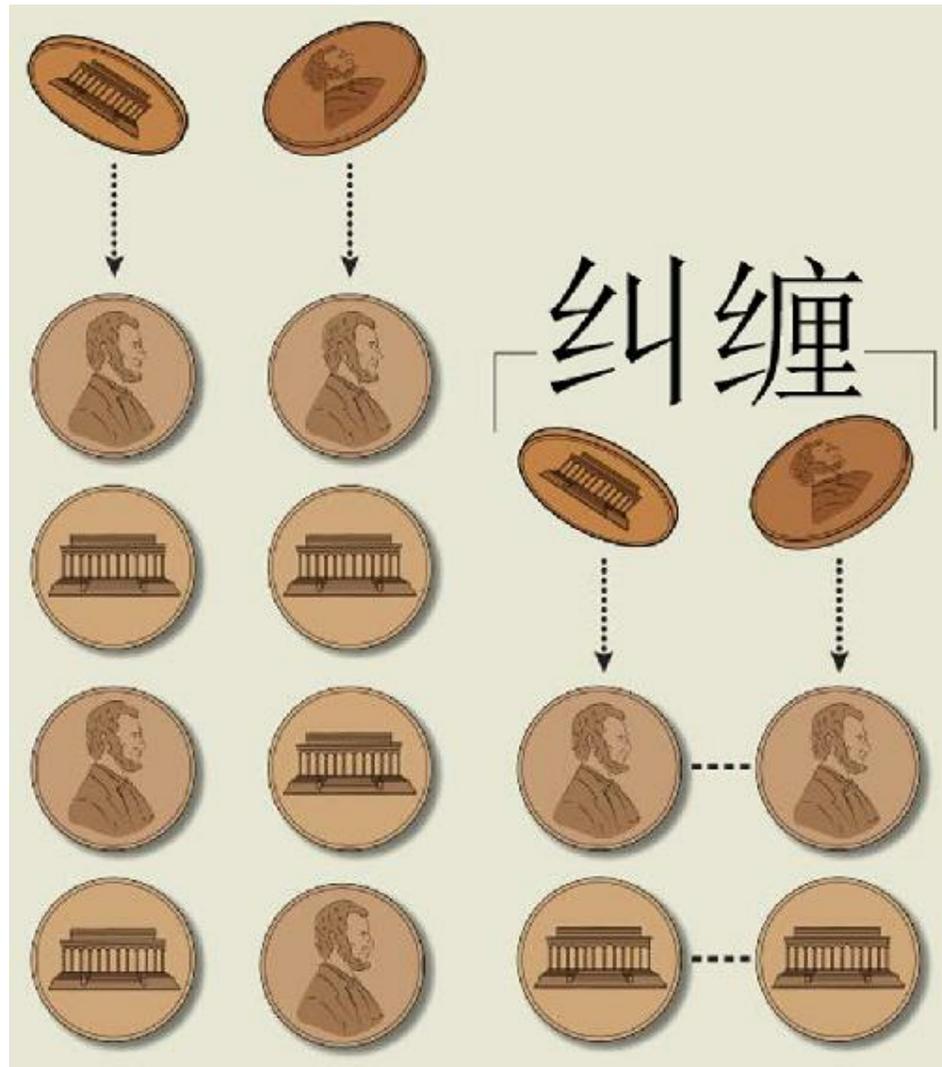
史瓦西解告诉我们，连接两个黑洞外部区域的虫洞是随时间变化的：随着时间流逝变长变细，就像把面团拉成面条。同时，在某一点交汇的两个黑洞的视界将迅速分离。事实上，它们分开得如此迅速，以至于我们无法利用这样一个虫洞从一个外部区域旅行到另一个外部区域。换句话说，我们可以说这座桥在我们穿过前就已经坍塌了。在面团拉伸的类比中，桥的坍塌对应于面团被拉伸成面条后，变得无限细。

要着重指出的是，我们所讨论的虫洞与广义相对论中不允许超光速旅行的定律是相容的，在这一点上是不同于科幻作品中的那些虫洞的。在科幻电影中，那些虫洞允许在空间中相距遥远的区域之间瞬时传送，比如电影《星际穿越》中的情节。科幻作品经常违反已知的物理定律。

如果一部科幻小说写到了像我们所说的这种虫洞，那么小说描述的场景就会像下面这样。假设有一对年轻的情侣罗密欧（Romeo）和朱丽叶（Juliet）。他们两边的家庭都反对他们在一起，所以将罗密欧和朱丽叶送到不同的星系，禁止他们旅行。然而这对情侣非常聪明地造出了一个虫洞。从外部看，虫洞看起来像一对黑洞，一个在罗密欧所处的星系，另一个在朱丽叶所处的星系。这对情侣决定跳入他们各自的黑洞。现在，对他们的家庭而言，他们就是跳入黑洞殉情了，永远不会再有消息了。然而外部世界所不知道的是，虫洞的时空几何结构允许罗密欧和朱丽叶在共有的内部区域相遇。因此，他们能够幸福地相处一段时间，直到桥坍塌并摧毁内部区域，从而将他们都杀死。

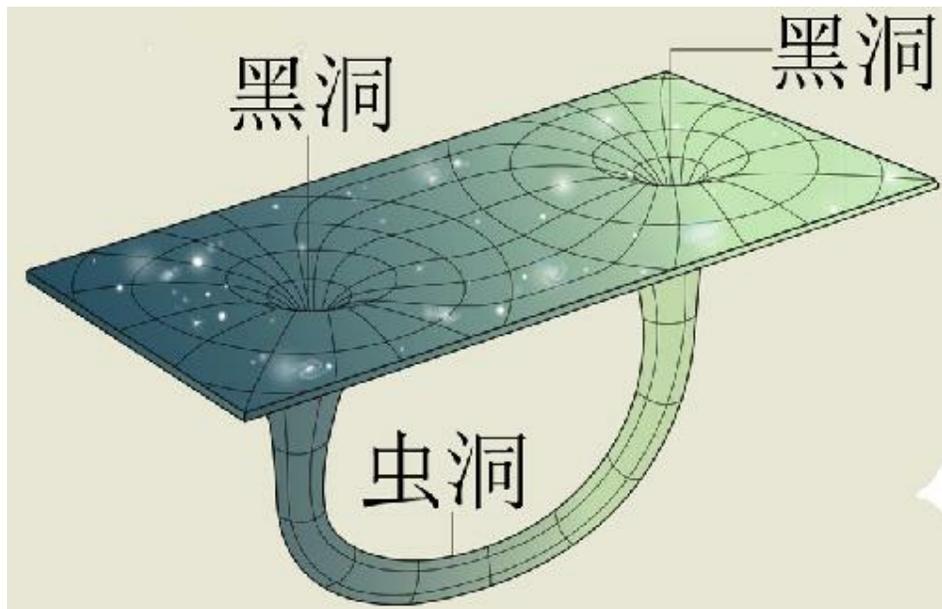
当纠缠遇见虫洞

纠缠是一个来自量子力学的概念，它描述的是相距遥远的两个物体之间的一种特殊关联。虫洞则是广义相对论预言的一座理论上存在的桥，它在时空中连接着两个相距遥远的黑洞。物理学家现在认为这两个现象虽然看起来不相关，却可能从根本上是联系在一起的。



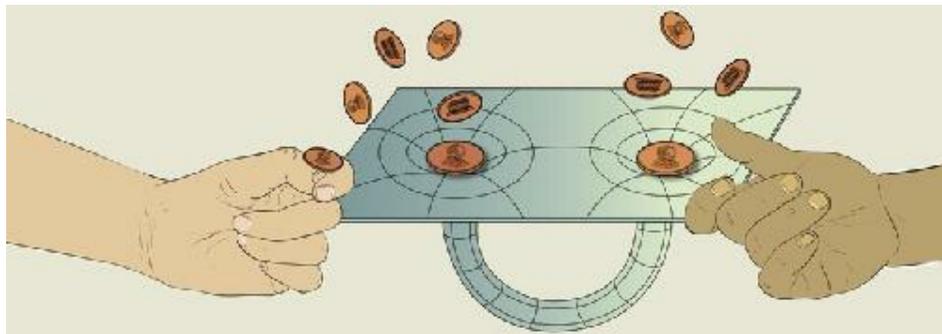
1 纠缠

扔出两个普通的硬币时，其中一个的结果对另一个没有影响——任何组合都可能出现。然而如果两个硬币是纠缠的，那么扔出第一个硬币就决定了第二个硬币的结果。比如说如果第一个结果是正面，那么第二个必须是正面，而如果第一个是背面，第二个一定也是。



2 虫洞

广义相对论的方程暗示虫洞能够在时空中架起一座桥，从而把两个黑洞连接起来，即使它们相距遥远。从外部看，两个黑洞是独立的个体，但是它们共用着连接它们的内部。然而没有人或者信号可以从其中穿过。



3 本质相同

如果两个黑洞相互纠缠，那么第一个黑洞内部所有的微观组分将与第二个黑洞的组分关联。如果是这样的话，科学家意识到黑洞将形成一种经由虫洞连接两者内部的时空结构。这个发现暗示虫洞和纠缠其实是等价的。

量子纠缠

1935年的另外一篇论文讨论了另一个我们感兴趣的现象——纠缠，

这篇论文是爱因斯坦、罗森和鲍里斯·波多尔斯基（Boris Podolsky，当时也在普林斯顿高等研究院）合作撰写的。也正是因为这篇论文，三位作者被合称为EPR。在这篇著名的论文中，他们提出，量子力学允许相距遥远的物体之间存在某种奇特的关联，即纠缠。

相距遥远的物体之间的关联也可以出现在经典物理中。想象一下，例如你把一只手套忘在家里，只带了一只出门。在查看口袋前，你并不知道自己带的是左手手套还是右手那只。而一旦你看到带的是右手那只，你马上就能知道落在家里的那只是左手的。但是，纠缠牵涉的是另一种截然不同的关联，这种关联只存在于由量子力学支配的物理量之间，而这些量遵守海森堡不确定性原理。这一原理断言，存在一些成对的物理量，我们不能同时精确地知道它们的值。最著名的例子就是一个粒子的位置和速度：如果我们精确地测量到它的位置，那么它的速度将变得不确定，反之亦然。EPR想知道，如果我们测量一对相距遥远的粒子各自的位置或者速度，那么会发生什么。

EPR所分析的例子涉及两个相同质量的粒子，在一个单一的维度上运动。不妨称呼这两个粒子为R和J，因为我们可以想象它们是罗密欧和朱丽叶测量的两个粒子。我们以某种方式制备这对粒子，使得它们的质心有一个定义明确的位置，我们把它叫做 x_{cm} ，等于 x_R （R粒子的位置）加上 x_J （J粒子的位置）。我们可以要求质心位置等于零，也就是说，我们可以说这两个粒子总是处在与原点等距离的位置上。我们让这两个粒子的相对速度 v_{rel} 等于R粒子的速度（ v_R ）减去J粒子的速度（ v_J ），并取一个精确的值，比如，让 v_{rel} 等于某个我们称作 v_0 的数值。换句话说，两个粒子的速度差保持不变。这里我们虽然同时精确地指定了位置和速度，但针对的不是同一个物体，所以并不违反海森堡不确定性原理。如果我们有二个不同的粒子，那么，尽管我们不能同时精确地知道第一个粒子的位置和它的速度，但我们完全可以确定第一个粒子的位置和第二个粒子的速度。类似的，一旦我们知道了两个粒子质心的精确位置，那么我们就不能确定质心的速度，但我们还是可以确定两个粒子的相对速度。

现在我们进入最精彩的部分，这同时也是量子纠缠让人感到不可思议的地方。试想，我们的两个粒子相距遥远，然后两个同样相距遥远的观测者，罗密欧和朱丽叶，决定去测量粒子的位置。现在，由于上述制

备粒子的方式，如果朱丽叶确定 x_J 等于某个特定值，罗密欧将发现他的粒子的位置正好是朱丽叶那个粒子的位置的负值（ $x_R = -x_J$ ）。需要注意的是，朱丽叶的结果是随机的：她的粒子的位置将随着每次测量而变化。然而，罗密欧的结果则完全由朱丽叶的结果所确定。现在假设，他们都测量了各自粒子的速度。如果朱丽叶得到一个具体值 v_J ，那么罗密欧肯定会发现他所测得的速度是朱丽叶的值加上相对速度（ $v_R = v_J + v_0$ ）。再一次，罗密欧的结果是由朱丽叶的结果完全决定的。当然，罗密欧和朱丽叶可以自由选择测量哪个量。特别是，如果朱丽叶测量的是位置而罗密欧测量的是速度，那么他们的结果将是随机的而不呈现任何关联。

奇特的是，即使罗密欧对粒子位置和速度的测量受到了海森堡不确定性原理的限制，如果朱丽叶决定测量她的粒子的位置，那么一旦罗密欧获知了朱丽叶的测量结果，他的粒子也将有完全确定的位置。而且同样的事情也会出现在速度上。看起来仿佛一旦朱丽叶测量了位置，罗密欧的粒子就立即“知道”它必须有一个定义明确的位置和一个不确定的速度，反过来如果朱丽叶测量了速度，罗密欧的粒子就会有确定的速度和不确定的位置。初看起来，这种情况好像允许一种信息的即时传送：朱丽叶可以测量她的粒子的位置，而罗密欧就将看到他的粒子有一个确定的位置，由此推断朱丽叶选择测量的物理量是位置。然而，在不知道朱丽叶所测位置的实际值的情况下，罗密欧不会意识到他的粒子有了确定的位置。所以实际上量子纠缠所造成的关联并不能用来超光速传递信号。

虽然已经在实验中得到证实，但纠缠看起来仍然只是量子系统一个深奥难懂的特性。不过，在过去的二十多年里，这些量子关联已经促使加密技术和量子计算等领域产生了许多实际应用和突破。

虫洞等于纠缠

那么，我们是怎样把两个截然不同的奇异现象——虫洞和纠缠——联系到一起的呢？对黑洞的深度思考引领我们走向了这个问题。1974年，斯蒂芬·霍金（Stephen Hawking）发现量子效应将导致黑洞像热物体一样辐射，证明了没有任何东西能从黑洞逃离的传统观点实在是过于简化了。黑洞辐射的事实暗示它们具有温度——这一点有着非常重要的

意义。

自从19世纪以来，物理学家就知道温度源自一个系统中微观组分的运动。例如，在气体里，温度来自分子的随机运动。因此，如果黑洞有温度，那么它们就应该也有某种微观组分，这些组分可以具有各种不同的组态，即所谓的微观态。我们也相信，至少从外部看来，黑洞应该表现得像一个量子系统，也就是说，它们应该遵循所有量子力学的定律。总之，当我们从外部看黑洞，我们应该发现一个拥有许多微观态的体系，而黑洞处于每一个微观态的概率都是均等的。

因为黑洞从外部看就像通常的量子体系，那么我们完全可以认为一对黑洞可以相互纠缠。假设有一对相距遥远的黑洞，每一个黑洞都有很多种可能的微观量子态。现在想象一对纠缠的黑洞，其中第一个黑洞的每一个量子态都与第二个黑洞的对应量子态关联。特别是，如果我们测量到第一个黑洞处于某个特定的状态，那么另一个黑洞必须正好处于相同的状态。

有趣的是，基于弦论（一种量子引力理论）的特定考量，我们认为，一对微观态以这种方式（即所谓EPR纠缠态）纠缠的黑洞将产生这样一种时空结构：有一个虫洞将两个黑洞内部连接起来。换句话说，量子纠缠在两个黑洞之间创造了一个几何连接。这个结果是令人惊讶的，因为我们过去认为纠缠是一种没有物理联系的关联。但是，这种情况下的两个黑洞却通过它们的内部产生了物理联系，通过虫洞相互接近了。

我和美国斯坦福大学的伦纳德·萨斯坎德（Leonard Susskind）将虫洞和纠缠的这种等价性称作“ER=EPR”，因为它把爱因斯坦和他的合作者在1935年所写的两篇文章联系在了一起。从EPR的角度看，在每个黑洞视界附近进行的观测是彼此关联的，因为两个黑洞处于量子纠缠态。从ER的角度看，这些观测是关联的，因为两个系统经由虫洞连接。

现在回到我们关于罗密欧和朱丽叶的科幻故事，让我们看看这对情侣应该做些什么来制造一对纠缠的黑洞以产生虫洞。首先，他们需要产生大量纠缠的粒子对，就像之前所讨论的那样，罗密欧拥有每个纠缠对中的一个粒子而朱丽叶拥有另一个。然后，他们需要制造非常复杂的量子计算机以操纵他们各自的量子粒子，再以一种可控的方式把这些粒子组合起来，形成一对纠缠的黑洞。要完成这样一个壮举将是极其困难

的，但根据物理定律，要做到这一点是有可能的。另外，我们之前确实说过罗密欧和朱丽叶是非常聪明的。

从黑洞到微观粒子

将我们引导至此的理论是许多研究者历经多年建立起来的，它始于维尔纳·伊斯雷尔（Werner Israel）在1976年发表的一篇文章，当时他任职于加拿大阿尔伯塔大学。2006年，笠真生（Shinsei Ryu）和高柳匡（Tadashi Takayanagi）发表了关于纠缠和时空几何之间的联系的有趣研究，他们当时都在加利福尼亚大学圣巴巴拉分校工作。我和萨斯坎德则受到了2012年一篇论文的启发，这篇论文是由艾哈迈德·艾勒穆海里（Ahmed Almheiri）、唐纳德·马洛尔夫（Donald Marolf）、约瑟夫·波尔金斯基（Joseph Polchinski）和詹姆斯·萨利（James Sully）共同撰写的，他们当时也在加利福尼亚大学圣巴巴拉分校。他们发现了一个佯谬，与纠缠的黑洞内部的本质有关，而ER=EPR理论（黑洞内部是连接另一个系统的虫洞的一部分）则可以在某些方面缓和这个佯谬。

虽然我们是通过黑洞发现了虫洞和纠缠态之间的联系，但我们不禁要猜测，这种联系可能并不局限于黑洞这种情况：只要存在纠缠，就一定有某种几何联系。即使是最简单的情况，即两个纠缠粒子，这种联系也应当成立。不过，在这种情况下，空间上的联系涉及了微小的量子结构，这些结构是无法用常规的几何概念来理解的。我们仍然不知道如何描述这些微观几何结构，但是这些结构的纠缠或许通过某种方式生成了时空本身。看起来，纠缠可以被看做是联系两个系统的引线（thread）。当纠缠增多时，就有了许多条引线，这些引线能够编织到一起从而形成时空结构。在这个图景中，爱因斯坦的相对论方程支配着这些引线的连接和重连；而量子力学不仅仅是引力的一个附件——它更是时空结构的本质。

目前，上述图景仍然是一个大胆的猜测，但有一些线索指向它，而且很多物理学家都在探寻它的含义。我们相信，看起来并不相关的纠缠和虫洞可能在事实上是等价的，而且这种等价性为发展量子时空理论以及统一广义相对论和量子力学提供了一个重要的线索。

本文译者 王少江是中国科学院理论物理研究所的博士生。

本文审校 蔡荣根是中国科学院理论物理研究所的研究员，主要研究领域是引力理论、宇宙学、

量子场论、超弦理论等。

扩展阅读

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen in Physical Review, Vol. 47, No. 10, pages 777–780; May 15, 1935. <http://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.47.777>

The Particle Problem in the General Theory of Relativity.

A. Einstein and N. Rosen in Physical Review, Vol. 48, No. 1, pages 73–77; July 1, 1935. <http://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.48.73>

Cool Horizons for Entangled Black Holes.

J. Maldacena and L. Susskind in Fortschritte der Physik, Vol. 61, No. 9, pages 781–811; September 2013. Preprint available at <http://arxiv.org/abs/1306.0533>

Burning Rings of Fire. Joseph Polchinski; December 2015.

深度

责任编辑：韩晶晶

封面故事 COVER STORY

虫洞研究简史

整理 韩晶晶

自从爱因斯坦的相对论预言了虫洞的存在后，全球的科学家和公众都着迷于这种奇异的空间结构，因为它能实现人类梦寐以求的时空旅行。但是，虫洞到底是什么？哪怕经过100年的研究，科学家依然无法揭开真相，甚至无法肯定虫洞到底存在与否。

1915年

爱因斯坦发表广义相对论。他指出引力实际上是时空弯曲的表现，物质会扭曲周围的时空，而弯曲的时空反过来又规定了物质的运动方式。广义相对论彻底革新了人类的时空观，也为物理学家研究奇特的时空结构奠定了基础。

1916年

奥地利物理学家路德维希·弗拉姆（Ludwig Flamm）在研究史瓦西解的时候发现，广义相对论还有另外一个解，描述了一个与黑洞正好相反的“白洞”，黑洞和白洞之间可以有一条时空通道，物质从黑洞进入，跨越时空从白洞中出来。

1916年

德国物理学家卡尔·史瓦西（Karl Schwarzschild）得出了广义相对论方程的最简单解——一个球对称、没有自转的物体周围的引力场。如果物体的半径小于史瓦西半径，这个解描述的就是一个黑洞。

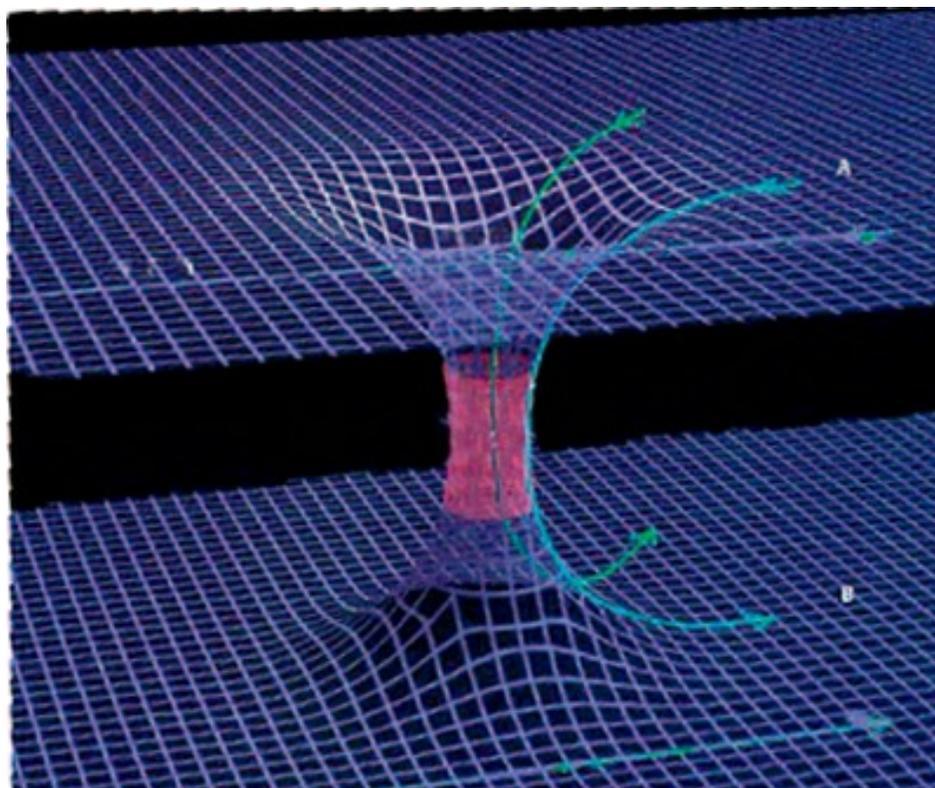


1921年

德国数学家赫尔曼·外尔（Hermann Weyl）在尝试用电磁场能量来分析质量的时候，提出了空间中可能存在连通不同区域的“一维管道”。这些管道内部不存在空间，其边界是无穷远的。

1935年

爱因斯坦与合作者内森·罗森（Nathan Rosen）为了消除史瓦西解中的奇点，得出了一个新的引力方程解，对应着一个连接着不同时空区域的通道，即“爱因斯坦-罗森桥”。



1957年

美国物理学家约翰·惠勒（John Wheeler）第一个使用了“虫洞”（Wormhole）这个名词，他尝试把物理学几何化，让电场线从虫洞的一个口进入，再从另一个口出来，从而不需任何电荷就显示出了如同一对正负电荷所产生的电场。



1962年

惠勒和美国物理学家罗伯特·W·富勒（Robert W. Fuller）发表论文指出，“爱因斯坦-罗森桥”这种虫洞是不稳定的，一旦形成就会立刻坍塌，即使是光也来不及从中通过，因此是不可穿越的。

1973年

美国数学家霍默·埃利斯（Homer Ellis）和俄罗斯物理学家K·A·布龙尼科夫（K. A. Bronnikov）分别独立提出，在某种与方向无关的力场

的作用下，视界和奇点都会消失，虫洞会变得可以穿越。

1985年

美国天文学家卡尔·萨根（Carl Sagan）出版了科幻小说《接触》（*Contact*）。在物理学家基普·索恩（Kip Thorne）的建议下，书中让主人公利用虫洞进行了跨越数十光年的星际旅行，来到织女星附近与外星智慧生命进行了接触。

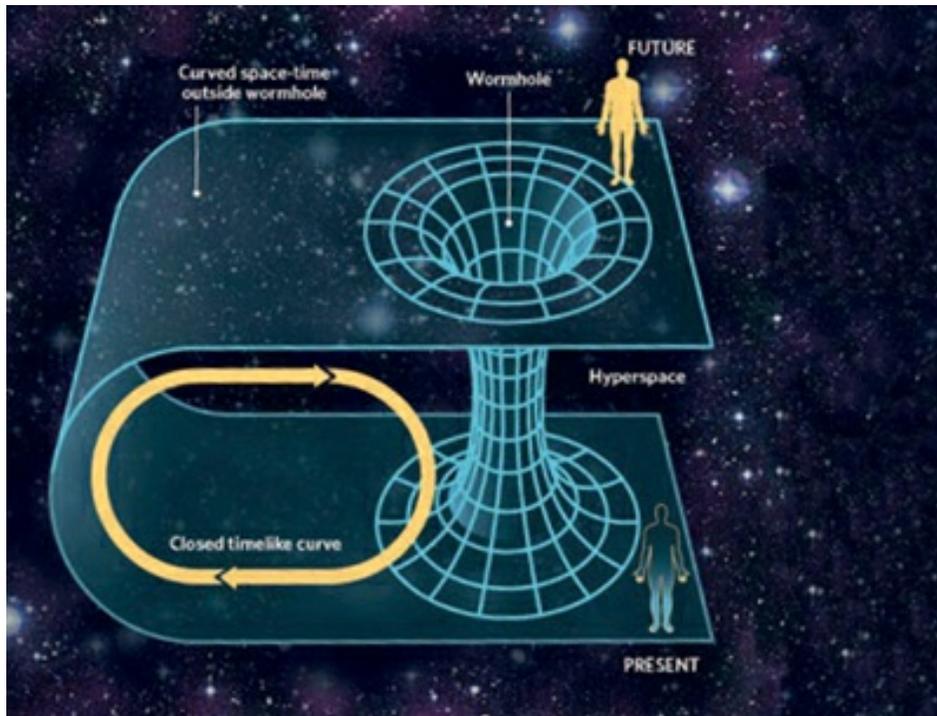
1987年

索恩与迈克尔·莫里斯（Michael Morris）发表论文，提出在具有负能量的“奇异物质”的支撑下，虫洞可以保持长时间稳定，甚至可以穿越。因此，在理论上这种虫洞可以成为星际旅行的工具。



1988年

索恩与莫里斯发表论文指出，可穿越虫洞不仅可以用来进行星际旅行，还可以成为时间机器，让人进行回到过去的时间旅行。他们推测在时空的量子“泡沫”中可能会出现微小的虫洞，极为先进的文明或许可以把这些虫洞放大后使用。



1989年

新西兰数学家马特·维瑟（Matt Visser）提出了几种与索恩的虫洞几何结构略有不同的虫洞。旅行者在穿越这类虫洞的时候，不会撞上维持虫洞的奇异物质。而且虫洞的“咽喉”处的时空还是平坦的，旅行者不会被极强的引力撕碎。



1991年

西班牙物理学家戴维·霍赫贝格（David Hochberg）和托马斯·W·凯法特（Thomas W. Kephart）提出，引力本身可以自发地创造出“压缩真空”区域，性质相当于负能量，这意味着虫洞可以天然形成，尤其是在宇宙大爆炸期间。

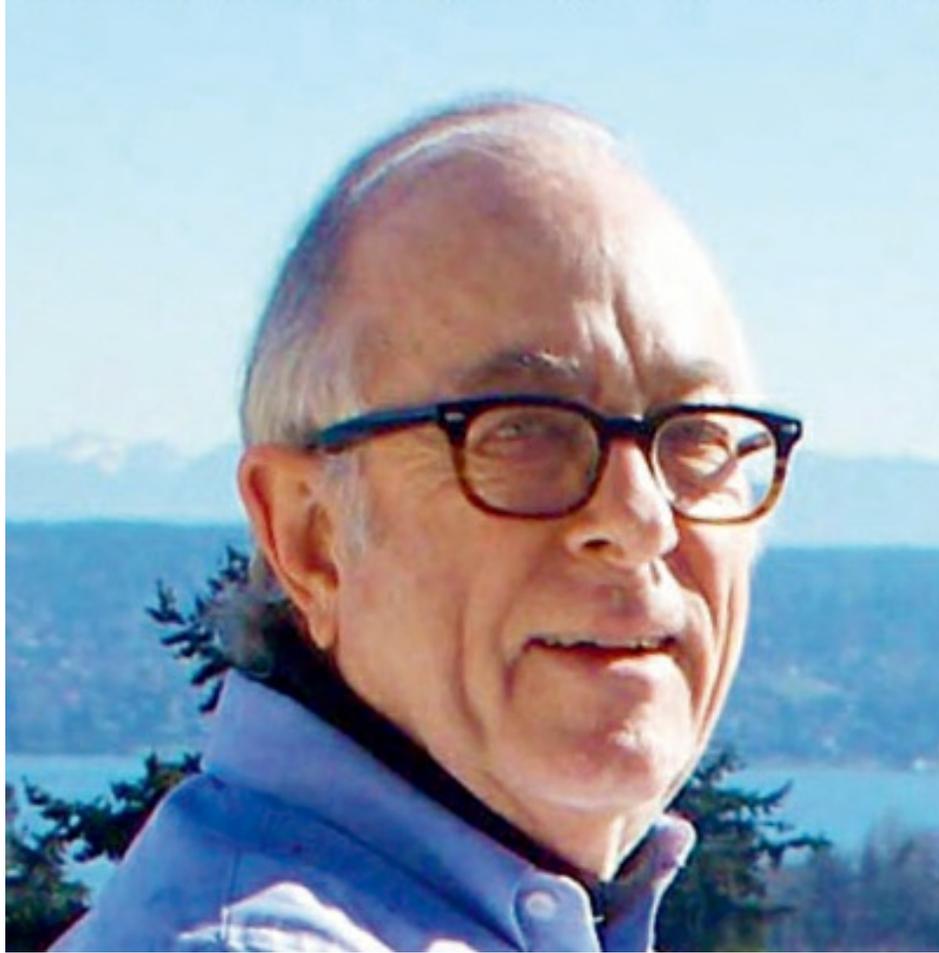
1992年

斯蒂芬·霍金提出时序保护假说，认为一定有某种物理机制会阻止时间旅行。美国物理学家罗伯特·瓦尔德（Robert Wald）和罗伯特·格罗赫（Robert Geroch）指出，虫洞如果用于穿越时间，一束通过虫洞的光就可以不断循环积累，瞬间让能量增加到无穷大从而把虫洞摧毁。



1995年

维瑟和美国物理学家约翰·克拉默（John G. Cramer）提出，在宇宙大爆炸时形成的虫洞，会在暴胀阶段被拉大。变大了的虫洞会在星系形成后积累在星系晕中，或许可以通过引力透镜效应被探测到。

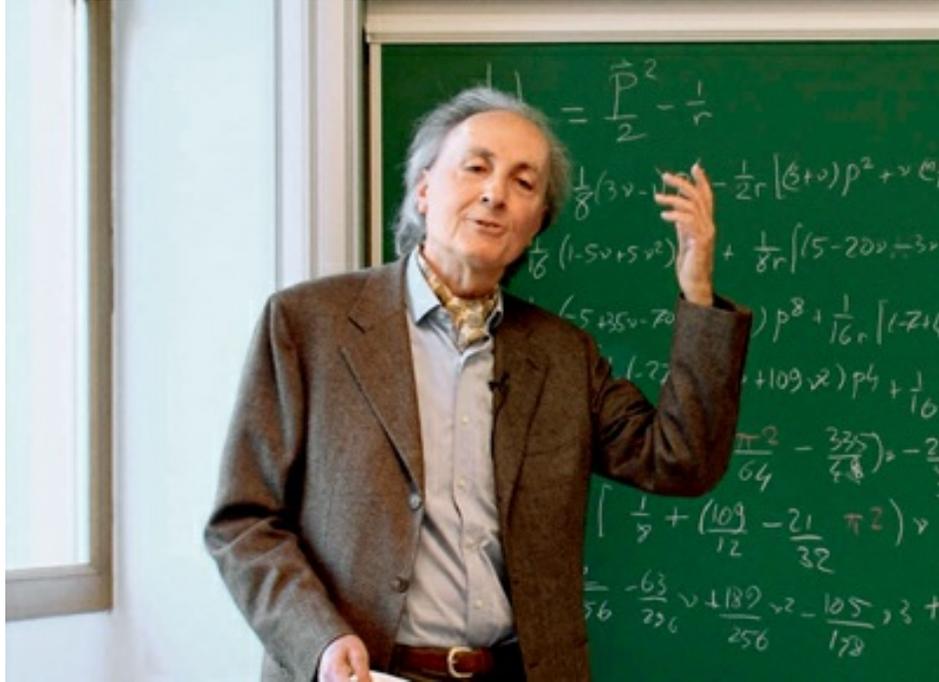


2003年

维瑟发现，维持一个可穿越虫洞并不需要大量的奇异物质。事实上，如果设计合理，“无限少”的奇异物质就能让虫洞一直开启。但无论多少，虫洞还是需要奇异物质才能稳定存在。

2007年

法国物理学家蒂博·达穆尔（Thibault Damour）和谢尔盖·索洛杜欣（Sergey Solodukhin）研究了虫洞可能表现出的观测特性后发现，它们看起来可能与黑洞非常相似，甚至没有任何观测手段能够把两者区分开，除非能进入其中一探究竟。



2010年

美国物理学家尼科德姆·波普瓦夫斯基（Nikodem Poplawski）提出了一个理论，认为我们的宇宙可能就在一个虫洞之中。根据他的计算，某个宇宙中的一颗大质量恒星坍缩可能形成一个虫洞，而虫洞内部的状态与大爆炸类似，于是另一个宇宙就在其中诞生了。

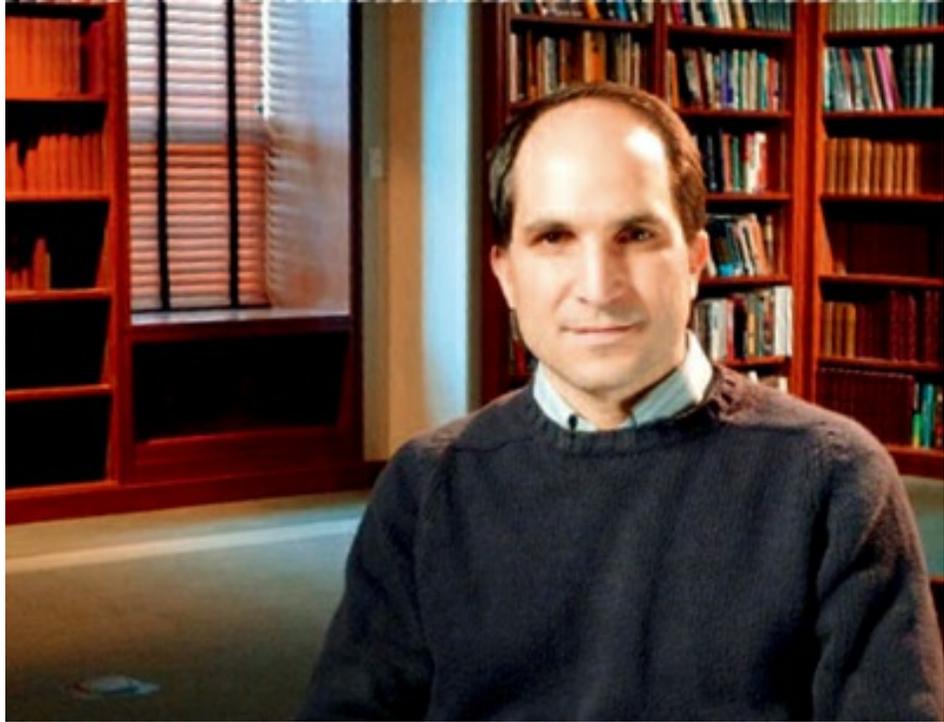


2011年

希腊物理学家帕纳伊奥塔·坎蒂（Panagiota Kanti）和德国物理学家布克哈德·克莱豪斯（Burkhard Kleihaus）提出，在广义相对论的一种修正形式——高斯-博内（Gauss-Bonnet）引力理论中，可穿越虫洞不需要奇异物质就能稳定存在，事实上这种虫洞不需要任何物质和能量就能开启。

2013年

阿根廷物理学家胡安·马尔达西纳（Juan Maldacena）和美国物理学家伦纳德·萨斯坎德（Leonard Susskind）提出，虫洞和量子物理中一种奇异的现象——量子纠缠实际上是等价的，两者只是同一种物理现象的不同表现形式，相互纠缠的粒子之间也有虫洞相连。



深度

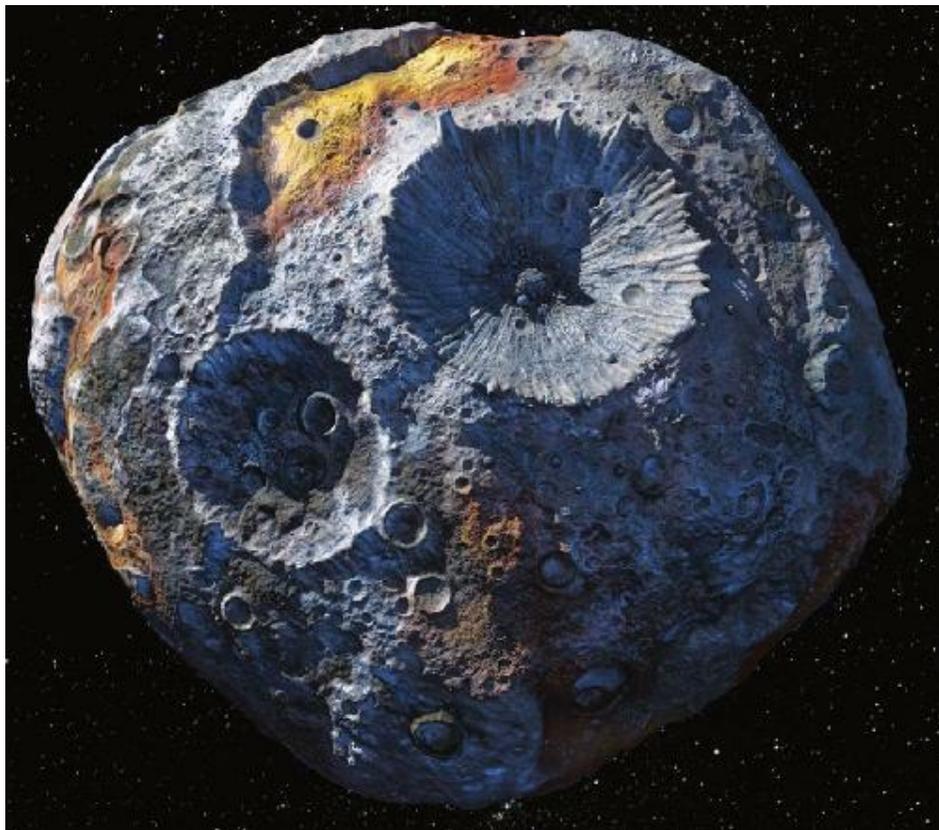
责任编辑：韩晶晶

天文学 ASTRONOMY

行星形成只要“3分钟”

与科学家过去的认识不同，太阳系的行星并不是缓慢形成的，而是经历了一系列剧烈碰撞、解体和重塑的过程。

撰文 琳达·T·埃尔金斯 - 唐东 (Linda T. Elkins-Tanton) 翻译 马骁骁



金属世界：艺术家所绘的灵神星（Psyche）概念图。这颗小行星可能是某个早期行星雏形的铁镍核。



琳达·T·埃尔金斯-唐东是研究类地行星演化的行星地质学家，她在美国亚利桑那州立大学担任地球与空间探索学院的院长。

精彩速览

直到5年前，科学家还认为太阳系的形成过程是缓慢而稳定的，细小的尘埃颗粒逐渐成长为巨大的行星。

但是最近对太阳系形成过程残留的遗迹——陨石的分析似乎表明，太阳系诞生于混乱的碰撞、融化和重构过程。

科学家计划向灵神星发射一艘宇宙飞船验证这一假设。灵神星是一颗由完全由金属构成的奇特小行星，这个天体很可能是一颗早期行星的部分裸露核心。

有一天，我在麻省理工学院和学生讨论行星的形成过程，下课后离开教室时我被研究陨石磁场的同事本·韦斯（Ben Weiss）拦了下来。他非常激动地带我到办公室，给我看了阿连德陨石（Allende）的新数据。这些数据蕴含的信息可能会颠覆行星地质学家此前对太阳系的所有认识。

这是2009年的事情。那年秋天，韦斯的研究团队在阿连德陨石上发现了一个远古磁场的痕迹。阿连德陨石是在1969年坠落到墨西哥的一块巨大陨石，包含了已知最古老的太阳系物质。韦斯的发现出乎所有人的预料。天文学家一直认为此类磁场仅能通过一种叫做磁发电机的机制产生，即行星内部灼热的液态金属在流动时产生磁场，比如地球的磁场就是由地核内旋转流动的液态铁产生的。但阿连德陨石应该是一个不算太热的星子（planetesimal，早期的行星雏形）的碎片。科学家认为它的温度从没有高到可以融化内部金属的程度。因此，韦斯很好奇这颗太阳系

的古老石头是在何时经历了产生出磁场的高温呢？

之前讲课时，我正被学生们追问行星演化的问题，他们觉得教材上的“经典”理论并不正确，所以我刚好有一些不成形的新想法，似乎可以回答韦斯的问题。于是我在白板上把这些思考写了下来。

科学家早就知道星子含有不稳定的放射性铝元素 ^{26}Al 。当铝的这种同位素衰变时，其产生的能量可能加热星子。因此我们猜想，阿连德陨石的母体可能会被 ^{26}Al 产生的能量加热至内部融化。星子内的金属将会从硅酸盐矿物中分离出来，形成一个液态核，并随着星子自转而旋转，形成一个磁发电机。与此同时星子的外壳则被宇宙空间冷却，来自太阳系原行星盘的石块、尘埃不断吸附在星子未融化的外壳上。

在这套理论中，太阳系早期的天体充满了能量，这和我在高中课本上所学的大相径庭。教科书通常描绘太阳系是在安静、缓慢的过程中形成的。45.67亿年前，太阳系的诞生过程像是一首小步舞曲（minuet），有序而又平稳——分子云中的气体和尘埃逐渐形成一个原行星盘，围绕着年轻的太阳转动。然后，气体和尘埃汇聚为一个个小石块，再渐渐成长为直径为数十至数百千米的星子。这些星子通过碰撞形成更大的天体——胚胎行星（planetary embryo），约有火星大小。在此之后它们内部的温度才开始上升。质量不断增大的胚胎行星拥有了足以清空轨道周围碎屑的引力，在互相撞击后形成了行星。最终，组成行星的物质分化成了我们熟知的液态金属核心和硅酸盐地幔，此时的行星是个火山遍布的炽热世界，没有生命存活的空间。

但以上都是陈旧的观点。当我和韦斯开始思考阿连德陨石问题时，其他的一些数据也表明，早期太阳系实际上充满了迅速而剧烈的变化。平淡的“尘埃—石块—星子—行星胚胎—行星”假说如今已逐渐被其他理论取代。科学家之前认为，星子形成需要数亿年，现在看来只需约300万年的时间。假如把太阳系的历史比作人类的一天，那么星子在这一天的第一分钟就出现了。铝释放出的热量和早期星子间的碰撞让星子拥有很多能量，所以它们无需长到更大的尺寸就能出现分层现象。虽然星子相对来说体型很小，但它们同样可能具备一些曾被认为只属于行星的过程和现象，如熔融、排气、磁发电机、火山等。

而且在太阳系中，天体并不是简单地由小长大。大天体也常常会重

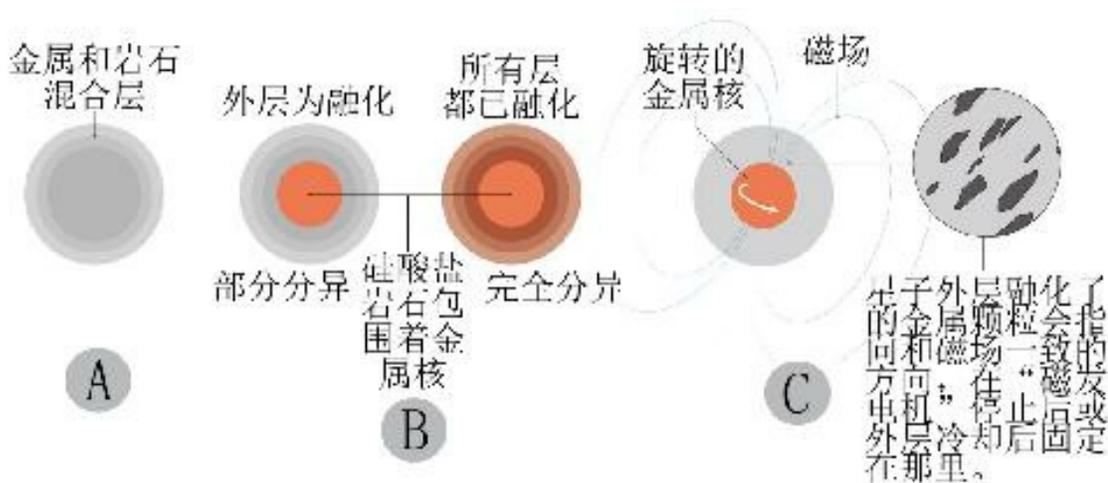
新分裂为小天体。假如早期出现过行星大小的天体，在遭受小型高能物体的碰撞，经历星子间的擦碰、撞击后，它们也会被剥落一部分，甚至彻底摧毁。它们的残骸会撞上其他天体，使其成长为新的行星。仅需1000万年或更短时间，行星就能经历成形、撕裂和重塑的整个过程。

制造行星

太阳系的建筑材料

纠缠是一个来自量子力学的概念，它描述的是相距遥远的两个物体之间的一种特殊关联。虫洞则是广义相对论预言的一座理论上存在的桥，它在时空中连接着两个相距遥远的黑洞。物理学家现在认为这两个现象虽然看起来不相关，却可能从根本上是联系在一起的。

星子内部



A 未分异的星子

这些岩石直径为十到数百千米，所包含的放射性元素会加热其内部。它们有洋葱状结构。

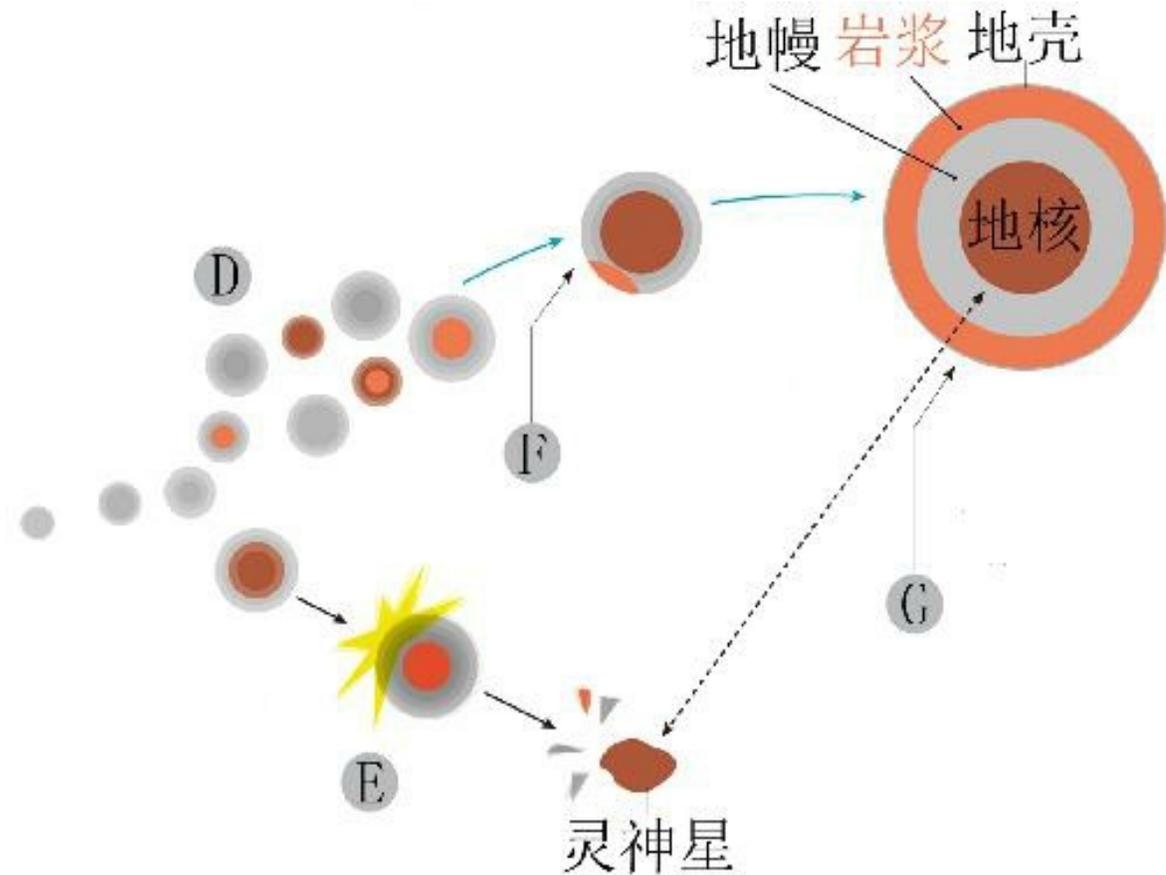
B 分异后的星子

随着放射性元素产生越来越多热量，岩石内部被融化。密度较大的铁镍金属沉入内部。有的星子外壳不会融化。所有分异的星子都有过一个融化了的液态金属核。

C 磁场形成

当星子和它的液态核开始自转时，流动中的金属会形成一个“磁发电机”。此时液态核产生的磁场会指向某个特定方向，就像地球的磁场指向北极一样。

从星子到行星



D 吸积

太阳系刚出现时，尘埃粒子互相碰撞聚成星子，某些星子的直径达到数百千米。然后在短短的50万年内，它们就形成了部分分异或完全分异的内部结构。

E 互相撞击

在太阳系形成的早期阶段，到处都是互相碰撞的星子。它们会形成更大的天体，但也可能被撞碎。

灵神星

小行星“灵神星”可能是某个星子的金属核残存的一部分。在不断碰撞的过程中它丢失了自己的外壳，只剩核裸露在外。

F 胚胎行星

经过多次撞击，一些星子直径增长到了数千千米（约火星大小），成为了真正的行星雏形——胚胎行星。在一次次撞击后，它们也像星子一样不断分异出内部结构。胚胎行星表面有很多行星的特征，如水坑或岩浆池。

G 行星

当胚胎行星足够大后，它们的引力会干扰附近物体的轨道。有时这会导致那些物体撞上它们，强烈的冲击会形成巨大的熔浆海，同时释放出气体形成最初的大气层。有时不断增强的引力也会把周围的物体甩走。当这些巨大的胚胎行星把轨道周围的物质清理干净后，便可以被称为“行星”了。

消失的尘埃盘

包括我在内的行星地质学家在构建这个新奇而活跃的早期太阳系图景时，得到了一些新工具的大力帮助。这类工具可以测量陨石和宇宙中其他行星尘埃云（和原始太阳系相似）的年龄。

过去10到15年中，科学家开发了新设备，可以测量出陨石中占比不到百万分之一的元素的含量。因为我们知道放射性元素衰变的快慢，根据这些测量结果便可计算出剥落下这些陨石的行星和星子形成、变化的时间。全世界很多科研团队，如原先在苏黎世联邦理工学院现在任职于牛津大学的亚历克斯·哈利迪（Alex Halliday），德国明斯特大学的索斯滕·克莱内（Thorsten Kleine），哈佛大学的斯坦·雅各布森（Stein Jacobsen），卡内基研究所（Carnegie Institution for Science）的玛丽·霍兰（Mary Horan）和里克·卡尔森（Rick Carlson）以及马里兰大学的理查德·沃克（Richard Walker），都开始测量陨石。研究表明，在尘埃盘开始冷却后的几百万年内，星子就形成了。很多类地行星是在最初的1000万年内形成的，甚至连地球的大部分也是在几千万年内形成并分化为地核和地幔的。

从其他角度入手的研究也得到了类似的结果。随着望远镜性能的提升，我们现在可以看到银河系其他区域的年轻恒星，还能看到其中一些恒星周围由尘埃和气体组成的原行星盘。在约10年前，研究者估算了周围存在行星的恒星的年龄，和周围只有气体尘埃盘的恒星的年龄，两相比较后，他们认为，恒星周围的原行星盘持续时间平均只有300万年。

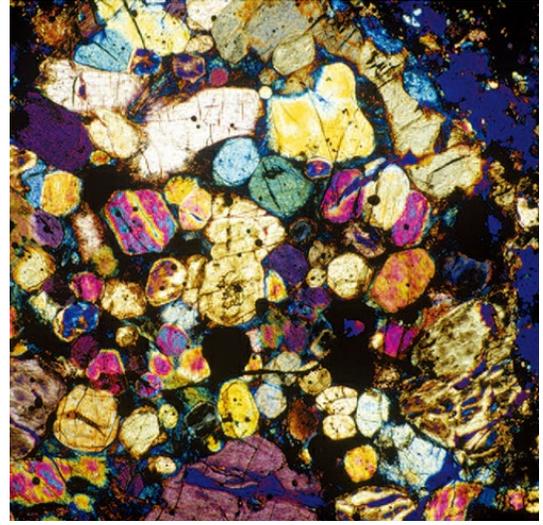
也就是说，星子的形成过程平均只有300万年。在这之后还残留的

尘埃和气体不是落入了恒星，就是逃逸到了宇宙空间中，再没有多余材料可供行星形成了。要知道，理论天文学家原先认为吸积过程会持续数亿年，这可真是比原来快了不少。

关于星子形成时间的更多证据来自于放射性元素测年方法，这类元素会以极为稳定的速度衰变为其他元素，因此可以用作时钟。利用新的实验设备，欧洲和美国的这些研究组可以极为准确地测量出这些元素的含量，足以推算出它们的衰变所经历的时间。掉到地球上的陨石就含有这些放射性元素。大部分陨石都是小行星的碎片，而小行星正是星子的残骸。（还有些陨石来自月球、火星或是其他未确定的天体。）

钶的一种放射性同位素大多存在于硅酸盐矿物中，例如地球的地幔。钶会衰变为钨的同位素，变得易于和构成行星核的金属结合。钶衰变的速率是固定的，每过900万年就会有一半的钶变为钨。这套系统让我们得以知晓行星和星子中，金属—硅酸盐（核—幔）的分异时间。金属核形成时把硅酸盐地幔中的钨全都带入了核中，还残留在地幔中的钶持续衰变为钨。若不再有分异过程发生，这些钨就留在了地幔内。只要测量陨石中钶和钨的比例，科学家就可以计算出自核形成以来，已经过去了多少时间。

铁陨石通常被认为脱落自星子的金属核，同位素测量结果显示，陨石母体在原行星盘凝结出固体后的50万年内就出现了。把太阳系历史比作一天的话，这才不到一秒。假如铁陨石确实是星子核心的碎片，那么这些星子一定在那个短暂的时间窗口内完成了形成、融化并产生铁核的整个过程。



远古磁铁：阿连德陨石的碎片上存在着行星前身产生的磁场痕迹（右边是陨石截面的显微照片）。

迅速成形

实验数据确定无疑地证明，太阳系的形成过程比教科书描述的图景快得多。这个领域的科学家现在面临的问题是解释行星是如何快速形成的。难题交到了理论天文学家手里。直径只有几微米至几厘米大小的尘埃和石块围绕着年轻的太阳旋转，然后仅用了50万年，这些尘埃和石块就聚合成了直径超过原来1000万倍的天体（直径100千米的星子），这是如何做到的？

答案并非显而易见。标准的物理解释是撞在一起的尘埃会通过电磁力粘在一起，正如房间里的灰尘会因为静电聚集成块。尘埃碰撞时会发生压缩，孔隙率降低，从而吸收碰撞能量，这使得它们结合得更紧密，而不会弹开或散开。但随着质量增加，这些物体很快会遇到所谓的“米级障碍”。当物体的大小接近1米时，它们已经大到不足以靠电磁力结合，但又远没有大到能通过引力结合。即使是低速撞击也会让这些团块散裂，而不是积聚。但我们知道这些物质是有办法跨越米级，长成星子这么大的——我们所在的地球就是明证。所以肯定还有别的过程参与其中。

科学家提出了好几种假说，试图解释物质如何跨越“米级障碍”。大部分假说都涉及到了不同类型的湍流，这些湍流可以把颗粒物压缩到一

起，从而让原行星盘中的物质聚集起来。这种类似漩涡的力量可能包括开尔文-亥姆霍兹涡流（Kelvin-Helmholtz eddies）。这是一种在原行星盘气体层和尘埃层之间发生的现象，可以有效地把一个区域内的物质压缩成更大的物体。该理论的主要开创性工作要归功于现在任职于瑞典隆德大学的安德斯·约翰森（Anders Johansen）。美国西南研究院的哈尔·利维森（Hal Levison）和约翰森各自独立提出了一个更为新颖的模型，叫做碎石吸积理论（pebble accretion）。利维森的计算表明，即使是很小的尘埃和团块也可以在引力作用下跨越数个轨道吸附在星子上，而且整个过程可以在很短时间内发生，足以使星子在太阳系早期就出现。

外冷内热

但无论哪种挤压过程也不会使星子分出地幔和地核结构。假如星子是从原行星盘形成，那么金属和硅酸盐是混在一起密不可分的。只有在高温下，而且星子里面至少要部分融化才能使得金属沉入内部形成核。计算表明，这些小天体互相撞击产生的能量并不足以融化它们。因此研究者还得搞清楚，在冰冷的宇宙空间中哪来那么多能量让星子内部融化。

到这里，就该放射性铝元素登场了。这些原子在衰变时会释放出一定的热量，其总量对早期太阳系而言十分巨大。因为铝是岩石中最常见的6种元素之一（其他5种为硅、镁、铁、氧和钙），半衰期约为70万年的 ^{26}Al 能够轻易地把一部分星子加热至融化的温度。

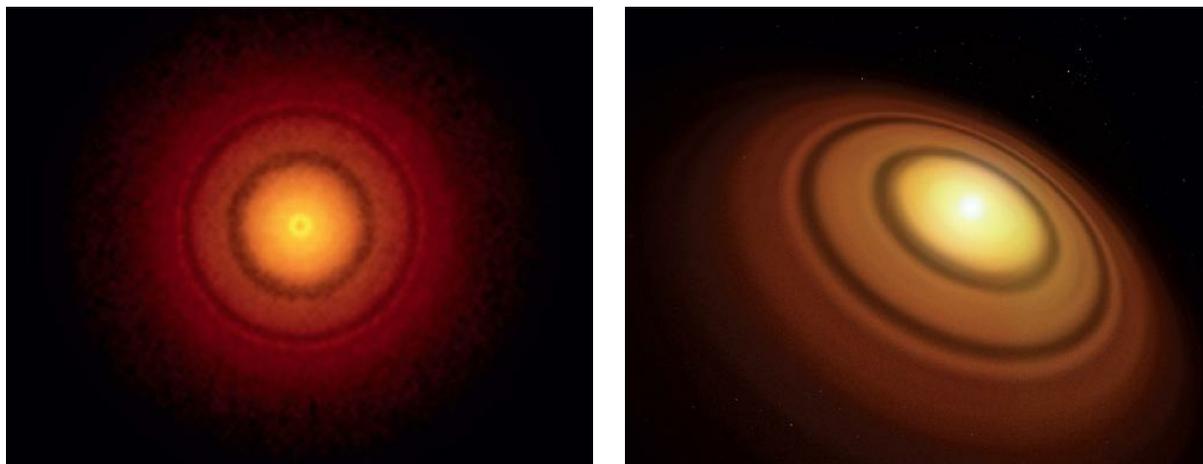
不过新的观测表明，有一些星子的外壳是未融化的，因此肯定还有什么因素阻止了它们完全融化。在一定程度上，这与天体的大小有关。以阿连德陨石的母体为例，若要升温至融化的程度，其体积必须足够大，这样它在内部产生热量的速率才能超过外表辐射散热的速率。大天体比小天体的内部温度更高，因为它的体积（和产热有关）相对于表面积（和散热有关）的比率更大。 ^{26}Al 半衰期不长，这意味着升温必须在很短时间内完成。若阿连德陨石的母体星子是按照我们的模型演化的，它必须在太阳系出现固体后约200万年内（还把太阳系比作一天的话就是前37秒），半径长到10千米以上，我们猜测它的半径增长到了大约200千米。

学界之前的观点是，星子要么没有融化，要么就是完全融化。不过

我和韦斯认为，真正的情况可能介于两者之间的，即太阳系的大部分原始物质形成了仅内部融化的星子——中心是液态核，但外部是固体壳。阿连德陨石是这个假说的一个佐证：它上面的磁场痕迹暗示了液态核的存在，但本身却完全是由未受热的原始物质构成，因此，它只可能来自温度较低的星子外壳。阿连德陨石的母体星子一直保留着未融化的原始外壳，一是因为它不断向宇宙空间中散热，二是因为冰冷的原行星盘物质仍会不断吸附在它的表面。尽管没受到高温影响，星子的外壳依然保留了磁场的痕迹，说明星子内部存在液态核，能够通过磁发电机机制产生磁

星子部分分异的观点并非由我们首次提出。早在1958年，地质学家约翰·伍德（John Wood）就在自己的博士论文里提出了类似的结构。但之前并没有人大胆地宣称，未融化过的原始陨石中的“明星”阿连德是通过这种方式产生的，也没人认为该过程在太阳系早期其实很常见。

现在看来，这种现象确实很常见。研究者已经发现，至少有4个其他陨石的母体存在核心“磁发电机”。同时，陨石磁场的其他可能来源也已经被排除掉了。阿连德和类似陨石的磁场并非源于太阳磁场，也不是源于尘埃盘，同样也不是来自撞击飞溅出的尘埃产生的暂现磁场。假如早期太阳系真的存在数百甚至数千个部分分异的星子，像一个个小地球一样高速运动、产生热量、形成“磁发电机”，那么整个早期太阳系包含的热量可比地质学家原先认为的多多了。



阿塔卡玛大型毫米波天线阵在年轻恒星长蛇座TW周围发现的原行星盘（左图），以及和术家据此绘制的概念图（右图），这类观测为研究我们自己太阳系的形成过程提供了参考。
图片来源：欧洲南方天文台

拥挤的太阳系

其他一些理论也与行星由小到大线性生长的传统观点有所抵触。多年以来，为了计算的简洁和数值上的可处理性，所有关于行星形成过程的模拟均假设星子每次碰撞都只是合并为一个更大的天体。即使模拟星子从尘埃中形成，也是采用了这种假设。但亚利桑那州立大学的埃里克·阿斯普格（Erik Asphaug）最近对碰撞过程有了新的理解，并提出了新的模拟方法。阿斯普格发现有些碰撞是建设性的，会形成更大的天体，但也有某些碰撞是破坏性的，撞击天体会把另一个天体上的物质剥落，然后继续去别的地方搞破坏。

诞生约1000万年后，这些天体才真正开始变大并稳定下来。是什么让它们平稳存活下来了？答案似乎依然是大小。当星子不断碰撞形成胚胎行星后，质量和引力会随之变大。当胚胎行星的引力变得足够大时，附近的物体要么会被引力拉扯过去，吸积到胚胎行星上，要么就会因轨道改变而被甩出去。不断成长的行星用这样的方式把自己的轨道清理干净，也正要满足这条标准才足以被称为行星。而对体积较小的天体而言，能保持轨道稳定、不被行星干扰的安全空间变得越来越少，小行星带成为了为数不多的庇护所之一。

行星地质学

加速成形

科学家原先认为太阳系中的行星是在缓慢稳定的过程中形成的，从45亿年前开始，时间跨度长达5亿年⁽¹⁾。掉落到地球的陨石、放射性元素的半衰期和对其他恒星周围尘埃云的观测表明，太阳系的行星（包括地球）形成的过程比原来认为的更快，只需300万年⁽²⁾。行星们诞生自一个充满能量，毁灭与重生反复上演的过程。



A 45.67亿年前：一团分子云中的气体和尘埃旋转形成一个围绕着年轻太阳的盘。

B 气体和尘埃凝聚成一个个小石块。

C 每个石块逐渐生长为直径数十到数百千米的天体，形成了星子。

D 星子互相撞在一起，变成体积更大的胚胎行星，约为火星大小。

E 胚胎行星变得足够大之后，它们的引力会把自身轨道附近的其他碎屑清理掉。

F 胚胎行星互相撞击后，变成体积更大的行星。

G 地球内部形成了金属地核和硅酸盐地幔，然后逐渐冷却，此刻距今约40亿年。

探访灵神星

我和韦斯、阿斯普格等人很希望了解在那个能量肆虐的混乱环境中，我们地球的结构和成分是如何形成的。但我们没法像凡尔纳的小说

写的那样，直接去地核进行观测。那里太深、压力太大，我们没法直接采样。

不过有一颗小行星，也就是一个星子的残骸，可能是着手研究的好地方。我和同事于4年前开始设计一个探索它的太空计划。我们聚集到了美国航空航天局（NASA）喷气推进实验室的“左场”（Left Field）任务规划室。这里专为创新设计，屋里的架子上堆满了图稿，还有纸板、轮子、电线、积木、纸张、记号笔、泡沫塑料等材料。这是个思考全新事物的好地方，而这正是我们要做的。我们想直接探测一个天体，从而证明或推翻我们的假设。我们认为最理想的目标是灵神星（Psyche）——一个由金属组成的小行星。

这颗小行星有它的独特之处，至少在目前适合探索的范围内没有第二例。灵神星是最大的小行星之一，直径达200千米，位于火星和木星之间。目前我们对它进行的所有测量都来自它反射的电磁波，数据表明这颗小行星几乎完全由铁和镍构成。灵神星看起来像是一颗星子在外壳被剥落后露出来的核，是太阳系早期天体之间剧烈碰撞后的最终残留物。灵神星上的颗粒就像一个个小指南针，它们的指向或许可以告诉我们之前是否有过“磁发电机”。灵神星的岩石外层可能还残留着一部分，可以告诉我们星子的深层地幔是什么样的。假如它裸露的金属表面曾遭受撞击，激起的金属可能会在落回表面之前就冻结，形成尖锐的峰。

任务室里的每个人都有自己的特长：韦斯擅长在陨石中测量磁场；威廉·F·波特克（William F. Bottke）擅长天体的轨道动力学；阿斯普格了解撞击会产生怎样的效应；布鲁斯·比尔斯（Bruce Bills）擅长计算物体的引力场；丹尼尔·温克特（Daniel Wenkert）专长数据管理和操作；戴蒙·兰多（Damon Landau）计算轨道，是个星际旅行专家；约翰·布罗菲（John Brophy）负责把琐碎的讨论整理成形；我则是贡献关于行星成分以及融化、固化和分异等过程的知识。

任务室里讨论热烈。在这里不需要查邮件，对话也从不会冷场。我们都为这次探测感到兴奋，毕竟人类从没有真正探访过一个金属天体，我们还不知道会看到什么景象。

数年过去了，当初我们用泡沫塑料和乐高积木筹划的探索计划已经发展成了一个有75人左右的团队项目。我们提议制造一艘小型飞船，用

太阳能电池和粒子引擎共同驱动，上面携带一台用于探测磁场的磁力仪，一台检测元素用的伽马射线光谱仪和两台照相机。这个计划已经在2015年通过了NASA的第一轮筛选。NASA将在近期公布遴选结果。假如我们今年没能进入最终名单，我们也会继续改善计划，参加NASA下次的选拔。

若一切顺利，我们会在2021年拜访这个行星形成过程留下的遗迹。

扩展阅读

Iron Meteorites as Remnants of Planetesimals Formed in the Terrestrial Planet Region. William F. Bottke in *Nature*, Vol. 439, pages 821–824; February 16, 2006.

Asteroids, Meteorites, and Comets. Revised edition. Linda T. Elkins-Tanton. Facts On File, 2010.

The Earth and the Moon. Revised edition. Linda T. Elkins-Tanton. Facts On File, 2010.

Jupiter and Saturn. Revised edition. Linda T. Elkins-Tanton. Facts On File, 2010. Mars. Revised edition. Linda T. Elkins-Tanton. Facts On File, 2010.

The Sun, Mercury, and Venus. Revised edition. Linda T. Elkins-Tanton. Facts On File, 2010.

Uranus, Neptune, Pluto, and the Outer Solar System. Revised edition. Linda T. Elkins-Tanton. Facts On File, 2010.

Vision and Voyages for Planetary Science in the Decade 2013–2022. Committee on the Planetary Science Decadal Survey. National Academies Press, 2011.

Mercury and Other Iron-Rich Planetary Bodies as Relics of Inefficient Accretion. E. Asphaug and A. Reufer in *Nature Geoscience*, Vol. 7, No. 8, pages 564–568; August 2014.

The Small Planets. Erik Asphaug; May 2000.

Born of Chaos. Konstantin Batygin, Gregory Laughlin and Alessandro Morbidelli; May 2016.

深度

责任编辑：吴非

遗传学 GENETICS

人类演化在这里加速

在地球最不宜居住的环境中，隐藏着关于人类生命的线索。《科学美国人》意大利版的这篇文章，报道了科学家对生活在这里的人开展的基因组研究，这些研究为揭示人类演化历程、找出疾病治疗方案提供了宝贵的信息。

撰文 马泰奥·富马加利（Matteo Fumagalli） 卢卡·帕加尼（Luca Pagani） 翻译 梁爽



出于自我意识或者是一点儿自负，我们经常会认为人类的演化已经停止。但事实果真如此吗？由于演化所需的时间十分漫长，而未来又无从预测，我们无法证实人类的演化速率是否在减缓。然而，通过观察当代的不同人类族群，我们可以看到环境变化在人类演化过程中是如何发挥选择作用的。

卢卡·帕加尼是剑桥大学考古学及人类学专业博士后。他的研究领域包括分子人类学及群体遗传学。



马泰奥·富马加利是伦敦大学学院遗传学研究院博士后。他的研究领域包括计算机生物学和进化基因组学。



精彩速览

现代人类起源于二十万年前的非洲。自那时起，人类足迹逐渐踏遍全球，不断征服各种与非洲不同的环境，包括一些极为不宜居住的极端环境。

人类不仅适应了缺氧和极端高温或严寒的环境，也适应了饮食结构的变化。

在适应环境的过程中，人类的基因组发生了改变。在适应极端环境的过程中出现并保留至今的基因突变，帮助我们更清晰地认识人类的演化历史。

这些认知对于研发某些疾病（尤其是由生活方式导致的疾病）的治疗方案起到重要作用。

1859年，查尔斯·达尔文（Charles Darwin）提出进化论，随后该理论得到其他科学家的进一步完善。进化论基于这样一个观点：一个生物体内的基因突变是随机的。但是，经过一段时间，这些突变是消失还是在群体中变得更加常见，则取决于它们给生物体带来了什么样的影响。一些基因突变在环境发生改变时，会给生物体带来繁殖优势。这些突变可以保证携带者的后代更好地适应新环境，因而这类突变得以广泛传

播。

但基因突变是一把双刃剑：如果突变基因携带者所处的环境一成不变，突变基因的传播优势就会大打折扣。结果是，该物种的基因库会达到“演化均衡”，即演化来到了动态系统的平衡点。

对于人类来说，除了潜在的演化均衡，文明的发展是保障基因组稳定性的另一种动力。不难想到，人类通过一系列革新手段改善生活质量并保障群体的生存与繁衍，这些手段包括燃料、服饰、疫苗、抗生素、农业、养殖业的发展等。此外，眼镜、义肢等发明也极大地提高了存在缺陷的个体的存活几率。

但近一万年来（在演化历程中，一万年是一段很短的时间），人们的科技手段不足以显著改善极端环境中的生存条件。尤其是在高海拔缺氧以及极端炎热或寒冷的地区，目前的文明发展水平仅能支撑短期的生存。显然，来自极端环境的刺激成为了“近代”人类演化的重要推动力。

事实上，我们不必费尽心思去僻远地带寻找极端生存环境。从18世纪下半叶工业革命爆发开始，在世界范围内人口开始越来越多地涌入市区和大都市。目前在全球74亿总人口中，超过一半都生活在城市。一方面，城市化提高了生活舒适度，但另一方面，城市人口密度过高，使得病原体大量聚集，给人体的免疫系统和新陈代谢的运转带来新的挑战。我们有理由相信，在演化压力的影响下，人类的免疫系统和新陈代谢会在将来出现明显改变。

此外，我们也可以从宏观的环境变化中发现环境对人类演化的推动作用。例如，全球气候变化，以及科技带来的人类特有生存环境的改变。这些改变很可能会影响人类未来的演化道路，但是指出它们会具体影响哪些生理功能还为时尚早。

接下来，我们将介绍一系列关系到人类演化的关键性问题：病原体的选择压力、高热量饮食及高海拔地区缺氧环境对基因分别产生了怎样的影响。这些案例除了在人类演化层面具有重要意义，也为研究极端环境中人群的健康状况提供了线索。

对极端环境的适应

撒哈拉以南的非洲是人类文明的摇篮，这里保存着最古老的现代人人类遗迹。在埃塞俄比亚，人们发现了19.5万年前的智人化石，这是迄今为止最古老的智人化石。以非洲大陆为起点，我们的祖先迁移到欧亚大陆，随后占领了世界上绝大部分陆地。在这个过程中，他们不得不一直面对新的生存环境。环境的改变极大地提升了自然选择的压力，并且导致人类的基因组发生重要的改变。

从中非到北非再到欧洲，随着气候逐渐变冷、阳光照射逐渐减少，决定人类肤色的基因发生重大突变。由于紫外线照射减少，在欧洲人身上，制造黑色素的关键基因（如SLC45A2、OCA2）出现高频突变。现任职于美国哥伦比亚大学的约瑟夫·皮克雷尔（Joseph Pickrell）和同事于2009年在《基因组研究》（*Genome Research*）上刊文，验证了这一观点。黑色素可以保护人类免受太阳射线损伤，减少皮肤癌的发病率。而浅色皮肤似乎有助于维生素D的合成，因为维生素D的合成需要暴露在紫外线中。

人类的演化不仅取决于地理位置的变迁，还受到社会变革的影响。乳糖酶在不同人类族群中的表现，就是文化因素选择基因的最好佐证。伦敦大学学院的帕斯卡莱·热尔博（Pascale Gerbault）于2013年在《人类遗传》（*Human Heredity*）上刊文称，控制乳糖酶的LCT基因发生了突变，这种突变在欧洲人和中东人中十分普遍，但在其他人类族群中从未发现。LCT基因的突变使得人体在成年后依然可以分解牛奶中的乳糖，这对以牛奶和奶制品为主要食物来源的民族而言是一项巨大的优势。通过对古代人基因组的研究，哈佛大学医学院的伊恩·马西森（Iain Mathieson）证实这种突变基因于近期（约4300年前）在欧洲出现，该研究于2015年发表在《自然》（*Nature*）杂志上。



北极附近：一个孩子坐在位于约阿港的雪屋里。加拿大约阿港位于北极圈以内，是因纽特人的定居点。人们在分析因纽特人的饮食对生理的影响时，可以很明显地看出因纽特人对极地环境的适应。

摄影：托恩·科恩（Ton Koene），Getty Images

如果说环境是某种基因突变成功与否的决定因素之一，那么很自然，极端环境可以更高效地筛选能提高人体适应性的基因突变。从生存的角度来说，病原体富集的环境也是一种极端环境。即使是在医学不断取得瞩目成就的今天，传染病给人类带来的生存压力依然居高不下：看看最近爆发的埃博拉和寨卡疫情，还有一直猖獗的艾滋病等，一些传染病严重影响到染病区域内的人口数量。

每年，全球有5亿人感染疟疾，其中大多数为儿童。作为引发疟疾的主要寄生虫，恶性疟原虫在与抗疟疾药物的对抗过程中快速演化，产生耐药性。它们导致人体血红蛋白 β 链（HBB）基因发生突变。

在所有当代人类族群中，生活在北极附近的族群（如因纽特人）的生存环境最为极端且不同寻常，毕竟我们的祖先来自截然相反的环境——炎热的非洲大陆。即使可以通过烤火和保暖的衣服在一定程度上抵御严寒，但为了维持体温，这些地区的人们仍需要消耗更多的能量。因

此，北极居民的传统饮食以肉类（尤其是富含脂肪的肉类）为主，不仅是因为这里缺乏其他食物，更是出于生存的需要。

多年以来，北极地区的饮食一直都是研究人员关注的热点，因为即使饮食中的脂肪含量很高，但与其他族群（如欧洲人）相比，因纽特人的心血管疾病发病率却并不高。

人体中的不饱和脂肪酸多为omega-6型，其来源多为陆生哺乳动物。而在北极地区，以海洋动物为食的当地居民从食物中获取了大量omega-3型不饱和脂肪酸。科学家据此提出假说认为，富含omega-3型不饱和脂肪酸的饮食可以降低心血管疾病的发病率。事实上，添加omega-3型不饱和脂肪酸的牛奶等食物在全球各地几乎都有售卖。

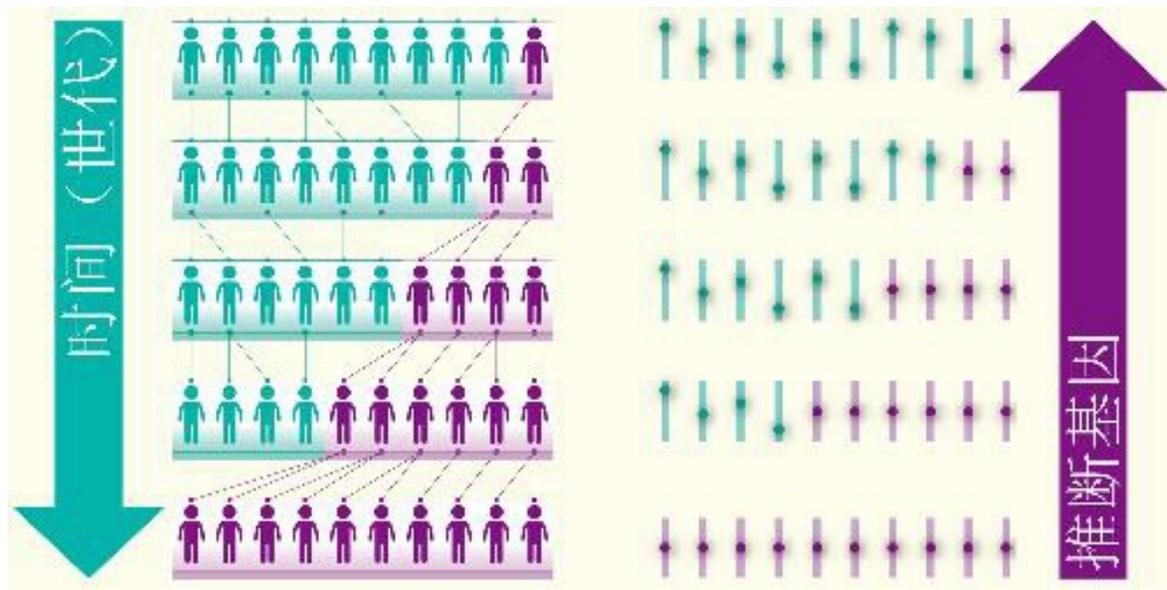
然而，近期的基因组研究对上述观点提出了质疑。2014年，《美国人类遗传学杂志》（*American Journal of Human Genetics*）刊登了剑桥大学遗传学家弗洛里安·克莱门特（Florian Clemente）对西伯利亚原住民基因组的研究。而在2015年，本文作者富马加利与合作者在《科学》（*Science*）上发布论文，对因纽特人的基因组进行了研究。这两项研究表明，两组人群拥有独特的基因突变，用于调节不饱和脂肪酸的含量。之所以这些突变能在自然选择的过程中保留下来，是因为它们有助于维持极地饮食中脂类的平衡。

有趣的是，作为北极地区的另一个统治“族群”，北极熊的遗传适应性与人类不谋而合。北极熊主要以海豹为食，它们身体一半以上的重量都由脂肪构成。因此长期以来，北极熊体内的“坏胆固醇”含量比人体可以承受的最高值还要高。

北极熊是如何分解这些胆固醇的？中国华大基因研究院的刘石平和同事于2014年在《细胞》（*cell*）上发文，在分析了近100只北极熊和棕熊的基因组后，他们提出北极熊体内调节新陈代谢的一系列关键基因曾发生突变，其中载脂蛋白B的突变尤为突出。在人体内，载脂蛋白B负责“消化”过剩的胆固醇。因此，通过分析其他物种的“极端”饮食结构，可以帮助我们更好地理解人体的运转方式。

自然选择的线索

“中性”突变（右侧，绿色圆点）不会导致特殊的表现型（左侧）。每个人都有很多中性突变基因，这使我们看起来相似，但具有个体差异。当个体获得新的有益的基因突变时（右侧紫色），不仅会改变个体的表现型，还会提高其健康水平及繁殖成功率。结果是在几代人之后，这种突变基因在人群中会更频繁地出现。因此，与“中性”基因地区的人群相比，经历过自然选择的人们的基因更为相似，因为它们来自共同的祖先：第一个优质基因的携带者。比较当今不同地区人群基因组的相似度可以帮助科学家推断历史上哪些地区曾出现过自然选择。



制图：达尼洛·索西（Danilo Sossi），参考作者建议完成

另一类促进基因突变的极端生存环境出现在高海拔地区，这里的人类面临着缺氧环境。至少有四大人类族群在海拔2000米以上的地区生活了数千年，他们分别是埃塞俄比亚高原人、高加索地区的居民、喜马拉雅人（尤其是夏尔巴人）和安第斯高原人。

在高海拔地区，大气压强减小，因此每次吸进肺部的空气比较稀薄。原本在平原地区繁衍的人类，到了高海拔地区会面对氧气含量不足的情况，而氧气是细胞存活的根基。此时，人类的呼吸频率会加快，几天后产生高原习服（对缺氧环境产生的适应），改变血液的成分，从而提高人体对少量可用氧气的吸收率。

因此我们可以推断，由于长期暴露在极端缺氧的环境中，再加上高原习服所导致的副作用，这些地区的人群很有可能演化出了一种适应这种极端环境的遗传机制，而不仅仅是简单的生理改变。由于应对缺氧环境的遗传机制十分复杂，在此我们不会对其展开讨论。但凭直觉，我们可以想到两种应对缺氧环境的基本方法：提高血液中氧气的运输效率，或提高需氧型新陈代谢的效率，因为新陈代谢需要在细胞内消耗氧气。在针对上述人群的遗传学研究中，研究人员对这两种假说都有所考量。最初，研究人员从一系列已经有所了解的候选基因出发，这些基因很可能在其中一种假说中发挥作用。近年来，研究对象已经涵盖了数百个个体的基因组。这些研究中的所有人群都演化出了适应极端环境的遗传机制。

有趣的是，不同族群中基因突变的自然选择过程是相互独立的。该现象很可能说明，基因突变最初的携带者不是同一个人。相反，自然选择会促使基因产生新的突变。即使这样，近年来的研究发现，自然选择改变了缺氧基因组相同区段的基因。科学家发现，世界各地的基因突变具有可重复性。



稀薄的空气： 行走在喜马拉雅山区海拔高达6500米的梅乐峰冰川间。在这些地区，人类不得不与低温及缺氧的极端环境进行斗争。

图片来源：Travel Ink, Getty Images

研究者重点关注了EGLN1和EPAS1这两个基因。研究者在藏族人、夏尔巴人、高加索地区人群和安第斯人体内发现EGLN1出现了突变。科学家认为，该突变具有抑制血液中血红蛋白增长的作用，而高原习服会导致血红蛋白含量增长。血红蛋白过量会导致血液粘稠度升高，进而可能引发血栓等血液循环问题。尽管控制血红蛋白含量十分必要，但另一方面，为了缓解缺氧条件对人体的危害，这些人群也需要有足够的血红蛋白。因此，新的研究希望找出是什么适应性机制抵消了EGLN1突变所带来的影响。

EPAS1基因的故事更加有趣。2014年，加利福尼亚大学伯克利分校的埃米莉亚·韦尔塔-桑切斯（Emilia Huerta-Sánchez）与同事在《自然》（*Nature*）上发表了一项研究成果。藏族人和尼泊尔夏尔巴人的EPAS1基因有着一种独特的突变，与EGLN1基因一起控制血液中的血红蛋白含量。桑切斯等人的发现指向了一个令人咋舌的结论：喜马拉雅人的EPAS1基因突变并非来自现代人。此类突变只在喜马拉雅人和丹尼索瓦人的基因组中出现。丹尼索瓦人是一类已经灭绝的古人类，他们最后的行踪可追溯至4.1万年前。科学家已经证实，现代人的祖先和丹尼索瓦人之间的确有过交配行为。科学家认为，正是与丹尼索瓦人的交配，使得喜马拉雅人获得了帮助他们适应高海拔环境的EPAS1基因。

从安第斯到东亚

适应性无处不在

在地球上那些距离我们最遥远的地区，生存环境千差万别且不宜居住。在适应这些环境的过程中，我们祖先的基因组发生了改变。现在我们开始辨认这些基因突变并将其归类，见下图（相关基因见图中标示）。对环境的适应不仅存在于极冷、极热或高海拔缺氧（这些情况本文都有提及）地区，也存在于疟疾、霍乱等传染病多发地区，甚至在水体砷含量超标的地区也有所体现。

-  ● 饮食以海产品为主
-  ■ 乳糖耐受
-  ★ 抗疟疾
-  ◆ 抗霍乱
-  ▲ 砷富集环境
-  ▼ 低温
-  = 高海拔
-  ▼ 浅色皮肤



身材矮小



制图：达尼洛·索西（Danilo Sossi），数据来源：Strength in Small Numbers, di Sarah Tishkoff, in Science, Vol. 349, n. 6254, 17 settembre 2015.

健康与遗传药物

在这篇文章中，我们从非洲中部出发，经过欧洲乡村、北极荒原，最终到达喜马拉雅山。在这场短暂的旅行中我们发现，即使人类发明了很多科技解决方案来减轻自然选择造成的压力，一些极端的环境仍会带来无从攻克的难题。甚至人类社会的进步本身也在创造新的生存环境，这也在无形中带来新的自然选择压力。

这些研究的作用不仅在于揭示人类的演化史。对自然选择过程的了解可以让我们更好地理解，哪些分子机制是人体的基础，哪些随着人类的发展变化，而这些变化的机制或将帮助人们缓解甚至治愈基因突变导

致的疾病。

例如，我们的机体不仅在高原区域缺氧。怀孕、心肌缺血及局部组织（尤其是大脑）供血不足时都会导致机体缺氧。阐明高原地区的居民如何在相似的缺氧环境中生存，将有助于研发针对性的治疗方案。此外，“坏组织”也暴露在缺氧环境里。肿瘤在生长初期仅仅是一堆含有少量血管的细胞群，它们需要费力搜寻繁殖必需的氧气。不幸的是，机体中的肿瘤细胞可以通过基因突变或重排获得更多的血液供应。因此，了解缺氧状态下的供血机制有可能为战胜癌症提供新思路。

当然，人类的遗传演化带给我们的不只是有利的一面。从生物医学的角度来看，一些现代人的常见疾病很可能源于祖先身上的某些基因突变，这些突变在当时起到了适应极端环境的作用，而这样的极端环境在今天已不复存在。关于这个现象最极端的例子就是工业社会背景下的自身免疫疾病。20世纪80年代，英国科学家戴维·斯特罗恩（David Strachan）在《英国医学杂志》（*British Medical Journal*）提出“卫生假说”（hygiene hypothesis），他指出，对病原体富集环境缺乏适应是造成人类免疫系统紊乱的原因之一，随之而来的是慢性炎症发病率的提升。研究显示，在病原体富集的环境中，人群的演化压力增加，因此与自身免疫疾病（如乳糜泄及克罗恩病）及过敏性疾病相关的基因突变频率也在提高。

另一个揭示人类对极端环境的适应与疾病起源间密切关系的例子是肥胖症发病率的上升。肥胖症是一类世界性的疾病，患者患2型糖尿病及代谢综合征的风险显著增加，给个人健康和国家经济都带来巨大压力。当然，个体是否患肥胖症取决于包括环境和生活方式在内的众多因素，但遗传因素最高可以起到60%的作用。如果这些突变对携带者如此不利，那么为什么它们在人群中仍如此普遍，没有被自然选择所淘汰？

为了解决这一难题，密歇根大学医学院的詹姆斯·尼尔（James Neel）于1962年在《美国人类遗传学杂志》上提出了“节约基因”（thirsty gene）理论。根据该理论，现代社会中肥胖症相关疾病的猖獗与人类祖先长期以来处于物质匮乏的环境有关。节约基因使机体代谢机制处于节能状态，降低了对食物的需求。由于节约基因的优越性，越来越多的人都拥有了这种基因。进入工业化社会后，饥荒非常罕见，因此节约基因会增加人们患肥胖症的风险。有趣的是，节约基因理论没有

从科学角度得到完全证实。尽管一些研究表明，自然选择对一些与新陈代谢紊乱有关的基因突变起到了选择作用，然而这一结论却无法在更大的尺度上得到证实。

因此我们可以说，人类基因组融合了古代流传下来的基因与近代的突变，这样的融合过程处于动态平衡中：科技的进步为人类营造了新的微生物环境，改变着我们的免疫系统，这使得一些曾经的“优质”基因突变不再具有竞争力。

因此我们可以期待，无论生存环境如何演变，人类总是可以达到与环境相适应的新平衡态。即使新的平衡不会改变人类的外貌，也可以使得生活在人类纪的后代拥有与环境相匹配的新陈代谢和免疫系统。



安第斯景色一瞥:在秘鲁钦切罗，一位本地女性站在海拔将近3800米的安第斯高原。在高海拔地区，缺氧环境也对此地区基因的自然选择及个体适应性造成影响。

摄影：弗兰斯·莱门斯（Frans Lemmens），Getty Images

扩展阅读

Greenlandic Inuit Show Genetic Signatures of Diet and Climate Adaptation. Fumagalli M., Moltke I. e altri, in ?Science?, Vol. 349, n. 6254, pp.1343-1347, 18 settembre 2015.

High Altitude Adaptation in Daghestani Populations from the Caucasus. Paganani L.,

Ayub Q. e altri, in ?Human Genetics?, Vol. 131, n. 3, pp. 423-433, 2012.

Signals of Recent Positive Selection in a Worldwide Sample of Human Populations.

Pickrell J.K., Pritchard J.K. e altri, in ?Genome Research?, Vol. 19, n. 5, pp. 826-837, 2009.

La storia del corpo umano. Lieberman D., Le Scienze-Codice Edizioni, Torino, 2014.

Armi, acciaio e malattie. Diamond J., Einaudi, Torino, 1998.

深度

责任编辑：罗凯

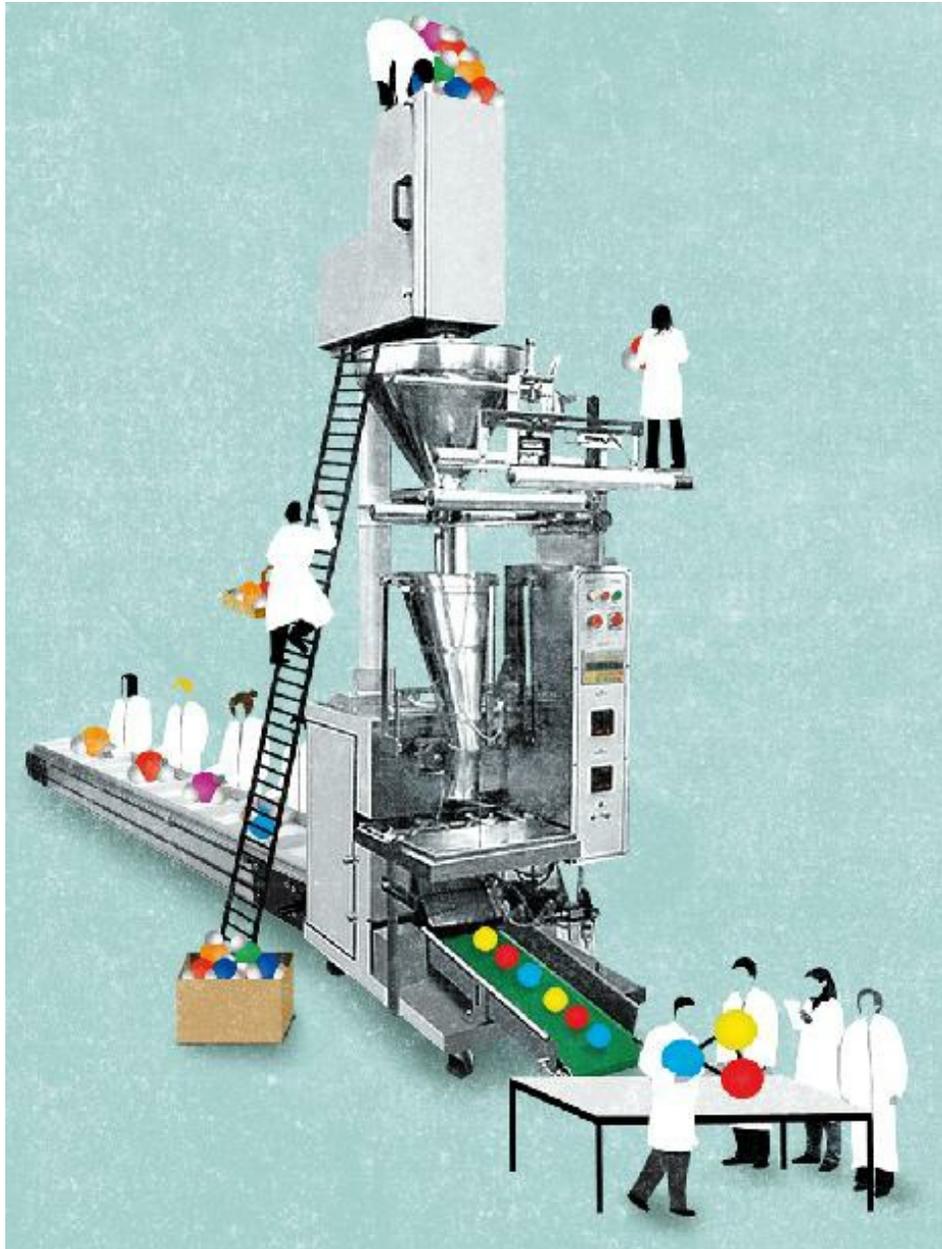
医学 MEDICINE

HIV'S ACHILLES' HEEL

HIV疫苗：黎明已来

艾滋病之所以难以治愈，是因为引起疾病的病毒会攻击人体的免疫系统。科学家新发现的一种蛋白能惟妙惟肖地模拟HIV的行为，这个突破或许会加速研发的进度，让艾滋病疫苗在近几年问世。

撰文 罗吉尔·W·桑德斯（Rogier W. Sanders） 伊恩·A·威尔逊（Ian A. Wilson） 约翰·P·穆尔（John P. Moore） 翻译 张文韬



罗吉尔·W·桑德斯是荷兰阿姆斯特丹大学医学中心的病毒学教授，同时也是纽约威尔康奈尔医学中心附属机构的教授。他的研究方向是设计新的HIV疫苗。



伊恩·A·威尔逊是美国斯克利普斯研究所整合结构生物学和计算生物学部门的教授，同时也是部门主任。他目前的研究涉及：对免疫系统与特定病毒之间的物理相互作用进行精确建模，特别是HIV、流感病毒和丙型肝炎病毒。



约翰·P·穆尔是威尔康奈尔医学中心的微生物学教授，自1988年以来，他一直从事HIV疫苗研究。



精彩速览

医疗界虽然在治疗HIV感染方面取得了很大的进展，但是仍然没能开发出一种安全有效并能广泛使用的疫苗。原因之一是，最适合用作HIV疫苗的病毒蛋白质十分脆弱，非常容易分解。令人遗憾的是，这些破碎的蛋白质本身不会诱导免疫系统产生保护性抗体，因此不能阻止HIV进入人体细胞。

经过近20年的研究，本文作者合成了一种人工蛋白质，不但不会分解，还能很好地模拟HIV的蛋白质，足以在动物实验中诱导机体产生所需抗体。不过这种蛋白质和其他类似蛋白质必须经过进一步加工，才能生产出有效的疫苗。

30多年前，科学家就已经确定HIV是艾滋病的致病元凶，但是，直到现在我们依然没有设计出有效的疫苗。虽然目前医生可利用一系列药物，使感染者的病情得到很好的控制（可达几十年的时间），但是研制出能够防止病毒感染的疫苗才是最好的武器。而且在发展中国家，药物所需的费用和其他因素会使很多人无法得到有效的治疗。一旦缺乏有效治疗，患者会慢慢发展出严重的免疫缺陷问题（获得性免疫缺陷综合征，AIDS），没几年，就会面临死亡的威胁。

疫苗开发进展缓慢并不是因为没有做出尝试，也不是缺少必要的资金支持。问题在于，与科学家研究过的其他病毒不同，HIV太不一样了。任何有效的抗病毒疫苗都必须激活免疫系统，在病毒侵入细胞，蔓延至全身之前攻击、消灭它们。但是HIV演化出了对付人体免疫系统的防御武器。它就像魔鬼一样，杀死或损伤关键的免疫细胞，而这些细胞本该调动身体发起防御反击的。它还是独一无二的伪装者，让大量研究人员投入在疫苗开发上的工作都化为乌有，没有一种疫苗能让人体迅速识别并阻止HIV变异，防止进一步感染。经过近20年的努力，我们联合组建的科研团队终于合成了一种人工蛋白质，它能帮助疫苗生产商克服过去面临的困难。我们的实验证明，这种分子能在动物体内唤起强烈的免疫反应，对抗HIV。不过，要想作为人体疫苗使用，还需要做进一步的调试，才能更有效、更好地对付多种病毒株。

后续工作还有很长的路要走，我们的实验室和其他团队已经在迅速推动相关研究，大家都信心十足，认为我们终于走上了正确的道路。

全新的结构

我们模拟的对象是HIV的囊膜蛋白质（envelope，简称Env）。现在，我们能合成比之前更接近这种物质的蛋白质了。囊膜蛋白质在HIV表面形成钉状突起，使病毒能够进入免疫细胞，比如CD4+T淋巴细胞。正常情况下，这些T细胞通过自身外膜蛋白（包括CD4和CCR5蛋白质）与免疫系统的其他部分保持通讯，囊膜蛋白质就像堡垒高处的信号塔。

当HIV企图进入免疫细胞时，它会与 CD4或CCR5蛋白质结合。囊膜蛋白质还会通过扭曲、重构自身的结构，使病毒外膜与免疫细胞的外膜发生融合。膜融合的同时，病毒就会把自己的基因释放到细胞中，生产出上亿份的病毒拷贝。组装好的病毒又会逃出细胞，蔓延到周围的细胞里，重复传染过程。

科研人员一直梦想着，只要能破解囊膜蛋白质的花招，就能预防HIV感染。其中，最合理的方法是“教会”人体免疫系统生产抗体分子，特异识别并附着在HIV的囊膜蛋白质上。理论上，这些抗体应该产生两种功效。第一，它们应该能形成屏障，使HIV不能附着在CD4和CCR5上，从而阻止病毒进入CD4+T细胞；第二，确保免疫系统其他部分迅速响应，破坏病毒并清除残留。类似的策略在其他病毒疫苗上取得了成功，比如乙肝病毒疫苗：在实验室中，研究人员用基因工程的方法得到病毒表面蛋白质，然后将它注射到人体内，这些蛋白质本身不会引发疾病（因为病毒的其他部分缺失），但是它们可以诱导免疫系统在身体中产生抗体，有病毒入侵时，通过识别类似的表面蛋白，从而快速消灭病毒。

可惜，使用标准步骤开发HIV疫苗时，科学家却总是遭遇挫折，因为它的囊膜蛋白质十分“狡诈”，一旦与完整病毒分开就迅速分解。囊膜蛋白质片段包括gp120亚单位和gp41亚单位，前者负责与CD4蛋白质结合，后者负责将囊膜蛋白质锚定在病毒表面，随后促进病毒和免疫细胞膜的融合。

你可能会认为，囊膜蛋白质的分解不是什么大问题。毕竟，gp120出问题不能与CD4信号蛋白质结合，病毒就不能感染细胞了，而免疫系统还可以识别单个gp120分子，产生抗体。不过，虽然现在仍然有研究人员在尝试使用gp120亚单位开发疫苗，但都失败了。结果已经证明，针对单个gp120蛋白质的抗体不能触发强烈的免疫应答。相反，对囊膜蛋白质的研究表明，针对整个蛋白质的抗体能更有效地消灭HIV。

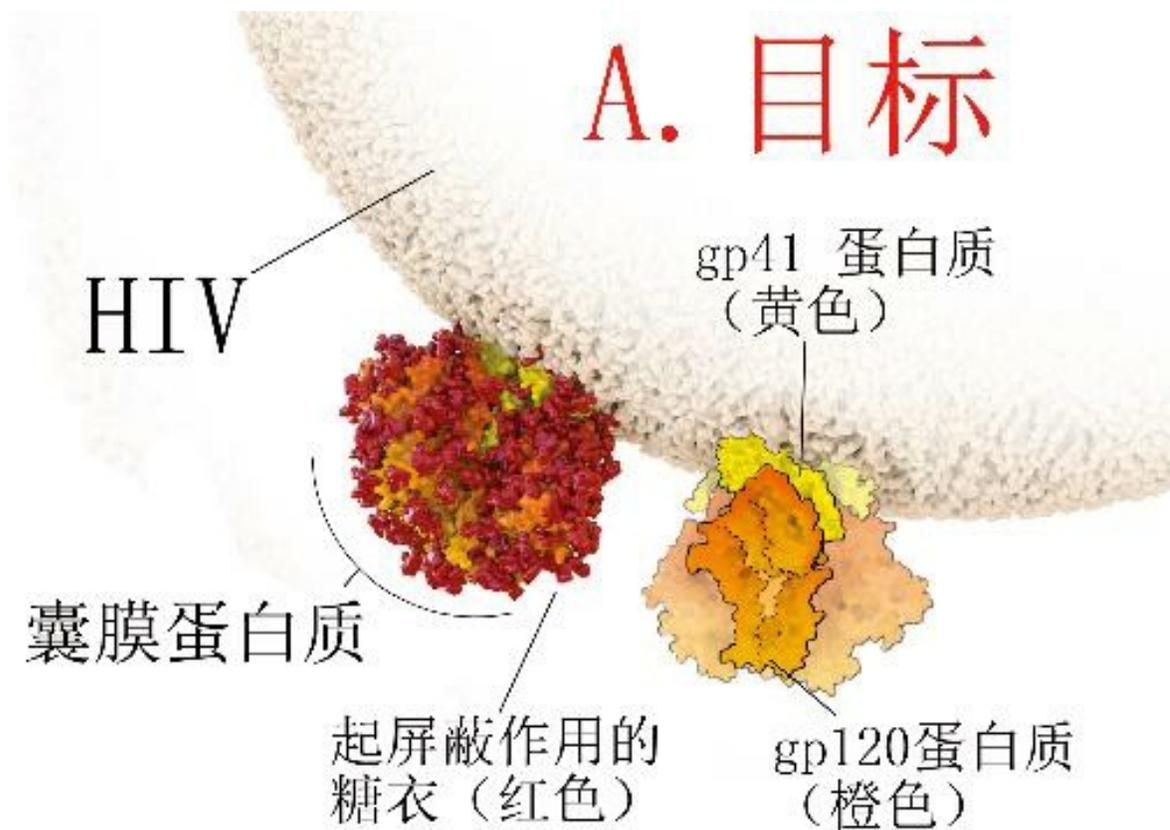
1988年，本文作者约翰·P·穆尔终于决定抛弃传统的gp120途径，转而研制基于完整囊膜蛋白质的疫苗。要开发这种疫苗非常困难，原因之一是囊膜蛋白质结构复杂：它是一种三聚体，由3个gp120亚单位和3个gp41亚单位组成。很快，罗吉尔·W·桑德斯也加入了团队，不久以后，我们的另一个主力：伊恩·A·威尔逊也加入了进来。

构筑更好的屏障

为了预防HIV感染，疫苗必须诱导免疫系统产生针对HIV囊膜蛋白质（A）的有效抗体。没有抗体，病毒就会利用囊膜蛋白质进入免疫细胞（B），开始复制。科学家推测，最成功的疫苗应该含有合成的囊膜蛋白质，能够激发免疫系统，产生有效抗体，对多种毒株都有效。他们正一步步接近目标。

A. 目标

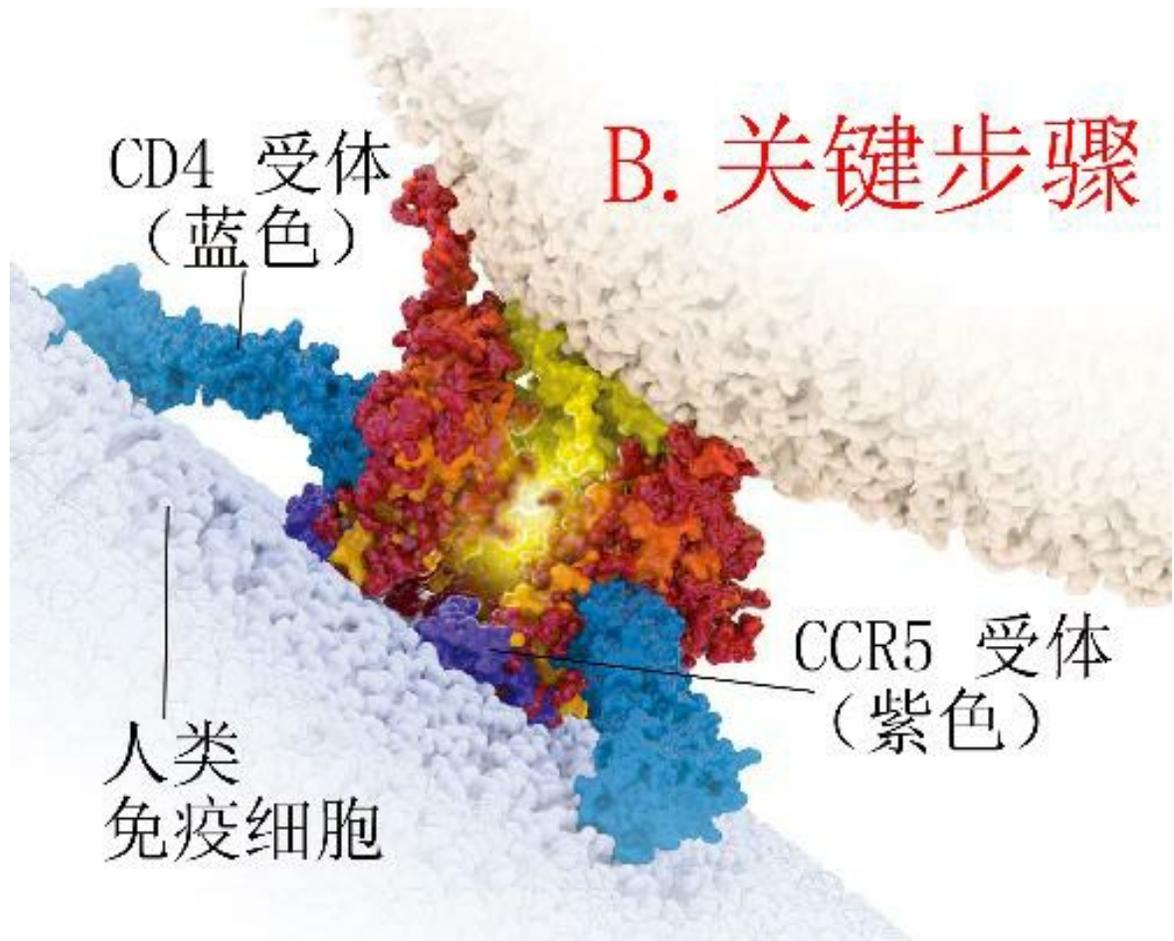
囊膜蛋白质被厚厚的糖衣遮蔽，它是一种三聚体，由三个亚基组成，每个亚基包含有gp41和gp120蛋白质。其中，疫苗研究人员旨在合成一种囊膜蛋白质，它可以让人体产生抗体，在有糖衣存在的情况下，仍能识别和依附在囊膜蛋白质三聚体上。



B. 关键步骤

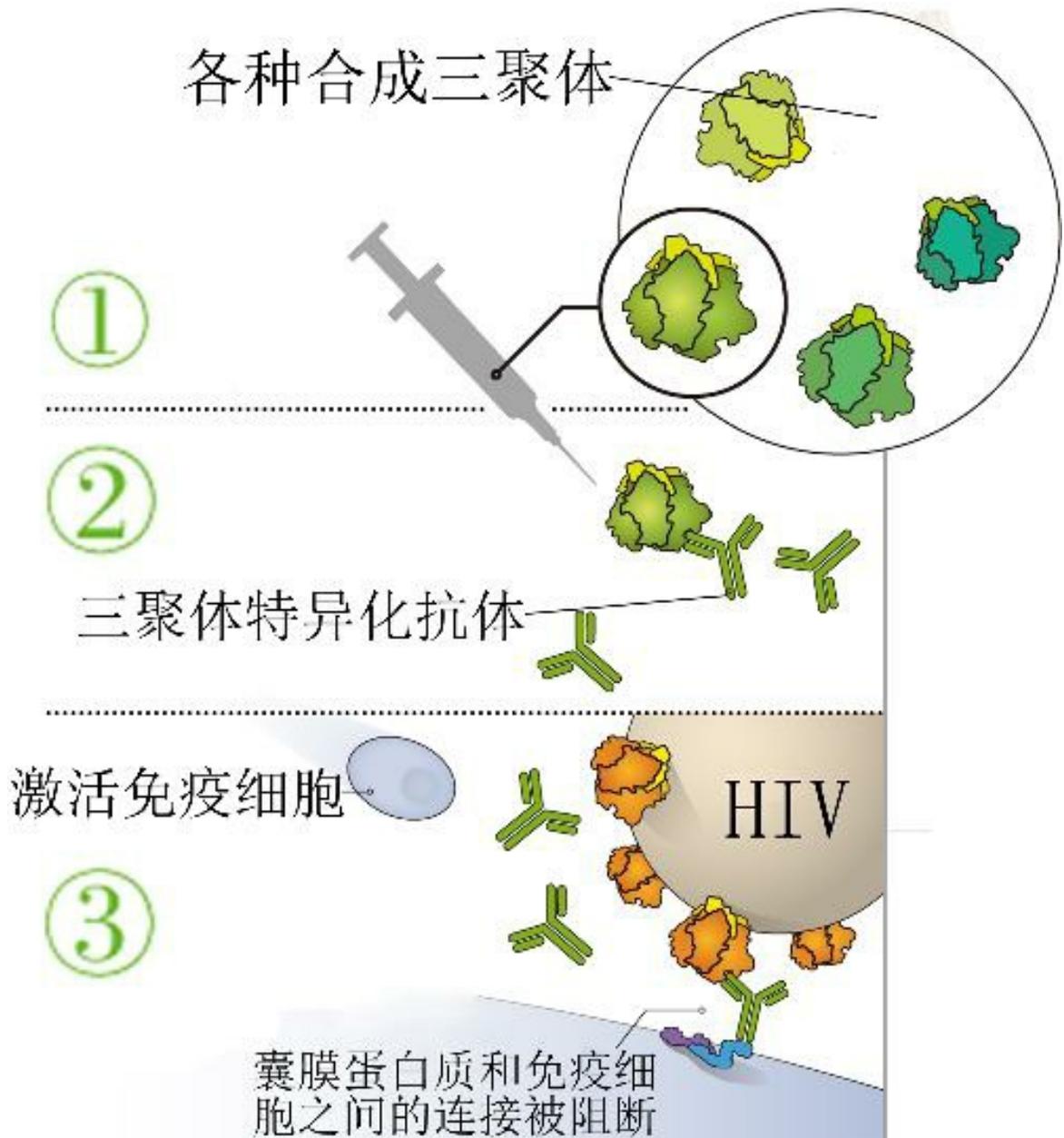
要进入免疫细胞，HIV必须通过囊膜蛋白质附着于两种分子：CD4和CCR5，然后向

细胞释放病毒基因，驱使细胞生产出更多的病毒。



疫苗设计

疫苗开发者原来试图用囊膜蛋白质的片段（比如gp120蛋白质）来激发人体产生抗体，从而达到有效对付大部分HIV毒株的目的，但都失败了。后来，科学家转变思路，转而使用整个三聚体。虽然这种复杂的分子难以合成，但是科学家最近成功了。目前他们在试验多种三聚体，看哪种能实现下述目的。



①向体内注射合成三聚体

②免疫系统对合成三聚体作出反应，产生抗体，能识别和附着在多种含有囊膜蛋白质的HIV上。

③如果HIV被识别，身体会迅速产生抗体，阻断病毒附着在免疫细胞上。抗体还能促使免疫系统产生有效的细胞反应。

对抗多方挑战

研制任何抗HIV疫苗（包括我们在研制的）都会面临多重挑战。首先，疫苗必须能刺激免疫系统产生特定种类的抗体。其中最有效的抗体能识别完整病毒（就HIV而论，抗体需要精确附着到囊膜蛋白质上），并与病毒结合，阻止病毒进入细胞。因为能与病毒结合，阻断感染途径，研究人员又把相关防御分子称为中和抗体。

然而，为了在世界范围内预防HIV感染，我们不能仅仅提高某一种中和抗体的效力，而是需要找到一种广谱疫苗：能够识别不同毒株的囊膜蛋白质，阻止它们利用CD4和CCR5进入免疫细胞。理想的中和抗体应该可以针对不同毒株中的囊膜蛋白质的相似部分。如果可能的话，最好的策略是针对囊膜蛋白质的几个不同部分，能产生不同的广谱中和抗体。

要知道HIV表面包裹着厚厚的糖衣，能让HIV躲开免疫系统，而囊膜蛋白质还隐蔽在糖衣下。尽管如此，研究人员还是希望疫苗能与囊膜蛋白质相互作用，产生抗体。其实，在没有用药时，HIV的感染过程也会刺激免疫系统，使其作出响应（包括生产中和抗体），但这种响应太缓慢和微弱了，根本不能根除HIV。人体可能需要几个月甚至是几年时间，才能知道如何制造一种中和抗体，避开或者识别HIV的伪装糖衣。可是在此期间，病毒已经毁灭了大量免疫细胞，使患者病入膏肓。



每年都有大量群众集会，呼吁关注HIV。
摄影：Ajay Verma

试验与失败

合成蛋白质三聚体能够达到我们要求的其中两项标准：不能分解；能触发针对相关HIV毒株的中和抗体。在美国国立卫生研究院（NIH）的资金支持下，我们在20年里做了许多尝试，现在，终于有了阶段性成果。

我们从一种HIV中分离出囊膜蛋白质基因，以它为蓝本合成囊膜蛋白质。为此，我们需要把囊膜蛋白质锚定到HIV表面的部分去除。在第一次尝试中，我们得到的蛋白质依然会分解。有几位科学家试图改变囊膜蛋白质的基因，从而确保三聚体的完整。不过，得到的蛋白质虽然不会完全分解，但是它们的结构与HIV上的囊膜蛋白质却大相径庭，不能诱导机体产生必需的抗体。

此后，我们不得不在与HIV结构相似的其他病毒里找寻线索。有些病毒的表面蛋白质中存在新的键，它们通常用一对硫原子把类似gp120和gp41的部分连接起来。我们在研究时，如何才能能在合成的HIV囊膜蛋白质中加入这种二硫键？到底把二硫键放在什么位置才能让连接更紧密？在反复试验gp120和gp41的组合后，我们终于找到了正确的位置。可惜，得到的三聚体还是分解了。还好这次失败的经验给了我们新的启示。

接着，我们把gp41部分的结构做了微小的改动。蛋白质都是由不同的氨基酸组成的，其中氨基酸的电荷会导致蛋白质具有独特的构象。桑德斯决定采用特殊的氨基酸置换法，稍微改造三聚体中的gp41部分。最终，他发现，用脯氨酸代替异亮氨酸后，三聚体就能紧密结合在一起。我们将这种蛋白质命名为“SOSIP”，名字本身蕴含了我们对稳定蛋白质的两个策略：开头3个字母（SOS）指的是二硫键，最后2个字母（IP）表明我们在gp41上做了关键变化。这两项关键进展终于让我们迎来了曙光。

首先，安德鲁·沃德（Andrew Ward）加入了我们的团队。此前，他在斯克利普斯研究所任助理教授，负责确定囊膜蛋白质三聚体物理结构。沃德用电子显微镜展现了合成三聚体的结构，发现它们吸引了很多脂质球（或类脂球），让自身变得很黏，容易形成像口香糖一样的凝胶体。虽然我们合成的三聚体中有一部分很像病毒的囊膜蛋白质，但是另

一部分还是会形成十分奇怪的结构。显然，我们没有制作出符合要求的钉状三聚体。

在电子显微照片的启发下，我们想出了另一种方法：截去三聚体的一部分，让它不能吸引讨厌的脂质分子。我们把这个截短了三聚体叫做SOSIP.664，这意味着，三聚体中的三个个体都是一条氨基酸长链，我们在664位进行截断。沃德在电子显微镜下看到，这种三聚体比往常更短，但更有意思，与感染性HIV上发现的钉状结构非常类似：被截去的部分经常躲藏在病毒表面下。这里的SOSIP.664还不完整，只是与一种HIV毒株的囊膜蛋白质拥有同样的氨基酸组成。我们希望进一步构建新的三聚体，让它诱导人体产生对大部分毒株都有效的中和抗体。

即使到现在也没有人真的知道，怎样才能准确制造一种三聚体，诱导人体产生广谱中和抗体。不过我们采取了一个巧妙的策略：在实验室中，先用不同的HIV诱导机体生成抗体，然后看我们合成的三聚体能否被这些抗体识别出来。由于我们不知道在囊膜蛋白质中，哪种氨基酸组成能让大多数抗体识别出来，因此只能一步一步地尝试，从来自世界各地的100种HIV里筛选蛋白质。然后，我们合成所有囊膜蛋白质的SOSIP版本，找到那个既具有钉状结构，又能与许多抗体结合的蛋白质。

还好，我们总算找到了。病毒样本编号BG505，来自一名出生在肯尼亚首都内罗毕的婴儿，当时他只有6周大，出生时就携带着HIV。这个特殊的毒株是美国弗雷德·哈金森癌症研究中心的朱莉·欧维巴（Julie Overbaugh）和她在内罗毕大学的同事们分离出来的，国际艾滋病疫苗行动组织（IAVI）也把相关的基因序列和氨基酸组成信息发给了我们，用于筛选。

另一个进展是，我们发明了一种方法，可以大量制备高纯度的三聚体BG505 SOSIP.664（简称BG505三聚体）。这就意味着，我们将有足够的样品进行动物实验，甚至把它推向临床试验。除此之外，我们还得到了三聚体的晶体，用射线衍射就能观测它的分子结构。

现在我们合成了足量的三聚体，可以注入到兔子和猴子体内，收集它们产生的HIV抗体。在接下来的研究中，我们又把这些抗体添加到由人类细胞培养的组织中，结果发现它们确实可以保护人类细胞免受BG505病毒的感染，不过，对其他毒株还无能为力。虽然现在的抗体还

无法达到临床应用的标准（它应该对绝大多数病株都有效），但是，我们已经打开了一扇门。

我们的下一步计划是在人体中重复这些试验。到目前为止，是比尔与梅林达·盖茨基金会支持了我们在蛋白质方面的多项研究。我们还与IAVI和NIH商量好，要设计和资助探索性的临床试验，到时候，可能还会招募50名左右的受试者。要知道，虽然动物试验上获得的成功给了我们希望，但这并不代表在人体上也会百分百有效。只有临床试验才能真正让我们了解，人体的免疫系统是如何应答这些人造的三聚体的。

临床试验的数据会结合威尔逊实验室获得的信息一同使用，在威尔逊实验室中我们能观察到这种三聚体到底与自然合成的包膜蛋白有多像。通过这些信息再设计新的蛋白质，我们就会越来越靠近真正能保护人体健康的疫苗了。在这个过程中，问题会一直出现，更改方案的次数也不会少。当然，这些进展让我们更深入地认识到，人体的免疫系统如何才能产生广谱中和抗体，也增加了我们应该如何递送三聚体的知识。

事实上，我们已经创建了疫苗的第一代原型，经过多次修改，就可以确定哪种配方最有可能产生有效的抗体。虽然距离最终目标还有一定的距离，到目前为止，我们在动物和细胞测试中都取得了很好的结果，这让我们相信，制造艾滋病疫苗不是不可解决的难题。

现在，各研究团队拥有SOSIP工具包，也能合成更好的蛋白质用作疫苗。目前，许多科研小组正在制作自己的钉状三聚体，从而测试各种疫苗。在HIV疫苗的研制道路上，科学家经历过太多打击了，未来几年应该是收获的时节了。

扩展阅读

A Next-Generation Cleaved, Soluble HIV-1 Env Trimer, BG505 SOSIP.664 gp140, Expresses Multiple Epitopes for Broadly Neutralizing but Not Non-Neutralizing Antibodies. Rogier W. Sanders et al. in PLOS Pathogens, Vol. 9, No. 9, Article No. e1003618; September 19, 2013. www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3777863

An HIV Vaccine: Mapping Uncharted Territory. Anthony S. Fauci in Journal of the American Medical Association, Vol. 316, No. 2, pages 143–144; July 12, 2016.

HIV vaccine research described at the National Institute of Allergy and Infectious Diseases: www.niaid.nih.gov/topics/hiv aids/research/vaccines

The Vaccine Search Goes On. David I. Watkins; November 2008.

深度

责任编辑：廖红艳

农业 AGRICULTURE

抗生素滥用调查：养殖场弥漫耐药菌

养殖场对牲畜和家禽大量施用抗生素，导致耐药细菌泛滥，随着这些动物从养殖场走上餐桌，耐药细菌也对人类造成了致命的危险。然而，当科学家试图进入养殖场进行调研时，却受到了来自养殖业界的阻挠。

撰文 梅琳达·温纳·莫耶（Melinda Wenner Moyer） 翻译 赵瑾



摄影：帕特里克·卡万·布朗（Patrick Cavan Brown）



梅琳达·温纳·莫耶是一位科学作家，她是《科学美国人》的科学撰稿人。

精彩速览

抗生素在养殖场的使用比在人类中的使用更泛滥，这或许是造成耐药菌泛滥的最大原因。

最新研究显示，耐药基因在养殖场中传播的广度和速度都远远超出了科学家的预料。

养殖产业界认为，科学家对耐药细菌的担忧被夸大了，而科学家则认为这些养殖公司正在危害公众健康。

一头猪友善地拱了拱我的屁股，我才鼓起勇气摸了摸它。在过去18个小时里，我已经看到了数千头猪，但我一直小心翼翼地避免触摸这里的任何东西。这头猪似乎对于我的拘谨不太满意。于是我用手挠了挠它粉红色、长满硬直鬃毛的头顶。它大声地对我喷了喷鼻子。



狭窄的赶猪道：在肯斯·舍特默的印第安纳州养殖场，一群刚断奶的小猪仔正迁入拥挤的新居。

这个气味刺鼻的拥挤猪圈所在的养殖场，位于美国印第安纳州的法兰克福镇，这是一座距离印第安纳波利斯西北45英里（约72千米）的寂静农业小镇。这个养殖场每年大约会饲养3万头猪。养殖场的主人——迈克·比尔德（Mike Beard）正站在我身旁。然而，这些猪并不属于比尔德，它们属于一个名为“TDM养殖场”（TDM Farms）的生猪养殖公司。比尔德与他们签订了生猪饲养合同，他帮公司将14天刚断奶的小猪仔饲养到6个月大后，就用卡车把它们运到肉类加工厂，变成人们餐桌上的猪排、香肠和里脊。这个12×60米的猪圈饲养了1100头猪。比尔德向我解释，由于公司支付给他的费用是按照他所提供的场地大小来计算，而不是饲养生猪的数量来计算，“所以对于公司来说，饲养生猪的数量越多，成本越低。”

那天傍晚7点半，拖货车还会送来400头小猪仔。比尔德将给它们喂食TDM批准的含有抗生素的饲料，只有这样它们才能在这个遍地尿尿的拥挤养殖场健康长大。由于抗生素能让猪吃得更少但长得更快，所以抗生素的使用早已是养殖场的一贯做法。

但这一作法有个可怕的弊端，这也是我不太愿意触碰这些猪的原因之一。抗生素似乎正将无辜的养殖场动物变成制造疾病的工厂。这些动物成为了致命微生物的源头，例如对甲氧西林（methicillin）具有耐药性的金黄葡萄球菌（*Staphylococcus aureus*），即MRSA，它对多种主要的抗生素都具有耐药性，已经给医护人员造成了很大的麻烦。起初，这些药物在养殖场中或许还可以发挥作用，但部分具有耐药基因的微生物存活下来并将耐药性传给更多细菌。最新研究显示，赋予细菌耐药性的DNA片段很容易在不同菌株中流通，这一发现令人担忧。科学家仅仅开车跟在运送鸡的卡车后，就能在他们车里的空气中采集到具有耐药性的微生物。

2016年早些时候，科学家发现，一种可以让细菌对抗“最后一种抗生素”（粘杆菌素）的基因已经开始在美国传播，宾夕法尼亚州的一名妇女所感染的细菌就具有这种基因。

这一新发现让原本就担心抗生素耐药性的科学家更加忧心忡忡：在养殖场中，抗生素的大量使用正在瓦解我们治疗细菌感染的能力，而这是人类最了不起的医学进步之一。科学家认为，这一最新研究显示，细菌的耐药性的传播范围比他们预想的还要广泛。该发现也进一步证实了养殖场的耐药细菌与人类餐桌上出现的耐药细菌之间的联系。仅2014年一年，制药公司就在美国售出了9000多吨医用抗生素，用于肉用动物的养殖，这比用于人类的抗生素多了三倍。如果这些保护性药物对人类失去了作用，那么一些看似轻微的小毛病（如耳朵感染、割伤、支气管炎）未来就可能成为致命疾病。

然而，农业界则认为这些担忧被过分夸大了。美国动物卫生研究所（Animal Health Institute）是一个代表兽用医药公司的商业联盟，其负责科学和国际事务的副总裁理查德·卡内瓦莱（Richard Carnevale）谈道：“我们认为，在动物养殖中使用的抗生素对于人类健康的威胁，目前已被过分夸大了。”他和另外一些业界人士指出，研究人员还没有直接证据显示，在养殖场使用抗生素会引发人类的耐药细菌感染。目前很

多医院流行的耐药细菌感染从未被发现与养殖场或食用肉类有关。

科学家则认为，养殖业才是夸大其词的那一方，并认为这些养殖公司为了保护自身利益，甚至一手造成了目前学术界还无法证实这一相关性的局面。美国明尼苏达大学的传染病医生詹姆斯·约翰逊（James Johnson）目前正从事耐药性病原体的研究工作，他说：“坦白地讲，这让我想起了烟草业、石棉业和石油业。危害公共健康的工业，在人类历史上可说是由来已久。”他与其他研究人员承认，要将所有的点联系起来的确不容易，但他们认为养殖业故意使调查变得更加困难。一些大型肉类公司吩咐与其合作的养殖场不要让研究人员靠近——借口是，他们需要将饲养的动物与外界病菌隔离，这让科学家根本无从验证科学假设。在美国肯特州立大学（Kent State University）研究新兴感染（emerging infection）的流行病学家塔拉·史密斯（Tara Smith）告诉我：“这些公司一方面要求我们证实所有的病菌传播过程，另一方面却绑住我们的双手。”

我参观了比尔德的以及另外两个养殖场，希望能找出真相。我决定追随科学家的脚步，从养殖场到餐盘一路追踪耐药细菌，以了解在饲养猪、奶牛、鸡或火鸡的过程中使用抗生素，是否真地会给我们带来灾难；又或者说，我们无需惧怕这些无辜的动物及其体内数十亿的细菌。



猪肉生产：在舍特默的养殖场，载有雄性种猪的小车被推过母猪所在的猪舍。种猪的出现和气味能够刺激母猪，为人工授精做准备。

养殖场内外的MRSA

18个小时前，我驾车进入了位于印第安纳州提普敦（Tipton）的“舍特默优质猪肉”养殖场（Schoettmer Prime Pork）。首先迎接我的不是养殖场饲养的生猪，也不是刺鼻的屎尿味，而是一块黄色的警示牌，上面写着：“警告：疾病预防程序。禁止进入”（WARNING:DISEASE PREVENTION PROGRAM. DO NOT ENTER）。由于我是受邀前来造访的，就无视这一警告直接开了进去，将车停在一辆车牌为“吃猪肉”（EATPORK.）的福特金牛座汽车后。基思·舍特默（Keith Schoettmer）是这个养殖场的主人，也是我这次参观的导游，在我右车门外向我招手。

舍特默向我解释，入口处那块吓人的告示牌是为了预防他每年饲养的2.2万头猪感染病菌。他谈道：“对于养猪场来说，‘小心预防抵过十倍治疗’这句老话再确切不过了。”舍特默日渐稀疏的白发与和蔼的笑容让我想起约翰·麦科恩（John McCain，曾于2008年参选过美国总统），尽管他的中西部口音非常明显。为了防止我身上携带的任何微生物让他养的猪生病，舍特默在带我到处参观时，叫我穿上防护外套和塑料鞋套。

细菌到处都有，在养殖场它们更是无所不在，因为每个人实际上是走在牲畜的大便上（虽然我在参观舍特默的养殖场时，都包裹在塑料防护套中，但几个小时后当我进入酒店房间时，仍旧是臭气熏天）。就像小学校园中的细菌，这些粪便中的细菌随处传播：当来访者抓挠动物的头时，它们钻进来访者的指甲缝中，它们也沾满了养殖场工作人员的手。（我没有看到这里有任何人戴手套。）

荷兰的养猪业规模庞大，2005年荷兰研究人员确认，与牲畜相关的MRSA菌株是导致荷兰养猪的人及其家人生病的罪魁祸首。MRSA能够导致致命的皮肤、血液和肺部感染；这种菌株已在医院流行了几十年，最近这种病菌开始影响医疗系统以外的人群。截至2007年，荷兰1/5的MRSA人类感染病例都是通过牲畜传染的。2008年，荷兰政府颁布了严格措施，以减少抗生素在养殖场的使用量，2009年至2011年期间，抗生素的使用量减少了59%。丹麦是另一猪肉出口大国，在1999年就已禁止

对健康猪施用抗生素。总体来说，欧洲对于兽用抗生素的管制比美国严格。

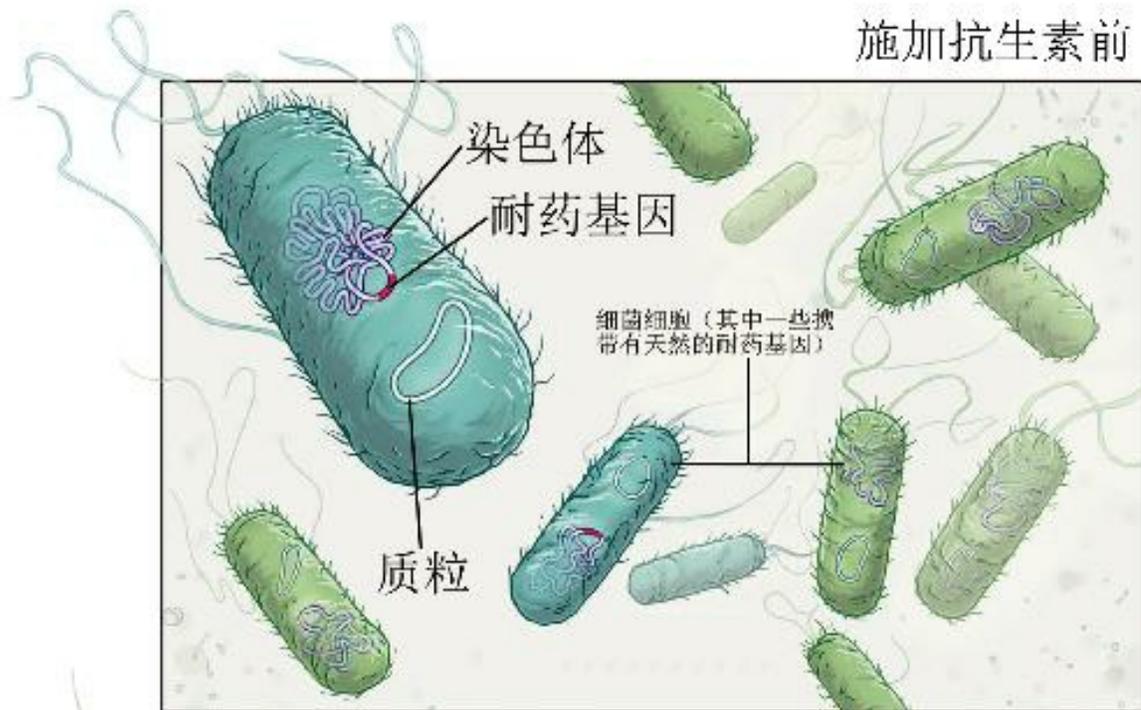
目前，科学家已经知道，牲畜的MRSA在美国也有传播。当时还在艾奥瓦大学的塔拉·史密斯（Tara Smith）听说荷兰的情况后，决定对几个与她的同事（一名兽医）有联系的艾奥瓦州养殖场进行MRSA检测。史密斯回忆道：“在第一轮测试中，我们对270头猪进行了采样；我们只是用棉花棒拭抹猪的鼻子，并不清楚检测结果会是怎样的。结果我们发现，大约70%的猪检测结果为MRSA阳性。”

史密斯和同事接连发表了一系列让人不安的研究结果，证实MRSA已遍布全美的养猪场。他们发现一个大型养殖场64%的工人鼻腔中都有MRSA，还发现另一养殖场的饲料甚至在还没从送货卡车卸货前，就已含有MRSA。在另一养殖场下风方向200多米的地方，史密斯仍能在空气中检测到MRSA。科学家还在家禽养殖场周围发现了其他耐药细菌：美国约翰斯·霍普金斯大学布隆伯格公共卫生学院（Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health）的研究人员开窗驾车沿着德玛瓦半岛（Delmarva Peninsula），跟在马里兰州和弗吉尼亚州运送鸡的卡车后，他们在车内的空气中和驾驶座旁的汽水罐上都检测到了具有耐药性的肠球菌（enterococci），这类细菌每年在美国造成的细菌感染病例约有两万例。

动物的粪便还会用作庄稼的肥料，这意味着粪便中的细菌实际上会播洒到种植食用作物的土壤中。2016年的一项研究报道，在施用养猪场和乳牛场粪肥的土壤中，耐药基因的相对丰度增加了4倍。在宾夕法尼亚州进行的一项研究显示，那些接触施用猪粪庄稼最多的人（例如居住在靠近这些田地的人），感染MRSA的几率较接触最少的人要高30%。比尔德的副业是给庄稼施猪粪，他将6500加仑（约24.6立方米）的猪粪装入一辆油罐卡车，给附近的庄稼施肥。正如他所说，这一作业过程受到严格控制。他必须对土壤进行检测以确保田地能够吸收粪肥的养分；施肥时，还得足够慢，以免肥料流失。而肥料流失是施用粪肥所面临的一个主要问题。研究人员认为，2006年的那次菠菜被大肠杆菌污染的事件，就是由于庄稼的灌溉水被附近养殖场的猪牛粪便污染导致的。那次大肠杆菌爆发让3人丧命。

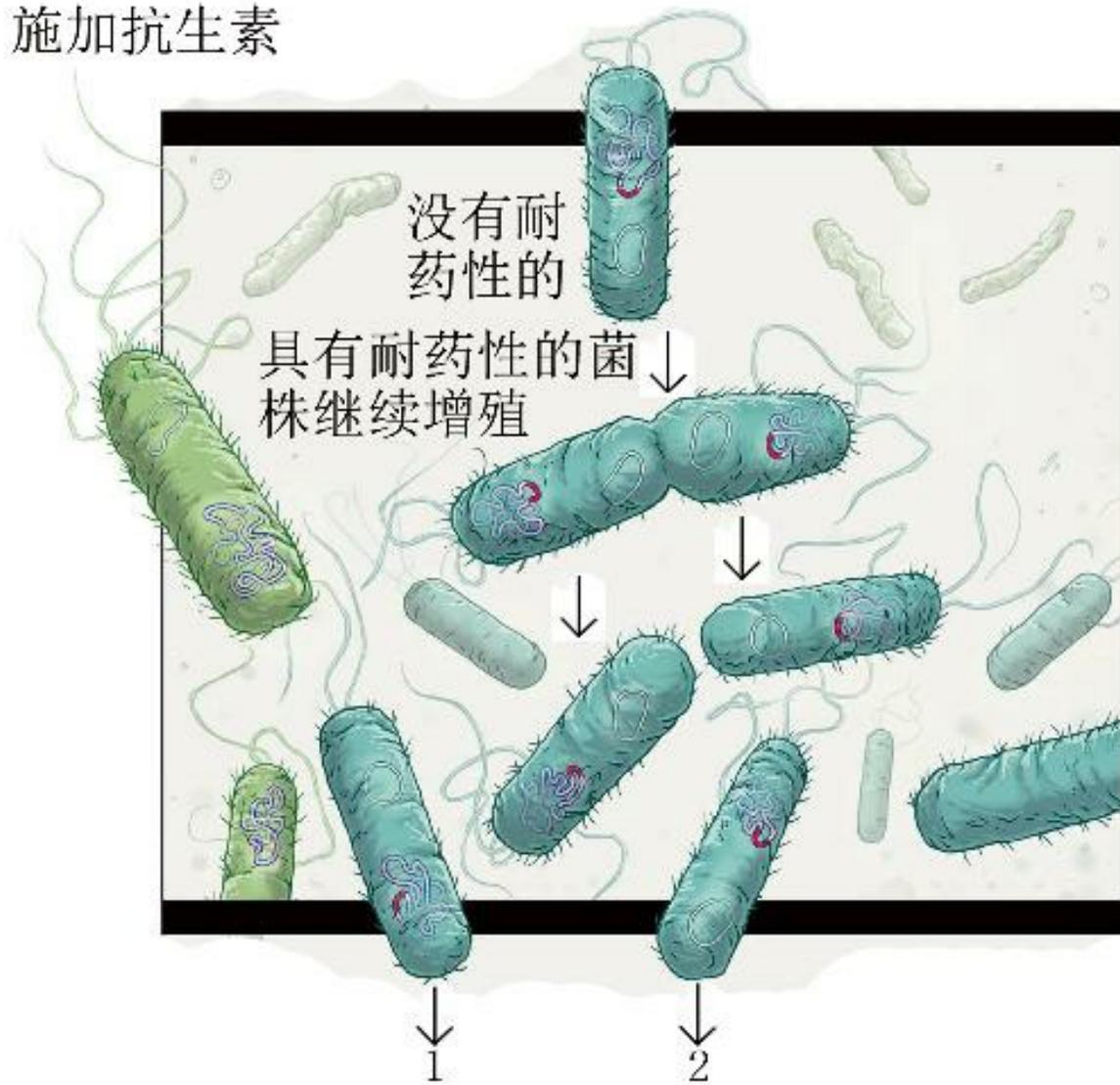
抗生素耐药性

超级细菌的诞生



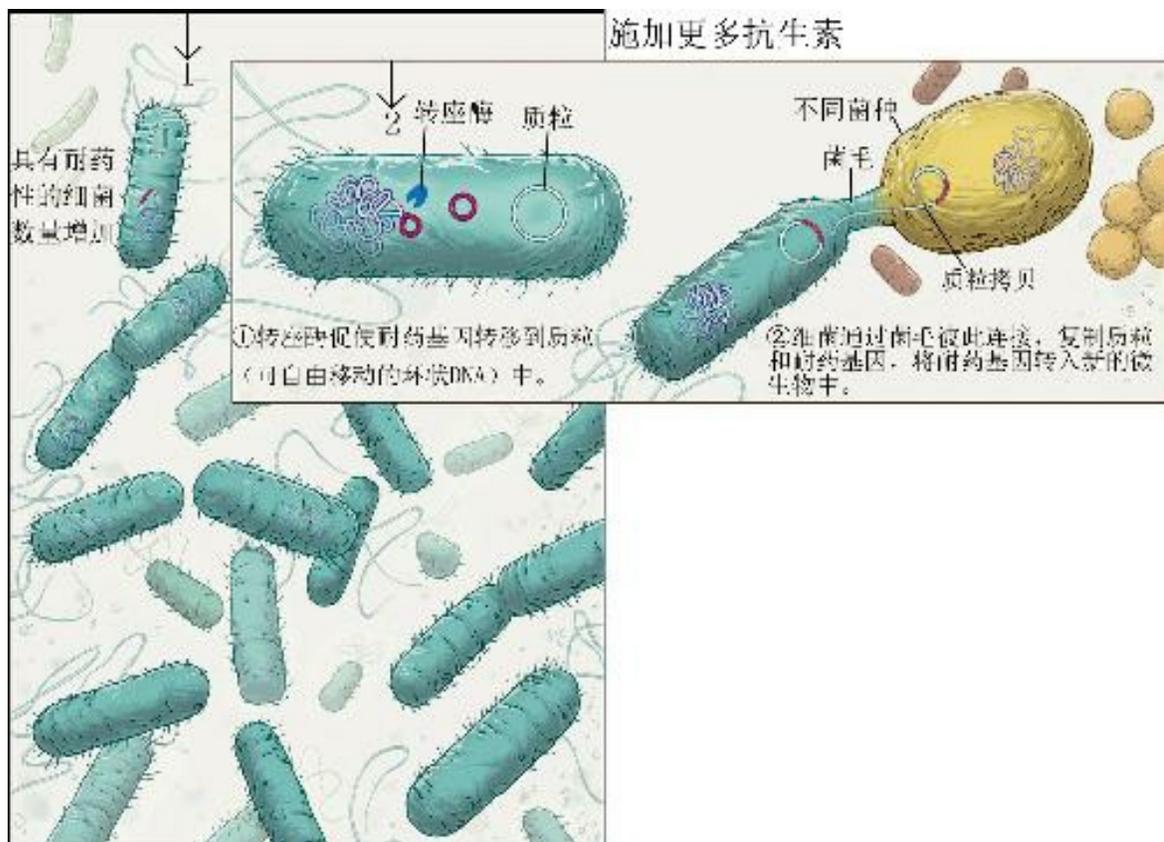
抗生素是用来杀菌的。但在与细菌的博弈过程中，它们慢慢也成为改变细菌组成的一种选择性力量，为那些具有耐药基因的细菌创造有利的生存条件。这些基因通过一种叫做“垂直转移”（vertical transfer）的过程传给子代细菌，使更多具有耐药基因的子代细菌得以生存。然而，更大威胁来自另一种叫做“水平转移”（horizontal transfer）的传播过程。实际上，耐药基因能够“跳”入其他菌株或其他种类的细菌，广泛传播。当这些细菌感染人类时，一些抗生素将不再有效。

施加抗生素



垂直转移

初次使用时，抗生素通常能十分有效地杀死细菌（如大肠杆菌或金黄葡萄球菌）。但一些细菌可能由于碰巧携带耐药基因（红色），而幸存下来。虽然大部分敏感细菌被杀死，但这些幸存下来的少数细菌会把耐药基因随染色体传给后代。那些获得耐药性的子代细菌又会将这些基因一代一代传下去。抗生素的持续使用就像筛子一样，杀死没有耐药基因的细菌，保留那些具有耐药性细菌。这样一来，菌群中耐药细菌的比例就会逐渐增加。



水平转移

最新研究发现，耐药基因也能很快地从一个菌种或菌株传给另一个菌种或菌株。这个过程开始与垂直转移一样，携带耐药基因的细菌存活下来。这些基因能够在一种酶①的剪切作用下，从染色体中转移出来，并插入一种叫做质粒的环状DNA中，这些质粒能够从一种细菌转移到另一种完全不同的细菌②中。

制图：马修·通布利（Matthew Twombly）

质粒上的耐药基因

不管对于人类还是牲畜来说，抗生素的耐药性都是一个很麻烦的问题。但是我们怎么能确认这两者之间存在相关性，以及这种耐药性会因为养殖场使用抗生素而加剧呢？1975年，动物卫生研究所就提出了这一问题，并邀请美国塔夫茨大学（Tufts University）的生物学家斯图亚特·利维（Stuart Levy）来找出答案。利维及同事给附近养殖场的150只从未使用过抗生素的鸡，喂食含低剂量四环类抗生素的饲料，并观察结果。一周以内，这些鸡的肠道内几乎所有的大肠杆菌都对四环素产生了耐药

性。三个月内，这些鸡体内的细菌对4种其他类型的抗生素也产生了耐药性。4个月后，该养殖场其他没有喂食四环素的鸡，体内的细菌也对四环素产生了耐药性。利维及同事在对该养殖场主人体内的细菌进行检测时，发现其中36%的细菌也对四环素产生了耐药性，而他们邻居体内的细菌则只有6%具有耐药性。当时，这一研究结果让所有人都很吃惊。

利维回忆道：“当时人们普遍认为给动物施用低剂量的抗生素，可以避免它们产生耐药性。这让我们的研究结果变得更有意思，也出人意料。”（动物卫生研究所从此再没有资助其他研究，来验证利维他们的发现。）

一项研究显示，一般养殖场饲养的生猪体内，超过90%的大肠杆菌对四环素具有耐药性，而在不使用抗生素的养殖场中，生猪体内也有高达71%的大肠杆菌具有耐药性。这是由于耐药基因非常容易传播。微生物学家兰斯·普里斯（Lance Price）是美国乔治·华盛顿大学米尔肯公共卫生研究所抗生素耐药性行动中心的负责人，在2012年的一项重要研究中，他与同事在欧洲和美国的牲畜饲养者及其饲养的生猪体内，收集了88个MRSA样本，然后对这些样本进行全基因组测序与分析，进而追踪牲畜的MRSA的演化起源。他们的研究显示，MRSA菌株源于人体内对甲氧西林敏感的金黄葡萄球菌。这一菌株传到牲畜中后，很快获得了耐甲氧西林和四环素的基因，并进一步传播开来。

最初，耐药性在菌群中由亲代向子代缓慢传播——耐药细菌的子代也具有耐药性。但是最新的研究显示，随着时间推移，这些耐药基因会转移到一些DNA片段上，而这些DNA片段能够在细菌的基因组中移动，最后很多耐药基因进入一种叫做质粒（plasmid）的环状DNA中。这些质粒很容易在不同种类的细菌中传播。在2014年的一项研究中，一个国际研究团队从人和鸡身上采集具有抗生素耐药性的大肠杆菌样本。虽然这些细菌的遗传组成各不相同，但其中很多细菌都含有携带着相同的耐药基因、DNA序列几乎完全相同的质粒。耐药性的传播并非细菌本身所为，而是由这些可以在不同细菌间传播的质粒造成的。

耐药性能以这种方式传播（即微生物学家所谓的“横向传播”）的事实改变了一切。这就好像医生突然发现亨廷顿病不只是由父母传给子女，还会通过人与人之间的接触来传播。这还意味着一种细菌在某处接

触到一种抗生素后，有可能改变其他地方的、其他类型的细菌对抗生素的反应。

细菌获得耐药性，通常需要付出一定代价：突变会消耗微生物用于繁殖的细胞能量。虽然个体得以生存，但整个群落的生长速度会因此放缓。所以当细菌不再需要抵抗抗生素时，它们就会在多个世代后遗弃它们的耐药基因。然而最近的研究显示，当细菌反复接触抗生素时，它们就会演化出可以保持高繁殖速度的耐药突变——这样一来，就算环境中没有抗生素了，它们还是会保留这种耐药基因。蒂姆·约翰逊（Tim Johnson）是美国明尼苏达大学兽医学院的微生物学家，他谈道：“真正可怕的是，我们已经看到在病人的肠道内，质粒有时会从一个细菌转到另一个细菌，并发生DNA重组。这就好像这些细菌在宿主体内发生即时演化，变得越来越高效。”

多种耐药基因也可能会出现在同一个质粒中，因此在一种耐药基因给予细菌生存优势的同时，也可能会引入其他耐药基因。目前我们还不清楚这种“共选”（co-selection）机制的范围和程度；蒂姆·约翰逊认为，“或许还有更多我们根本没有意识到的机制存在”。然而，搞清这些问题，对我们了解耐药性的传播及威胁，将会是至关重要的。由于有些在养殖业中使用的抗生素，很少或根本没有用于人类，因此养殖业经常利用这一点做文章，坚称对动物用药导致的耐药性，不会对人类造成威胁。但是加拿大圭尔夫大学安大略兽医学院（University of Guelph's Ontario Veterinary College）研究抗生素耐药性的流行病学家斯科特·麦克尤恩（Scott McEwen）认为，共选机制的存在意味着，随着细菌对一种动物用抗生素耐受程度的增加，它们对其他抗生素（如青霉素）的耐药性也可能提高。

更糟的是，最新研究还显示，当细菌接触到抗生素时，质粒在它们之间的传播速度会加快。这就好像微生物在面对共同的敌人时，团结一致，与战友分享自己拥有的最强武器。而且一旦这些细菌具备了耐药性，抗生素只会更利于它们生存。耐药性细菌感染之所以在医院如此普遍的原因之一，就是医院频繁使用抗生素——这些药物杀死不具耐药性的细菌，从而让耐药性细菌在无竞争对手的情况下大量繁殖，使其更容易污染医疗仪器，感染医疗人员和其他病患。



远离危险：在舍特默的养殖场，小猪正在接种疫苗（1）。警示牌告诫生人勿入，因为养殖场的来访人员可能导致动物感染疾病（2）。四五个月大的小猪在猪圈中休息（3）。

别无选择

面对这些可怕的事实，大家可能会认为美国政府一定在加强对农用抗生素的管制。从某个角度来说，的确如此。美国食品及药品管理局（FDA）在2012年和2013年颁布了两项自愿性质的指导建议，并将从2017年1月开始逐步推行。在这些文件中，FDA要求兽用医药公司修改医用抗生素的标签，注明这些药不能用于在减少喂养量的情况下催肥牲畜；还要求这些公司停止在柜台随意售卖可掺入动物饲料和饮用水中的抗生素，只能凭兽医的处方销售。

大多数公司已经同意遵循这些指导原则。但现在的问题在于，很多养殖场（包括舍特默和比尔德的养殖场）在很久以前就已经停止使用抗生素来促进生长了。他们说，目前抗生素主要用于疾病预防和控制，而这一用途将不受新规影响。只要兽医同意，养殖场仍然能够大规模使用抗生素，预防他们所害怕的细菌感染。2015年，舍特默被美国猪肉生产商理事会（National Pork Board，这个理事会是美国国会为了推广这一产业而创立的，由美国农业部监管）冠以“美国年度猪农”（America's Pig Farmer of the Year）的称号，他说：“我想你会发现，抗生素的使用在养殖业中其实相当普遍。”他还指出，他们的目标是，确保那些常见的病原体在他们的养殖场没有立足之地，这样他们饲养的猪就不会感染这些病菌。

根据美国农业部2012年的数据，为了预防或控制疾病传播，接近70%的美国养猪场会给牲畜大规模喂食抗生素；而几乎所有的养殖场都会在某些时候，给生猪喂食添加了抗生素的饲料。同样的，在美国的大型养殖场中，超过70%的牲畜都喂食了医用抗生素，而且其中20%~

52%的健康鸡有时也会喂食抗生素。然而与大公司签约的饲养人员，可能甚至都不知道他们在使用抗生素，因为他们所使用的饲料都是经过预先处理的。当我向比尔德询问，他饲养的猪是在什么年龄开始使用抗生素的，他说他必须咨询TDM才能知道。

在拥挤的养殖场中，确实需要给牲畜施用抗生素，因为饲养环境让它们很容易生病。美国堪萨斯州立大学的兽医史蒂夫·德里茨（Steve Dritz）说：“高密度养殖加大了消灭病原体的难度，也增加了感染风险。”我在这些养殖场中所看到的猪彼此挤靠，一些猪还在粪便中打盹或拱食。近几十年来，美国的牲畜养殖场的规模一直在不断扩张：1992年，饲养生猪超过2000头的养殖场只占全部养殖场的30%，但到2009年，这样规模的养殖场在全美的养猪业中已占86%，这在很大程度上也是因为很多小型养殖场纷纷倒闭。这些饲养人员面临的经济压力很大。生猪价格一路滑落，但与饲养人员签约的公司却一直坚持要求他们升级已经很昂贵的设备，并承担升级费用。2014年，只有56%的中型养殖场称自己可以获利。

蒂姆·约翰逊说：“在这样的运作方式下，饲养人员必须保证在管理和环境方面不出任何差错，才有可能杜绝疾病的传播。否则，他们饲养的牲畜就可能死掉。使用抗生素并非饲养人员的过错，是行业的压力让他们别无选择。”



跳出固有模式：印第安纳州的七子养殖场没有在饲料中加入抗生素，而是借助空间优势来控制疾病在牲畜间传播。

养殖业的对抗

参观完舍特默养殖场后的清晨，就在我前往比尔德养殖场前，我下楼到酒店的餐厅吃自助早餐。我站在香肠前，心想“这其中有没有来自舍特默养殖场的猪肉呢？”舍特默将其饲养的大部分生猪都卖给了加工和售卖猪肉给当地零售商的印第安纳包装公司（Indiana Packers Corporation）。很有可能，我面前的这些肉饼就是用舍特默的猪肉做成的。

我虽然不太情愿，但还是拿起了一个肉饼。我想，我因此感染耐药性细菌的几率会有多少？牲畜被宰杀时，内脏上的细菌会飞溅到肉块上。2012年的一项研究中，FDA的科学家对全美各地零售的生肉进行检验，结果发现，84%的鸡胸肉、82%的火鸡绞肉、69%的绞牛肉和44%的猪排都被大肠杆菌污染。火鸡绞肉中超过一半的细菌对至少三类抗生素具有耐药性。如果这些肉没有煮熟就被食用，或者处理完生肉的人没有好好洗手，这些微生物就可能导致食物中毒。

但最新研究显示，这些食源性病原体还能通过其他方式让我们生病。普赖斯及同事专注研究一种叫做“机会主义病原体”（colonizing opportunistic pathogen, COP）的大肠杆菌。他在2013年发表的论文指出，这些细菌最可能通过食物进入人体，但最初它们并不会致病，只是在肠道中繁殖，与那里其他数十亿的有益细菌共生。随后，这些大肠杆菌可能感染身体的其他部分（例如尿道）并导致严重疾病。1999年至2000年，导致美国加利福尼亚大学伯克利分校妇女尿道感染的就是这种大肠杆菌，研究人员认为这可能是这些妇女食用受污染的食物导致的。

近年来，美国疾病控制与预防中心（CDC）已经成功确认了约一半的大规模食源性疾病的污染源，但要确认慢性感染的源头，则困难得多。即使那天早上我吃的那根香肠被耐药性COP污染了，我或许也永远不会知道。如果几个月后我发生了严重的细菌感染，我永远也不可能证明那是由于这顿早餐造成的。我甚至可能根本就不会想起这顿早餐。

问题的关键在于，要追查耐药性细菌感染的源头虽然非常困难，但

并非不可能。麦克尤恩说：“从养殖场到餐桌是一段漫长的旅程，不管从时间上、空间上，还是从其他方面来说，都是如此。”一个汉堡中的肉可能来自100头不同的牛，所以很难确定污染的源头。而且科学家不仅需要追查污染源头，还要弄清楚动物的饲养方法（是否使用抗生素，使用抗生素的时间和用量，以及使用的目的）是否会导致或加重这些细菌的感染。养殖界认为，养殖场细菌只会对在养殖场工作或生活在养殖场附近的人造成危险，不会对普通大众造成危害。而这也是科学家想进入养殖场，将养殖场里的细菌与那些导致大规模疾病的细菌进行比对的原因。

然而，并没有人在收集这类信息。FDA兽医医学中心科学政策部门的副主任比尔·弗林（Bill Flynn）承认：“从养殖场收集到的数据十分有限。”2015年9月，FDA、美国农业部和CDC召开会议，制订计划开展养殖场数据的收集工作，但是他们申请用于实施这一计划的资金并未获得批准。实际上，FDA在2016财年共申请了710万美元用于动物抗生素耐药性的研究，但最终一分钱也没有得到。

学术界的科学家也急切地想要进入养殖场，对这些牲畜进行研究，但除非他们有自己的渠道，否则很少能获准进入这些养殖场。当史密斯希望从工业化的火鸡养殖场采集样本时，她联系了艾奥瓦州的每一个注册的火鸡养殖场。她回忆到：“没有一个养殖场让我们去采样。”由于无法从活猪身上直接采样，为了研究养殖场中生猪携带的细菌，普赖斯及同事只好从北卡罗来纳州的屠夫那里购买猪鼻子，再用棉签采集拭样。

还记得约翰斯·霍普金斯大学的研究人员为了采集研究样本，驾车尾随运送肉鸡的卡车吗？他们之所以用这种方法来收集样本，也是不得已而为之，因为研究人员无法进入养殖场采样，没有其他方法靠近这些鸡。

反对科学的并不是这些饲养牲畜的养殖场，而是他们的雇主。肉类加工公司指示其属下的养殖场不得允许外人进入。美国90%~95%饲养家禽和48%饲养生猪的养殖场都只是履行合同的饲养者（比尔德就是其中一位）——他们都是为泰森食品公司（Tyson Foods）、史密斯菲尔德食品公司（Smithfield Foods）或裴顿农场有限公司（Perdue Farms）等大公司饲养牲畜。签约养殖场之所以听命于这些公司，是因为他们在开始养殖时都欠下了巨额债务（开办新的家禽或生猪养殖场需要花费大约

100万美元)。如果不与这些公司签订合同，他们根本什么钱都赚不了。而很多时候，养殖场没有选择雇主的余地，因为一个地区通常只有一个肉类加工公司。

《科学美国人》从一名养殖场主手里获得了一份他与前雇主——鸡肉生产商Pilgrim's Pride签订的合同，合同中包括保护动物的条款，要求养殖场“限制非必要的人员、车辆和设备”在养殖场中活动。我造访比尔德和舍特默的养殖场是事先获得全美猪肉生产商理事会批准的。但几年前，西弗吉尼亚州的家禽饲养者迈克·韦弗（Mike Weaver）邀请了一名记者到他的养殖场采访，之后被其雇主发现，他说：“我被迫进行了‘生物安全休业’，新一批小鸡的引进被推迟了两周，这大概给我造成了5000美元的损失。”普赖斯作为一名科学家，在多年前说服了好几位农夫让他进入他们的养殖场，但是他们之后就失去了与肉制品公司的合同。从此以后，他就再也没能进入任何一家养殖场。

尽管我们多次提出邀请，但代表农场主的商业团体——美国农场事务联合会（American Farm Bureau Federation），以及世界上最大的生猪养殖和猪肉加工企业——史密斯费尔德食品公司都不愿对本文发表评论，而且也不愿讨论产业界应不应该阻止科学家进入养殖场的问题。

无论是什么原因造成研究数据缺乏，这种状况都让养殖产业界更容易与相关规定抗衡。1977年，就在利维的研究发表之后不久，FDA宣布，出于安全考量，将禁止在动物饲料中掺入多种抗生素。此后的39年间，养殖产业界一直在与这一计划对抗，业内人士提出，并没有确凿的证据能够证明，抗生素的使用会威胁人类健康。弗林说，养殖产业界的说法最终导致FDA改变策略，转向推出自愿性的指导建议。

但是，很多人批评，FDA指导建议中的“抗生素用于疾病控制时可不受限制”，是一个明显漏洞。H·摩根·斯科特（H. Morgan Scott）是得克萨斯农工大学（Texas A&M University）的兽医流行病学家，他说：“FDA的指导建议颁布后，抗生素的总用量会减少吗？我认为绝对不会。”实际上，自从FDA公布指导建议以来，售卖给养殖场的抗生素每年都在增加。2014年，一个名为皮尤慈善信托基金会（Pew Charitable Trusts）的非营利组织分析了287种受指导建议影响的抗生素产品的标签，结果发现农夫仍然能以同样的剂量使用其中1/4的抗生素，而且只要他们声称是用于预防和控制牲畜疾病，在使用时间上就没有任何限

制。虽然动物卫生研究所的卡内瓦莱认为，“FDA的指导建议可能从整体上改变了抗生素的使用方式，但是否会影响抗生素的总用量还需要进一步观察。”

即使要求购买抗生素时必须出示兽医处方，也不一定会减少抗生素的使用。因为许多兽医就是依靠开具处方和售卖抗生素来牟利的，他们中有许多人与食品业或制药业也有紧密联系。2014年，路透社的一项调查报告指出：近年来，在那些建议FDA允许对牲畜使用抗生素的兽医中，有一半的人接受了制药公司的捐款。詹姆斯·约翰逊（James Johnson）说：“很多兽医都与养殖产业界有关系，存在利益关联，他们受惠于大型生产商，因此更倾向于保持现状。”

为了规避这些问题，美国多位立法委员，包括纽约州众议员、微生物学家路易丝·斯劳特（Louise Slaughter）曾提出过对养殖场的抗生素使用进行严格管制的议案。十多年来，在每次国会会议上，斯劳特都会提出她的《抗生素医学用途保留法案》（*Preservation of Antibiotics for Medical Treatment Act*）。目前已有454个组织，包括美国医学会（American Medical Association）都支持这项提案。但提交给众议院能源与商务委员会（House Energy and Commerce Committee）下属的卫生委员会（Health subcommittee）后，该议案从未得到过投票表决的机会。

目前，美国宾夕法尼亚州的议员蒂姆·墨菲（Tim Morphy）是其中一位不支持这一提案的委员。他的新闻发言人卡莉·艾奇逊（Carly Atchison）说，虽然墨菲公开反对继续在肉用动物中使用低剂量的抗生素，并且警告公众，耐药细菌会造成食品安全问题，但他认为“对于医用抗生素在农业和养殖业中的使用问题，这一提案并没有找到平衡点”。在卫生委员会中，业界的反对力量也不容小觑。根据非营利组织“负责任的政治中心”（Center for Responsible Politics）的数据，全美养鸡协会（National Chicken Council）在2015年支出的64万美元的游说费用中，一部分就是用于反对管制抗生素使用的立法，动物卫生研究所也为此花费了13万美元。

“负责任的政治中心”的数据还显示，在卫生委员会的委员中，超过一半的人共计接受了来自兽药公司或牲畜养殖组织超过1.5万美元的竞选捐款。“食品和水观察组织”（Food and Water Watch）是一个位于美国

华盛顿特区的非营利组织，该组织的副主任帕蒂·罗弗拉（Patty Lovera）说：“那些商业组织一直在那里说：‘你无法证明是我们让细菌产生了耐药性’。这在很长一段时间里，让整项工作处于胶着状态。”

在草原和树林中放养

离开比尔德的养殖场后，我又开了两个小时的车来到最终目的地——印第安纳州罗阿诺克的七子养殖场（Seven Sons Farms）。这个养殖场的猪在草原和树林中放养，完全不使用抗生素。10年前，七子养殖场还和我之前探访的两个养殖场很相似：每年为泰森食品公司饲养2300头生猪，频繁使用抗生素。但养殖场担心，使用抗生素会危害人的健康，所以决定做出改变。2000年，七子养殖场转型为所谓的再生多样化养殖场（regenerative diversified farm）。在这个550公顷（5.5平方千米）的养殖场上，目前饲养了400头猪，2500只下蛋的鸡和120头喂食草料的牛。

布莱恩·希斯菲尔德（Blaine Hitzfield）在养殖场主的7个儿子中排行老二，他带我在养殖场参观。在半英亩（约2000平方米）的土地上，我看到放养的猪不超过12只。希斯菲尔德没有叫我穿防护服，他也不担心我是从其他养猪场直接过来参观的。他解释道，他们养殖场的动物比那些圈养的动物要结实，这里饲养的动物不仅拥有更大的活动空间，断奶年龄也较迟，因此免疫系统也更强大。经常接触大自然对动物的健康也有助益。他说：“阳光具有很好的杀菌作用，泥浆也能保护动物免受寄生虫的困扰。”（如果七子养殖场饲养的猪生病了，他们也会使用抗生素给它治疗，但之后会将其拍卖掉，而不会作为他们养殖场的产品出售。）他的话并非空口无凭，而是被研究证实的。2007年，美国得克萨斯理工大学（Texas Tech University）的研究人员发现，与室内养殖的动物相比，在户外长大的猪，抵抗细菌感染的免疫细胞（嗜中性粒细胞）的活跃程度会比较高。

希斯菲尔德承认，未来的产业化养殖场不太可能采用七子养殖场的作法。他谈道：“传统农夫会说，‘这简直就是无稽之谈，根本就行不通，而且也无法规模化’，在一定程度上说，他们的话并没错。”虽然七子养殖场只是一个小型的运作模式，但希斯菲尔德认为如果投入多一些时间和研究，要将这一模式规模化也并非不可能。”他还补充道：“以每

公顷（1公顷为0.01平方千米）面积计算，我们的生产效率其实比以前要高出许多。”

一些产业化养殖场正在做出改变，这很大部分要归功于消费者的诉求。这些养殖场并没有缩小规模，向多样化经营发展。但2016年2月，斐顿农场有限公司宣布，饲养的鸡将会有2/3不再使用医用抗生素；泰森食品公司承诺，将在2017年9月前，不再在美国饲养的肉鸡中使用人用抗生素。与饲养猪、牛或火鸡相比，在肉鸡的养殖中停止使用抗生素要容易得多，因为这些肉鸡的饲养周期很短。

但是消费者的需求也迫使一些大规模的猪肉生产商缩小养殖规模。斐顿农场有限公司副总裁兼猪肉生产部总经理巴特·维托里（Bart Vittori）说：“虽然做起来并不容易，但这是消费者的要求。现在的消费者比过去更精明，拥有更多信息，也会提出更多问题。”斐顿农场有限公司就因此设立了一个叫做“科尔曼天然食品”（Coleman Natural Foods）的部门，这个部门所饲养的猪，喂食的是不含抗生素的植物性饲料。

“尼曼牧场”（Niman Ranch）是一个生猪、牛羊和蛋鸡养殖的养殖网络，由超过725个遍布全美的家庭养殖场组成，来自这些养殖场的肉类也不含抗生素。

不过，来自这些养殖场的产品价格高昂，很多美国人目前都还负担不起。但是随着消费者对不含抗生素的肉类的的需求增加，供应量也会提升，根据基本经济学原理，价格也该会随之下降。

科学家对于抗生素耐药性还有很多疑问。如果食品公司继续拒绝外界进入养殖场，这些问题可能永远都不会有答案。即便如此，现有的大量证据也表明，未来的养殖业很可能会减少抗生素的使用，并依赖创新措施或传统方法（如为动物提供足够的生长空间）来控制细菌感染。养殖场必须做出改变，否则，越来越多的食源性细菌和越来越严重的耐药性，将使研究人员和普通大众陷入更深的忧虑。

扩展阅读

Methicillin-Resistant Staphylococcus aureus in Pigs and Farm Workers on

Conventional and Antibiotic-Free Swine Farms in the USA. Tara C. Smith et al. in PLOS ONE, Vol. 8, No. 5, Article No. e63704; May 7, 2013.

Prevalence of Antibiotic-Resistant E. coli in Retail Chicken: Comparing Conventional, Organic, Kosher, and Raised without Antibiotics. Version 2. Jack M. Millman et al. in F1000Research, Vol. 2, Article No. 155. Published on-line September 2, 2013.

Multidrug-Resistant and Methicillin-Resistant Staphylococcus aureus (MRSA) in Hog Slaughter and Processing Plant Workers and Their Community in North Carolina (USA). Ricardo Castillo Neyra et al. in Environmental Health Perspectives, Vol. 122, No. 5, pages 471–477; May 2014.

Livestock-Associated Staphylococcus aureus: The United States Experience. Tara C. Smith in PLOS Pathogens, Vol. 11, No. 2, Article No. e1004564; February 5, 2015.

Detection of Airborne Methicillin-Resistant Staphylococcus aureus Inside and Downwind of a Swine Building, and in Animal Feed: Potential Occupational, Animal Health, and Environmental Implications. Dwight D. Ferguson et al. in Journal of Agromedicine, Vol. 21, No. 2, pages 149–153; 2016.

The Enemy Within. Maryn McKenna; April 2011.

Pills for Pigs: Just Say No. Keeve Nachman; Forum, March 2016.

深度

责任编辑：罗凯

人类学 ANTHROPOLOGY

神话故事：一部人类迁徙史？

不同的文明都会孕育各自不同的神话，仔细分析就会发现，这些故事的原型有着千丝万缕的联系。结合神话研究和统计学的最新进展，科学家甚至可以借此一窥人类从旧石器时代以来的迁徙史。

撰文 朱利安·杜荷（Julien d'Huy） 翻译 叶宣伽





朱利安·杜荷是法国索邦大学历史系的博士生。他的研究内容涉及多个学科，在与非洲研究院（Institute of African Worlds）合作后，他试图通过生物学中的系统发生分析法和计算机建模综合对比研究神话故事，从而分析其中的现实依据。

精彩速览

长期以来，学者们一直想弄清楚为什么时空差异巨大的不同文化会涌现出极其相似的神话故事。

全新的研究模型引入了演化生物学中概念性的统计分析工具，试图理清神话的历史。

系统演化树揭示了神话故事缓慢的演变轨迹，并指出，无论是走出非洲或是其他全球范围的迁移，这些故事的演化与大规模的人类迁徙活动同步。最新的研究为一些史前神话的原型故事及距今15 000年前的人类迁徙（由亚欧大陆迁往南美洲大陆）提供了新的研究观点。

让我们从一个耳熟能详的希腊神话谈起：阿尔忒弥斯（Artemis）是月亮与狩猎女神，也是纯洁的年轻女性的保护神，她让所有恶徒感到畏惧。严厉的阿尔忒弥斯要求自己的侍女严格保持贞洁，其中就包括善良美丽的卡利斯托（Callisto，意为“最美丽的”）。然而，天神宙斯看上了这个年轻的姑娘，不仅骗取了她的贞操，还让她为自己生下了一个儿子，取名为阿尔卡斯（Arcas）。宙斯的妻子天后赫拉在得知这件事后十分嫉妒，她将卡利斯托变成了一只棕熊，放逐到荒无人烟的深山之中。而另一方面，随着时间的流逝，阿尔卡斯渐渐长大成人，成为了一名猎户。一天，阿尔卡斯在打猎途中突然见到一只棕熊张开手臂跟他打招呼。阿尔卡斯并不知道这只棕熊是他的母亲，还用矛瞄准了这只猎物准备攻击。所幸，宙斯及时赶到，这才避免了悲剧的发生。之后，宙斯

将卡里斯托变成天上的大熊星座（Ursa Major），而阿尔卡斯则被变为小熊星座（Ursa Minor），在美丽的夜空中陪伴在母亲的身边。

上面这个故事是来自希腊的版本，在美国东北部易洛魁人（Iroquois）的口中，有关大熊星座的神话又是另外一副样子：三位猎人同时捕猎一只棕熊，秋天的树叶也被棕熊伤口流出的鲜血染红；走投无路的棕熊终于爬上高山，一跃跳进了天空；而猎人们紧随其后，和棕熊一起化作了天上的大熊星座。楚科奇人（Chukchi，西伯利亚人的一支）的版本讲述的则是一位追逐驯鹿的猎人。在西伯利亚的另一支乌戈尔部落（Finno-Ugric tribes），故事中被追逐的猎物却变成了麋鹿。

尽管具体的动物和星座名称可能会有变化，但故事的基本框架并没有很大的区别。之前提到的这些传说都被人们归为一类：与狩猎活动有关的天文神话（Cosmic Hunt）。这类神话在15000年前广泛流传于非洲、欧洲、亚洲和美洲。这类神话的每一个版本都共享着同一个核心故事：某些人或某只动物追逐或杀死了一只或多只动物，然后这些生物（可能是捕猎者，也可能是猎物）最终化为天上的星宿。

无论是民俗学家、人类学家，还是人种学家、语言学家，大家都被同一个问题困扰了很长时间：为什么时间或地域跨度极大的两个文明，会出现情节复杂却惊人一致的神话故事？近几年，比较神话学（将不同文化的神话进行比较，以找出它们共同的主题和特点的学科）的一项研究方法或许可以解答这个问题。这项研究运用了生物学家们追溯生物演化关系时用到的概念工具——系统发生分析（phylogenetic analysis），神话学家据此寻找同一神话故事不同版本之间的传承联系，构建神话故事的家族树，最终理清神话的演化过程。

我个人在这方面也做了一些研究，除了上文提到的与狩猎活动相关的天文神话（Cosmic Hunt），我还分析了其他几类主题和情节一直重复出现的神话故事——类似皮格马利翁（Pygmalion）的，或独眼巨人波吕斐摩斯（Polyphemus）的故事。

皮格马利翁是希腊神话中塞浦路斯的国王，也是一位雕刻家，他根据自己心中理想的女性形象创作了一个象牙塑像，并爱上了他的作品。而波吕斐摩斯则是希腊神话中食人的独眼巨人，在这类故事里，人类（奥德修斯）误入怪物（独眼巨人）的巢穴，却在动物群的掩蔽下，从

怪物的眼皮底下逃出生天（奥德修斯和他的手下藏在羊的肚子下面安全逃出）。

我们的调查为研究神话故事的变迁提供了令人信服的新证据，佐证了这些故事的流传与人类的全球扩张行动是密切相关的。除此之外，相关研究还为这些神话故事的起源提供一种颇具洞察力的新见解。我将那些人们口耳相传的故事、传说与旧石器时代的洞穴壁画联系起来。我希望，对于史前神话原型的不懈探究，能让我们逐渐理解祖先们的精神世界——当时的智人（*Homo Sapiens*）还不是地球上唯一的人类物种。

关于捕猎的神话

在白令海峡两岸，天文狩猎故事相当普遍。这可能是因为在公元前28000至公元前13000年间，白令海峡还是一片连接两岸的陆地。目前，最可靠的一种假说认为，美洲大陆的神话是由第一批到达美洲的古代亚欧人带入的，而这些人就是美洲人的祖先。

为了进一步验证这种说法的可靠性，我建立了一个相关的系统发生模型。生物学家利用系统发生分析研究不同物种间的演化关系，根据衍生或近裔特征的相似度构建能够反映生物亲缘关系远近的分支状图表——或用更通俗的说法，构建演化树。神话故事是运用这项分析方法的极佳素材，因为它的演化过程和生物的演化历程实在太相似了：它们都经历着相对缓慢、渐进式的演化，并在扩散、传播的过程中，在原有基础上得到或是失去了某些部分。我们可以清晰地看到神话故事在不同地域流传时，核心故事有所增减。

2012年，我根据民俗学者和人类学家收集、出版的天文狩猎神话（*Cosmic Hunt*，包括18个不同版本），构建了一个大致框架。我把每个故事都按照它们的内容分成若干离散的故事要素——或用神话学的专业术语来说，我拆分了每个故事的“神话元素”（*mytheme*）。“神话元素”这个术语源自法国后期结构主义人类学家克劳德·列维-斯特劳斯（*Claude Lévi-Strauss*），类似于生物学中“基因”的概念，神话元素代表了神话中具有可传承特性的最小结构单元，在世代之间保守传承、鲜有改变。天文狩猎神话中常见的“神话元素”有：打破禁忌的女人、阻止猎手的神祇、将动物化作星宿的神明等。在这项分析开始的时候，我建立了一个包含44种不同神话元素的数据库；对每一个不同版本的故事，我

都会用“1”（含有）“0”（不含有）来指代某个神话元素的状态。通过这种代换，就可以应用一系列统计学上的算法，追踪神话演变的方式，并构建它们的家族谱系树。

根据最新版本的系统发生树，我们发现与狩猎相关的不同天文神话抵达美洲大陆的时间节点各不相同。可以看到，神话家族树中的一支告诉我们希腊版本与阿尔刚琴（Algonquin）版本间存在着内在联系。而家族树的另一分支则向我们讲述了有关白令海峡的背景：迁徙的远古人类带着他们的故事跨过当时还是陆地的白令海峡，分两批次，将这些故事带往了遥远的因纽特人聚居地和美洲大陆的东北部；还有一些演化分支显示，与其他由亚入非（或入美）的故事相比，一些特定版本的故事的传播时间要更靠后。

随迁徙演变

根据演化生物学家的观察，大多数物种在演化史中，绝大部分的时间都不会产生很大的变化。显著的、演化意义上的改变十分罕见，但大多都会快速出现，短时间内就形成了一个新的物种。这种生物现象被称为“间断平衡”（punctuated equilibrium）。同样的理论似乎也可以应用在神话故事上：当人类迁徙到新的环境，来自竞争对手、环境变更、文化差异的挑战，会使神话故事快速演化出不同的版本。而在此之后，神话故事的内容就会在相当长的时间里保持稳定。

所以总的来说，哪怕有些神话故事千年不变，当人类面临历史上规模宏大的迁徙行动时，它们的结构往往也会发生变化。现在，让我们走进历史上最让人着迷的神话之一——皮格马利翁的故事。

希腊神话中的皮格马利翁是一名来自塞浦路斯的英俊雕刻家。塞浦路斯当地女子整日纵情声色，沉溺于缺乏真爱的肉欲之中。皮格马利翁认为她们的行为是对爱情女神阿弗洛狄忒（Aphrodite）的亵渎，所以对那些庸脂俗粉毫无兴趣。皮格马利翁全身心投入雕塑工作，终于完成了一座女人的象牙雕像，他给雕像起名为“伽拉忒亚”（Galatea），意为“沉睡的爱”。皮格马利翁为雕像披上华丽的衣衫、戴上精美的珠宝，每天亲吻她、爱抚她、对她说话。在一场祭祀阿弗洛狄忒的庆典里，皮格马利翁前往女神的神庙，向神灵祭献了一头公牛，并祈求神灵赐予他一位和他挚爱的雕像一样的妻子。阿弗洛狄忒被他真挚的爱情所打动，

当皮格马利翁回到家中后，他照例亲吻了伽拉忒亚，突然惊讶地发现，以往冰冷的雕像有了温暖的体温。阿弗洛狄忒给这座雕像赋予了真正的生命。

罗马诗人奥维德（Ovid）将这则传说写进了他的作品《变形记》，这则动人的故事就这样随着奥维德的作品流传千古，激发了其后无数作家、剧作家及艺术家的创作灵感。

根据我的研究结果，皮格马利翁式（下称“皮式”）神话的变迁与早期人类由非洲东北部向非洲南部的迁徙有着密切联系。先前的遗传学研究显示，这次迁徙大约发生在2000多年前。沿着这条迁徙线路，不同的部落流传着不同的皮式传说：一名男性爱上了自己雕刻的女性壁画；壁画上的女性获得生命；嫁给了自己的主人。更离奇的是源自南非文达的一个故事，在这个故事中，一个雕刻匠雕刻了一个木制的女人，在她复活之后，部落的酋长却想霸占她。雕刻师不愿交出这个复活的生命，他把这个女人掷向地面，让她重新变回了木头。

在构建演化树的过程中，我发现，如果分别使用不同版本的皮格马利翁神话作为演化树的起点，会产生非常有趣的结果。我分别使用了源自希腊和马达加斯加岛巴拉人（Bara）的故事版本作为构建的起点，这两个地方的地域跨度非常大，几乎是这套故事中最遥远的两个地方了，但两个版本彼此间的结构却非常相似。值得注意的是，希腊和巴拉的环境都是相对封闭的：巴拉坐落在一座小岛上，那里既不允许大规模的人口扩散，也不利于神话的多元化；而历史上希腊也鲜有接触非洲传说的机会。不过，今天的人们已经发现，这两个版本都与更早时期撒哈拉地区柏柏尔人部落里的故事极为相似。

基于数据和经验的双重分析，这两个地方（希腊和巴拉）的版本很有可能是根据柏柏尔人的传说改编的。柏柏尔人的版本疑似这两个故事的源头，它最早出现在距今3000~4000年前，不过，现在也只能从中看出一个非常古老的梗概：男人用树干制作了一个雕像来缓解他的孤单；他和其他男人为它穿上人类的衣物；由于某些神灵的帮助，雕像获得了生命，变成了一个年轻的美丽女子；尽管别的男人都渴望娶她为妻，但这个美丽的女人最终成为了创造她的男人的妻子。当然真正的神话原型应该远比这生动得多，至少在复杂度上应和它的改良版本持平。

神话重构

在亚欧大陆和美洲大陆上，将星座描述为遭受捕猎的动物的天文狩猎神话（Cosmic Hunt）广为流传。比较神话学家运用演化生物学家研制出的分析工具，比较了在文化差异巨大的文明间的神话故事。出乎意料的是，这些神话故事极为相似，仅有细微差异。为了应用这项生物学的方法，研究者将不同大类的神话拆分成微小的结构单元：“神话元素”（mytheme，类似于“基因”的概念），随后他们记录了这些元素在不同故事中的出现次数。通过比较故事中所含元素的相似性，并用信息技术分析后，可以揭示哪些故事是最初版本，故事的核心又是如何随着时间和地点的变化逐渐演化的。下图显示的是一系列天文狩猎神话的构成元素，这些不同版本的故事与大熊星座、小熊星座、猎户座和昴星团相关。



图片来源：“A Cosmic Hunt in the Berber sky: a phylogenetic reconstruction of Palaeolithic mythology,” by Julien d’Huy, in *Les Cahiers de l’AARS*, No. 16; 2013

图中蓝色虚线标注出的是一条普及度较高的故事线，这条故事是美洲东北部德拉瓦族印第安人流传下的神话故事，该故事描述了大熊星座如何获得熊的外形。德拉瓦人的这个故事版本与亚欧、美洲其他文化族群的天文狩猎神话有许多相同的神话元素，包括猎物是一只大型哺乳动物（1）；追猎者位于天上或进入天空之中（29）；动物在化为星座或上天之前依旧存活（49）；故事中主要的星座之一是北斗七星（86）。

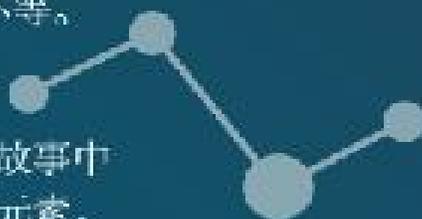
如何解读这幅示意图：

图中 88 个圆圈中的每一个都代表了一个作者所定义的天文狩猎神话中的“神话元素”（故事组成单元）。我们把这些元素粗略地按常识分为了五大类（在这段文字的右边完全罗列了所有元素）：动物（□）、有关捕猎的细节描写（\）、动物与捕猎者的变化（○）和故事中显现的特定星座（+）。

圆圈的大小和透明程度显示了该神话元素在不同神话故事中出现频率，出现次数从 1 到 43 不等。



直线连接了在同一神话故事中出现的神话元素。



圈外环的颜色显示了与每一个神话元素相关的神话出现的地区。以右图为例，这个神话元素在所有神话故事中出现了三次，一次来自亚那（橙色），另两个故事来自亚洲（淡绿色）。



- 非洲
- 美洲沿海高原 / 不列颠哥伦比亚
- 美洲大盆地 / 西南部
- 美洲东南部
- 亚洲
- 北极地区
- 巴斯克
- 希腊
- 半亚那

- 1 - 猎物是一只大型哺乳动物
 2 - 猎物是一只食草动物
 3 - 猎物是一只食肉动物
 4 - 猎物是一只育角的动物
 5 - 猎物是一只两栖类动物
 6 - 猎物是一只鱼
 7 - 猎物是一头猪
 8 - 猎物是一只麝鹿
 9 - 猎物是一只驯鹿
 10 - 猎物是一只鹿
 11 - 猎物是一只驼鹿
 12 - 猎物是一只骆驼
 13 - 猎物是一只山地羊
 14 - 猎物是一只羚羊
 15 - 猎物是一只斑马
 16 - 猎物是一头猪
 17 - 猎物是一头公牛
 18 - 猎物是一只熊
 19 - 猎物是猎人的母亲，只是被变成了一头熊
 20 - 猎物是一只有多条腿的动物
 21 - 猎物是一只家禽
 21 - 猎物是一只家畜
 22 - 故事中只有一只动物
 23 - 故事中有四只动物
 24 - 故事中有七只动物
 25 - 故事中有两只动物
 26 - 故事中有三只动物
 27 - 星座团形似一只动物
 28 - 动物与它们的所有者相关
 \ 29 - 猎手位于天上或进入天空之中
 \ 30 - 只有一名猎手
 \ 31 - 有两名猎手
 \ 32 - 有五名猎手
 \ 33 - 有三名，或至少三名猎手
 + 34 - 猎手变成了猎物星座
 \ 35 - 有七名猎手
 + 36 - 猎手变成了猎户星座的宝剑
 \ 37 - 一位女性打破了禁忌
 \ 38 - 猎物捕获了太阳
 \ 39 - 一只动物由于它的傲慢获得了惩罚
 \ 40 - 一位女性自由从天而降，并开辟了通天之路
 \ 41 - 一位带有神性的个体阻止了猎人
 \ 42 - 猎手狩猎到了秋天
 + 43 - 猎手星座是猎物
 + 44 - 猎户座一等星是猎物
 + 45 - 仙后座是猎物
 \ 46 - 猎手是一只猎狗
 \ 47 - 猎手们来自同一家族
 \ 48 - 一只动物追逐着另一只追逐着动物的动物
 49 - 动物在化为星座或上天之前依旧存活
 50 - 动物在化为星座之前已经死去
 51 - 一个人类将他的兄弟们变成星座
 52 - 猎人们为了一位亲人化作星座
 53 - 一位神灵将一位美丽的少女变成一头熊
 54 - 一位神灵将一只动物变成星座
 55 - 一只狗被变成星座
 + 56 - 北斗七星由七只不同的动物变成
 + 57 - 昴宿星团是猎手们
 + 58 - 猎户星座的三颗星星是三只不同的动物变成的
 + 59 - 变成大熊星座和小熊星座的是同一家族的成员
 + 60 - 一只动物化为了北斗七星的一星
 + 61 - 两只动物化为了北斗七星的两星
 + 62 - 四只动物化为了北斗七星的四星
 + 63 - 七只动物化为了北斗七星的七星
 + 64 - 猎户星座的三颗星星由同一只动物分成
 + 65 - 猎户星座的一颗星星由三位猎手者分成
 + 66 - 邻近猎户星座的一颗星星是猎手者掷出的射向猎物的宝剑
 67 - 动物受伤流出的油脂或鲜血落于大地，变成了别的东西
 68 - 流出的油脂变为了蜜汁
 69 - 滴下的鲜血染红了秋天的落叶
 + 70 - 猎手变成了北斗七星的勺柄
 71 - 流出的油脂变成了雪
 + 72 - 猎手们成为了北斗七星
 + 73 - 动物们成为了北斗七星中的四星
 + 74 - 猎手们成为了北斗七星中的五星
 + 75 - 被切下的四肢化为了冬天才能看到的星座
 + 76 - 一只动物化为了北斗七星
 + 77 - 北斗七星是一幅绘画
 + 78 - 三颗星星是动物的影子
 + 79 - 北斗七星的五等星是一只狗
 + 80 - 北斗七星的五等星是一件物品
 + 81 - 北斗七星的五等星是一支箭
 + 82 - 北斗七星的五等星是一把刀
 + 83 - 北斗七星的五等星是一只猎狗
 \ 84 - 故事的主人公为人类带来了温暖（热量）
 \ 85 - 化为星座的动物被飞镖或是箭射中
 + 86 - 故事中主要的星座之一是北斗七星
 + 87 - 故事中主要的星座之一是猎户星座
 + 88 - 故事中主要的星座之一是昴星团

走出洞穴的怪物

在使用基于信息技术的系统发生分析法后，现在，我们能够识别不同的文化群体间彼此借鉴神话的这种行为，也能评估相关行为产生的影响。

根据从欧洲和南美收集到的24个故事版本和79个神话元素，2012年，我构建出了初版的波吕斐摩斯神话的系统发生模型。紧接着，我开始逐步扩大我的工作：在参考了一系列用英语、法语、德语、西班牙语发表的研究结果之后，数据库中的故事版本增加到了56个，神话元素的数量也扩展到了190个。

海神波塞冬之子、食人的独眼巨人波吕斐摩斯的故事一直都是荷马史诗《奥德赛》中极具传奇色彩的篇章。在特洛伊战争结束之后，英雄奥德修斯于返乡途中路过西西里岛，上岸寻求补给。然而不幸的是，他和其他12个同伴误入了波吕斐摩斯的巢穴。不久后巨人放羊归来，发现了奥德修斯众人。随后，巨人封闭了洞穴的入口还吃了他的同伴。奥德修斯想到了一个逃走计划，他把没有勾兑过的烈性葡萄酒送给波吕斐摩斯，乘机灌醉了他。独眼巨人惊讶于他的慷慨，询问他的名字，奥德修斯告诉巨人自己叫“没有人”。趁着波吕斐摩斯醉酒熟睡，奥德修斯把一根烧红削尖的木棍插入波吕斐摩斯的独眼。失去眼睛的波吕斐摩斯大声痛呼，希望岛上其他的独眼巨人来帮忙，别的巨人连忙询问他凶手的名字，波吕斐摩斯回答，“‘没有人’攻击我。”他的呼救被当成了笑话。天明之后，奥德修斯和他余下的同伴藏在羊的肚子下面，趁波吕斐摩斯放牧的机会安全逃出了魔窟。

而在遥远的黑足印第安部落（Blackfoot Indians，一个主要依靠捕猎美洲野牛为食的阿尔冈琴部落），代代流传着一个类似的故事。很久以前，有一名狡诈的骗子名叫“乌鸦”（Crow），他既能变成人，又能变成鸟。乌鸦拥有一大群野牛，他将野牛群藏在一个山洞之中。独占着食物的乌鸦最终被人们抓住，人们把他放在火上用烟熏他。迫不得已，乌鸦只得答应人们放出他藏起的野牛，可是在得到自由后，他又反悔，拒绝

放出那些动物。为了对付乌鸦，两名英勇的猎户分别把自己变成小狗和木杖，乌鸦的女儿在路上看到他们后，把小狗和木杖都带回了山洞。一进山洞，两位猎人再次变身，一位变成了体型巨大的猎犬，另一位变回了人，一同将野牛群赶出了山洞。在逃出山洞时，他们躲藏在野牛皮下，装作野牛的一员从乌鸦面前大摇大摆地离开了。

我们构建的波吕斐摩斯类神话的演化树显示，这类神话的演变遵循两条主要的迁移路线：第一条是从旧石器时代在欧洲和北美散布的；第二条可追溯到新石器时代，同时还伴随着畜牧业的繁荣发展。

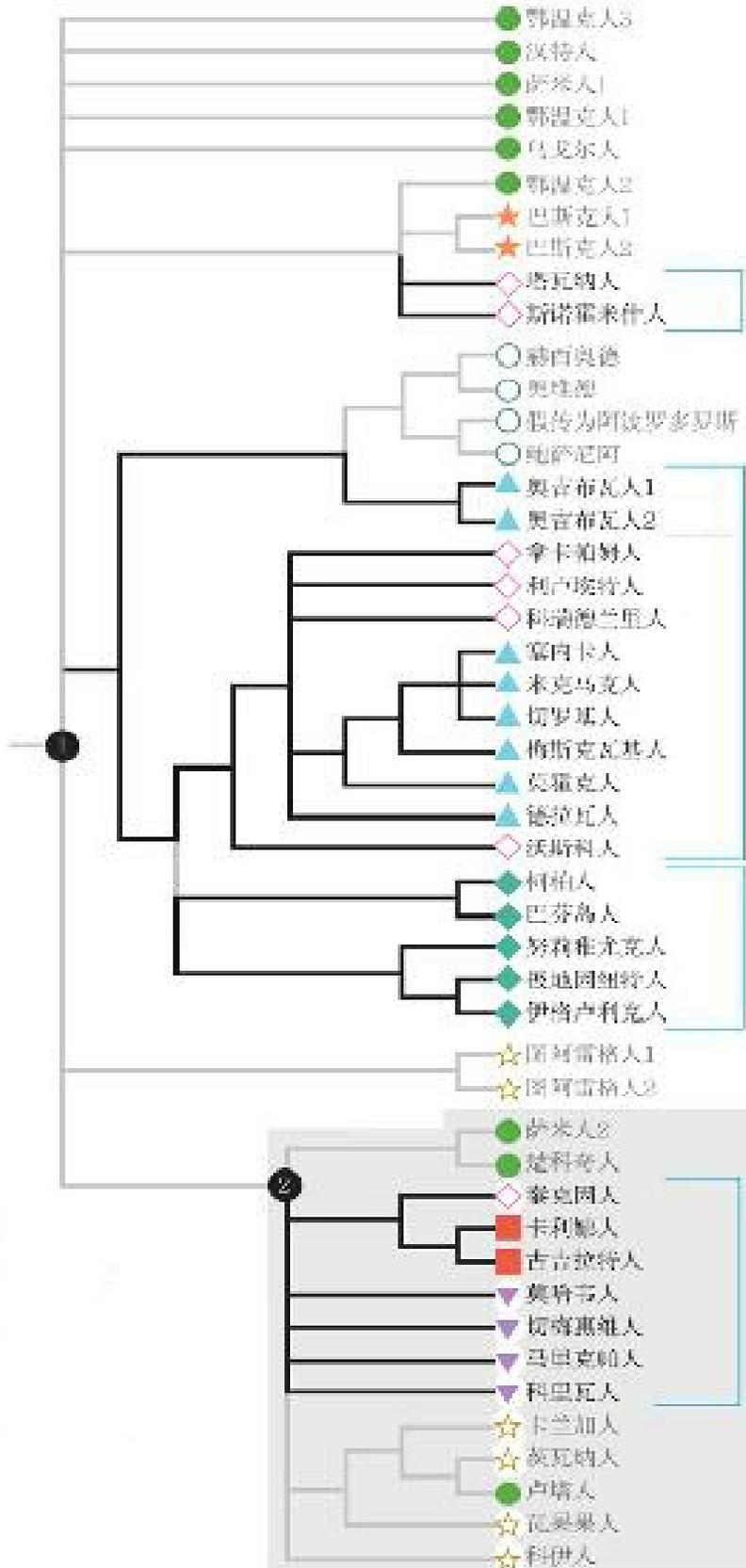
在瑞士，还流传着一个与波吕斐摩斯类似的故事，非常简洁，只留下了一个梗概。这个版本可能向我们还原了故事原貌：猎人发现了怪物独眼矮人；这只独眼矮人是山上兽群的主人。现在，这个形式的故事已经消失在历史长河之中，消失的原因很有可能与当时末次冰盛期（Last Glacial Maximum，冰川分布范围快速扩张的时期）有关。在21500年前，冰川的上涨达到了历史最高值。居住在高加索山脉的人们连同各种生物一起，为了躲避严寒纷纷迁往更适宜居住的地中海区域，因为只有这里才能为他们提供庇护。在此之后，一个新的故事开始流传，在这个版本中，怪物不在洞穴中居住，也有了自己的庇护所。

神话谱系

演化树

运用多种不同数据模型得出的天文狩猎故事的演化树，揭示了第一批居住在美洲的人类如何在距今15000年前跨过当时还是陆地的白令海峡，把故事带离西伯利亚。演化树的各个分支显示了不同版本的神话故事如何在4次相互承接的迁徙浪潮中，在不同的文化族群里代代相传。

文化族群



一项研究比较了在不同文化中流传的47个版本的天文狩猎神话，比较结果告诉我们，通过对“神化元素”进行分析，可以确定不同故事之间的相关度。在这张树状图里，每一分支都标志着故事组成单元的显著分叉。例如，北斗七星是分支1在根部的核心神话元素。而猎户座和昴星团在分之2中扮演着非常重要的角色。

- 亚洲
- 希腊
- ★ 巴斯克
- ☆ 非洲
- ◆ 北极地区
- ◇ 美洲沿海高原 / 不列颠哥伦比亚
- ▲ 美洲东南部
- ▼ 美洲大盆地/西南部圭亚那
- 非洲

神话溯源

现在，我还把对史前岩绘艺术的研究引入了模型。我们发现，在一些特定的岩绘艺术与重构后的故事之间，存在一定的相似性。这种相似性为我们理解史前人类的精神世界提供了一种全新的思路：他们在距今30000至15000年间越过白令海峡，成为了抵达新世界的首批人类。

回到波吕斐摩斯神话，首批听众听到的故事可能是这样的：一位猎人遭遇了一头（或多只）霸占了一群野生动物的怪物；猎人闯入了怪物安置动物的场所，出口却被巨大的障碍物堵住了；怪物想方设法地要杀死闯入者，但是主人公通过藏在一只动物的肚子下逃出生天。

上述这个由“三个独立的系统发生数据库”、“大量统计学方法”及“独立的民族学证据”共同揭示的神话原型集中反映了当时人们的一种观念：如果有人独自拥有一群动物，并将这些动物藏进了山洞，必须得有一个中间人将它们放出来。许多古代文明都持有这样的观念，这种源自旧石器时代的想法可能解释了双方的竞赛是怎样从底层社会中产

生的。

在法国比利牛斯山的“三兄弟洞穴”（Trois-Frères，旧石器时代前叶人类在这里频繁活动）中，一块洞壁上画着一个奇怪的生物：这个生物有着野牛的头和人类的身体，似乎还握着一把短弓。而在野牛群中迷失方向的另一只动物——和野牛们相似却不相同的一只——回过头去看向这个奇异的人牛结合体，这两只生物进行了短暂的目光交流。

经过仔细的检验，那只“野牛”的左后腿并不是反刍动物（即野牛）的腿；这条腿的大腿比例比真正的野牛腿要小，因此更像人类的腿。事实上这种差异非常显著，以至于法国人类学家安德烈·勒鲁瓦-古朗（André Leroi-Gourhan）明确认为，这条腿是人类的轮廓。

除此之外，绘制洞穴壁画的艺术家们还细致地描绘了牛的肛门和外阴孔。这两个元素很有可能与美洲印第安版本的波吕斐摩斯神话相对应，在这些故事中，人类通过钻进动物的肛门来隐藏自己。

利用三个数据库进行重构，我们发现“卡里斯托”（神话里的那位被变成熊的可怜母亲）神话最原始的版本可能是这样的：一名人类追逐着一只有蹄类动物；这场狩猎是在天上发生的或是在天上结束的；这只动物化为天上的星座时依旧存活；这个星座就是现在的大熊星座。

重构天文狩猎神话，或许能解释法国拉斯科洞窟壁画（著名的旧石器时代洞穴壁画）中的著名场景：在野牛肩骨间隆起的部位之上，悬挂着一颗寂寞的小黑点。通过重构出的故事，我们认为这个黑点是一颗星星。要知道这头野牛并没有做出冲撞动作，而是稳健地站立着。比起临摹现实中的场景而言，这更像是代表某个星座。而且，根据一些专家的看法，壁画中的人类是站直的，而野牛却在上升，这与神话原型中动物升天的行为相互呼应。

尽管将神话故事和旧石器时代的壁画联系在一起似乎有些滑稽，但上面的例子无疑有力地证明了系统发生分析法能做出一定的解释。这套系统不仅能为研究提供合理的假设，也让复原失落已久的故事成为可能。

史前的龙与蟒

关于人类的起源，一直众说纷纭。根据我积累的研究成果，可以进一步加强“走出非洲”理论的可信度。“走出非洲”的理论认定，解剖学意义上的现代人起源于非洲，并由非洲大陆向世界其他区域扩散。我的研究工作则对生物学家已经完成的系统发生研究提供了补充。生物学家们认为，第一波大型迁徙浪潮是沿着亚洲南部的海岸线扩散的，在50000年，成功抵达澳大利亚；又由东亚向美洲大陆迁徙。此外，生物学和神话学的双重研究证据都指出，第二波从非洲迁出的人类和来自亚欧大陆北部的人类几乎同时抵达了北美大陆。

最近，我正在构建一套系统发生的“超级”演化树。这套演化树可以用来研究早期迁徙浪潮中出现的巨蛇、巨龙的形象，研究它们的演变历史。结果显示，在大批人类迁出非洲之前，故事的原型中最有可能包含这些核心元素：守卫水源的巨蟒只会在特定时间开放水流；它们能在空中飞翔，形成色彩绚烂的彩虹；它们体型巨大，头上长着和牛或鹿相似的角；它们行云布雨，造雷成暴。这些爬行类动物通过蜕皮恢复年轻，从而无限接近永生；这一点与无法逃避死亡的平凡人类形成了鲜明的对比。人们还把无法逃脱死亡的宿命归咎于不死的爬行类。的确，在很多情况下被蛇咬伤是极其致命的。在这样的语境中，神话有了新的故事：一个走投无路的人恰巧看到一条蛇（或是其他的小型动物）复活或治愈了自己（或是其他动物），随后这个人用同样的方法救了自己。在5个独立的数据库的基础上，我通过识别“蛇”和“龙”的不同定义重构了神话。重构时，还用到了一些可分析的最小单元，比如同一神话类型的不同版本、神话中出现“龙”与“蛇”的种类、不同的文化分区和地理地理分区。

其实，我希望这项研究能触及更久远的时间，追寻更古老的神话，研究旧石器时代早期智人与那些已经灭绝的人种之间的关联。演化生物学家们已经确认了智人同尼安德特人、丹尼索瓦人以及其他古代人种交配的可能性。那么类似的，物质材料上的交换、语言，神话故事间的借鉴或许也会同时发生。最近，我正在完成一项很重要的任务：扩充和修缮另外几套与旧石器时期神话相关的系统发生“超级树”，这套正在迅速发展的系统包括了很多有趣的内容：将孕育万物的太阳比作巨大的哺乳动物的故事，以及将女性作为神圣的知识神殿的最初守护者的故事。

扩展阅读

A Cosmic Hunt in the Berber Sky: A Phylogenetic Reconstruction of Pal-aeolithic Mythology. Julien d'Huy in Les Cahiers de l'AARS, No. 16, pages 16, 93–106; 2013.

A Phylogenetic Approach of Mythology and Its Archaeological Consequences. Julien d'Huy in Rock Art Research, Vol. 30, No. 1, pages 115–118; May 2013.

Polyphemus, a Paleolithic Tale? Julien d'Huy in The Retrospective Methods Network Newsletter, No. 9, pages 43–64; Winter 2014–2015.

Première Reconstruction Statistique d'un Rituel Paléolithique: Autour du Motif du Dragon. Julien d'Huy in Nouvelle Mythologie Comparée/New Comparative Mythology, No. 3. Published online March 18, 2016.

Chain Letters and Evolutionary Histories. Charles H. Bennett, Ming Li and Bin Ma; June 2003.

深度

责任编辑：韩晶晶

环境 ENVIRONMENT

人工湿地：自然净化污水

对于卫生设施匮乏的发展中国家，污水处理是一个难题，《科学美国人》西班牙版介绍了一种几乎不需要消耗能源的净化方法——人工湿地。

撰文 克里斯蒂娜·阿维拉（Cristina Ávila）维克托·马塔莫罗斯（Víctor Matamoros）霍安·加西亚（Joan García）翻译 郝蕴



在法国小镇埃维厄的人造湿地污水处理厂。
事实证明，这些系统非常适用于乡村的污水净化。

克里斯蒂娜·阿维拉是加泰罗尼亚理工大学（UPC）的博士后研究员。她目前管理一个欧洲和印度的合作研究项目，旨在通过天然的低成本技术来解决小城镇的废水处理问题。



维克托·马塔莫罗斯在西班牙国家科研理事会环境诊断及水质研究所从事研究工作。他的工作重点在于利用植物修复技术来消除水环境中的新兴污染物。



霍安·加西亚领导着UPC的环境工程与微生物学研究组，他是自然污水处理系统方面的专家。



精彩速览

传统的水净化系统需要广泛收集污水并输送到一个中央工厂。这种技术并不适用于乡村地区和贫困国家。

另一种方法是使用人工湿地。这种生态系统模拟了自然湿地，但其结构和植被是专门设计用来增强水净化过程的。

用人工湿地处理污水不需一个集中处理的过程，可以融入自然环境，在热带气候条件下效果尤其好，而且在消除新兴污染物方面表现出了极高的效率。

地球上有足够的淡水，可满足全人类的需求。然而，2015年的数据显示，地球上10%的人口仍然没有安全的饮用水，约40%的人缺乏基本的卫生设施。据估计，每年有150万儿童因缺乏饮用水和卫生设施而死亡。因此，联合国在2010年宣布，获取清洁饮用水和卫生设施是一项基本人权。

尽管近年来这方面的问题得到了一定改善，但全球约25亿人口仍然缺乏卫生设施。这个问题主要存在于农村及偏远地区，那里70%的家庭缺乏卫生条件，有90%的人在室外排便，这一习惯严重危害了当地居民的公众健康。

然而，目前世界多数地区采用的水处理方法很难应用于农村地区或发展中国家。这种模式首先要建立一个分布广泛的污水收集系统，将污水引至一个大型污水处理厂再进行集中处理，这是一个极为复杂的过程，成本和能耗都很高。事实上，承担污水处理工作的是一些世界上规模最大的企业，它们处理的污水总量也很惊人。欧洲的污水处理厂管理着总长超过220万千米的污水管道和大约7万座污水处理厂。据估计，美国总发电量的3%要用于污水处理。

的确，在工业化国家的大城市，污水处理厂占地面积小、处理效率高，这种水处理系统的作用是不可替代的。然而，要处理乡村地区少量、分散的污水，该模式就必须做出改变了。有必要开发一种实施与运行成本更低，能适应每个地区的自然环境以及社会、经济条件的技术。这种技术应该易于维护，在源头对污水进行分散处理。

人工湿地是一个实现这种转变的极好手段。这些系统模拟了自然湿地，但它们的设计和运作模式都是以增强净化水的物理和化学过程为目标。人工湿地可以利用当地的材料和劳动力建造。此外，因为它们并不依赖于高科技方法，因此特别适合发展中国家和地区。

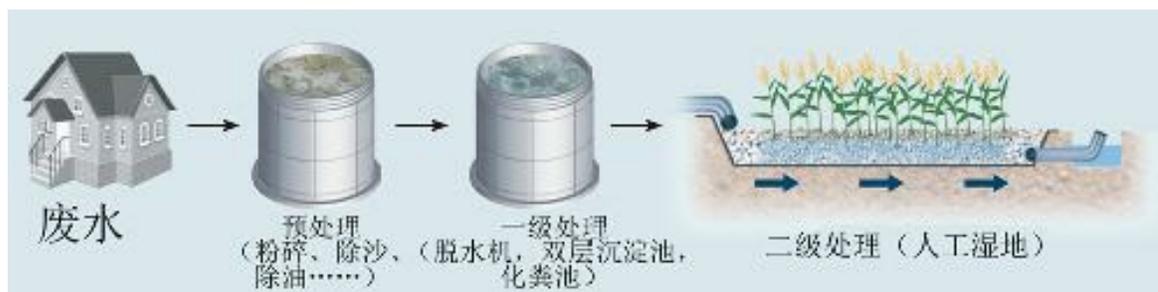
人工湿地维护简单，在经济和环境两方面都会带来收益。这些系统的运作几乎是零能耗的（只要有足够的阳光），只产生少量污泥，不需

要添加化学试剂。此外，人工湿地还可以为野生动物提供栖息地，有利于提高生物多样性和恢复生态环境。对于水量和水质的巨大波动以及环境温度的变化，这些系统也有良好的适应能力。虽然它是一个相对较新的技术，但与其他应用更广泛的方法（如活性污泥）相比，效率要更高，而且还能清除一些其他方法难以处理的污染物。

工作原理

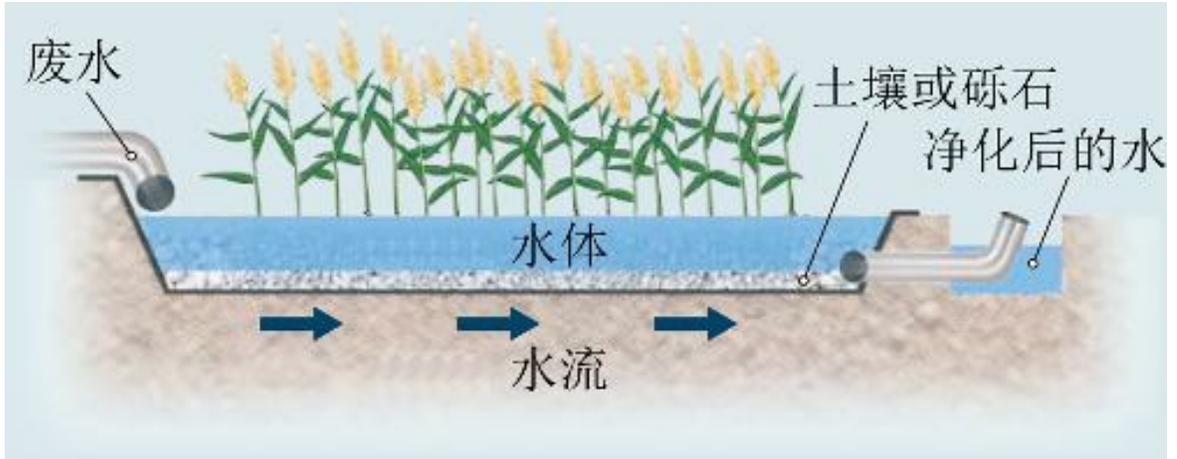
另一种水处理方法

人工湿地是一种与自然环境融为一体的水净化方法。它的植被和结构都是特意设计的，可以让水、沙、砾石和微生物之间保持互动，优化物理、化学和生物学净化过程，消除病原体与污染物。这些系统适用于废水的二级和三级处理。根据它的结构和运行方式，人工湿地可以分为两大类型：表面流湿地和潜流湿地。



废水处理主要包括三个主要阶段。在预处理阶段分离较大的固体废物。然后，在一级处理阶段沉淀除去残存的固体颗粒。最后，在二级处理，或者说生物处理阶段去除微生物并分解掉有机物。有时会进行三级处理（图中未显示）来进一步改善水质，从而让回收水可以用于城市、农业和工业。

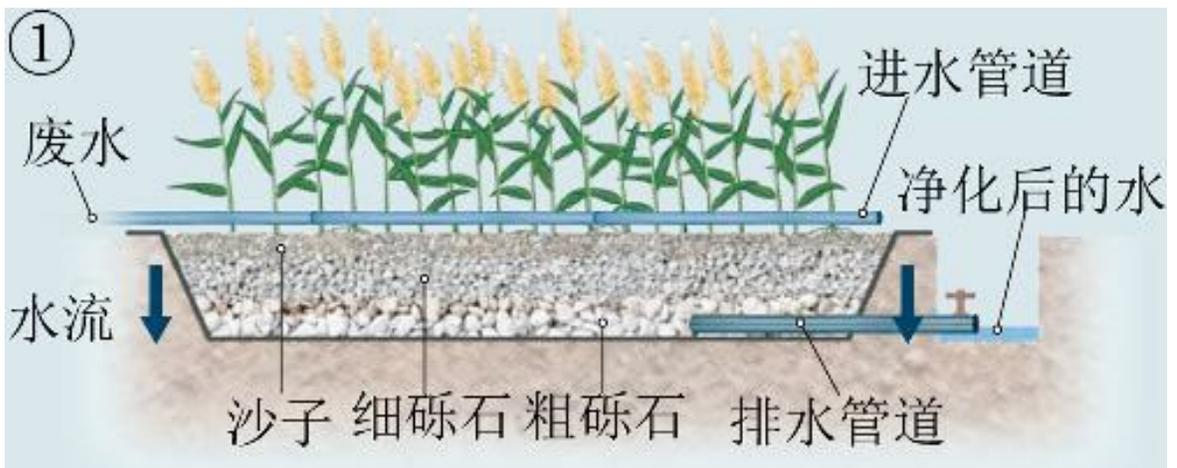
表面流湿地



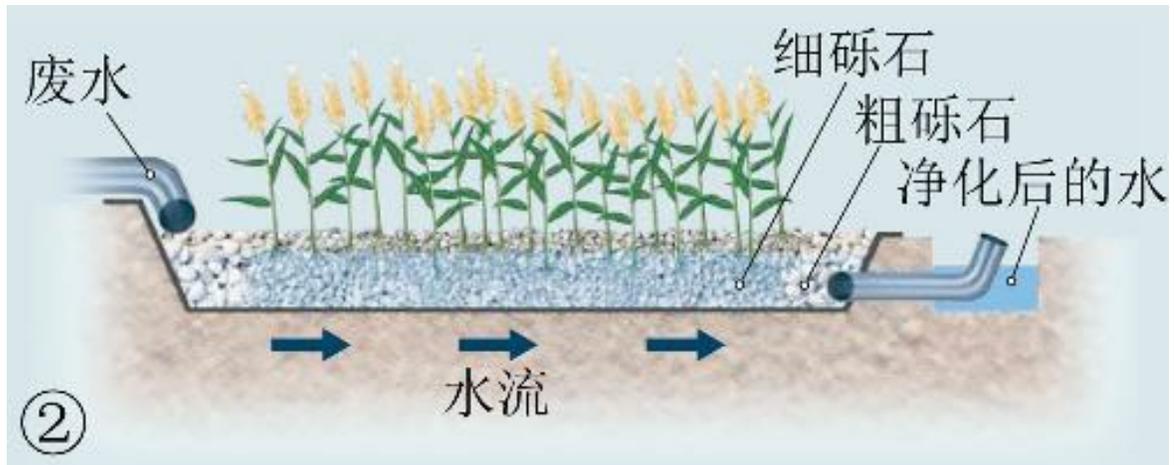
这些湿地的特点是水暴露在大气中。水在植物的茎和叶之间循环流动，其上附着的生物膜负责去除污染物。这种湿地通常用于第三级处理。因为有一片水域，所以它更适合用于恢复环境。

潜流湿地

在这些系统中，水在地下循环流动，与植物的根和根茎接触，植物表面生长的生物膜负责净化。颗粒介质有利于去除污染物，所以潜流湿地也适于进行二级处理。然而，由于没有开放水域，这类湿地不太适用于环境恢复项目。潜流湿地本身也可分为两种类型：垂直流（①）或水平流（②）。



垂直潜流湿地：水间歇性地上下流动，因此也需要水泵系统。因为这种湿地不是一直被水浸没的，因此可以进行有氧反应，处理污水的能力更强。



水平潜流湿地：水平平行于地面循环流动，特点是一直被水浸没。

利用自然的力量

目前世界上大多数净化污水的技术都包括三个阶段：预处理，分离较大的固体废物；初级处理，把剩下的固体颗粒也沉淀出来；二级生物处理，利用微生物分解并去除溶于水的有机物。传统的处理方法或多或少都会产生污泥，接下来，这些污泥也要经过处理最终才能排放掉。这一过程成本也很高。如果想得到高质量的净化水，还需要再经过三级处理，以减少病原微生物，这样才能得到可用于生活、农业和工业的水。

人工湿地可以作为二级或三级处理的方法。它们适用于净化不同来源的水，例如生活污水、工业和采矿废水，以及径流。这种湿地一般是覆盖着植被的浅水池或水渠（深度小于1米）。湿地内种植的植物通常选用芦苇（*Phragmites australis*）、香蒲（*Typha latifolia*）和黄菖蒲（*Iris pseudacorus*）。

在人工湿地中，水会与各种因素相互作用，从而实现净化，颗粒介质（碎石或砂）、微生物、植被，甚至野生动物都会参与其中。物理、化学反应，以及微生物参与的过程可以降解水中的有机物和营养物质，也可以消除病原微生物。而微生物也会参与化学物质的转化、挥发、沉淀、吸附（附着或吸收）以及光降解。哪种过程所占比重最大，在很大程度上取决于湿地的设计。

人工湿地通常可以分为两类，一种是表面流湿地，主要处理过程是在一个水体中进行的；另外一种为潜流湿地，净化过程是在陆地上进行的。在第一种系统里，水暴露在大气中，循环流经植物的茎和叶。这类湿地一般是0.3~0.5米深的浅水池，植物扎根在池底。净化主要依赖于生物膜（附着在植物茎叶上的微生物群落）。这种系统一般用来进行三级处理，也就是进一步改善经传统污水处理厂净化后的水的水质。

在潜流湿地中，水在浅层土壤下循环流动，会经过颗粒介质并与植物的根和根茎接触。水处理是在深度为0.3米~0.9米的地层中进行的。在这种情况下，附着在颗粒介质、植物的根和根茎上的生物膜负责去除污染物。与表面流湿地相比，潜流湿地能负载更多的污染物，适用于二级处理。这种系统中污水直接和人接触的风险更小，也不会滋生蚊子之类的昆虫。然而，这种系统无法提供可用的水源，使得它们在环境恢复项目中用处不大。

潜流湿地还可以分为水平流和垂直流两种。前一种的特点是水流方向与地面平行，并不断地流动。而在后一种湿地中，水垂直流动，而且是间歇性的，因此颗粒介质通常不会被淹没。这就需要用抽水系统和遍布湿地表面的管网来输送污水。因为垂直流湿地不是永久处于浸水状态，其含氧量要高于水平流湿地，从而增强了它的污水处理能力。因此，如果是降解一定量的污染物，需要的垂直流湿地的面积更小。这是由于这种湿地可以更好地把氧输送给植物生物膜，有利于清除污染物。



位于法国沙莱克斯市的垂直潜流湿地，为约2000名居民提供污水净化服务。

人工湿地的发展历程

第一个人工湿地水处理实验是德国马普所在20世纪50年代进行的。在接下来的十年，这项技术开始向中欧推广。从20世纪80年代开始，德国的设计被引入了丹麦，到1987年，丹麦已建成了近80个水平潜流湿地来处理小城镇污水。

虽然在20世纪80年代末，许多欧洲国家已把人工湿地纳入了他们的污水净化技术，但是直到10年后，人工湿地才成为处理小社区和其他零散污水的首要方法。今天，在世界各地有成千上万的人工湿地，包括英国（有1000多个人工湿地）、奥地利、比利时、波兰、瑞典、捷克共和国、法国或美国这样的国家。从21世纪开始，地中海沿岸的欧洲国家（西班牙，意大利，希腊，斯洛文尼亚和土耳其）也已经建设了大量的人工湿地。

最初，这些国家建造的潜流湿地主要是水平流类型的。人们曾认为植物可以把氧输送到地下部分，供根及根茎上的生物膜通过有氧反应来分解污染物。然而经验表明，植物在这个过程中中的作用非常有限，对于一直被水浸透的水平流湿地，氧从空气到水的输送是严重不足的。

水平流湿地的这些局限性促使人们发展垂直流湿地。这类湿地的设计和运作方式（间歇性的水流和未被水浸润的颗粒介质），使得它们能在更小的空间内处理污染更严重的水。在法国有一种形式略有变化的人工湿地，未经处理的污水会直接排入划分成网格状模块的湿地，每个模块都是间歇进水的。这样在模块闲置期间，沉积的污泥会发生矿化。植物在这种湿地中发挥着至关重要的作用，植物的生长以及它们的茎秆在风力作用下的运动都会破开表层泥土，使得地表下的土壤可以接触空气，促进氧气作用下的矿化过程。

人工湿地技术的最新一个进展是把不同类型的湿地结合起来，集合每一种方法的优势。尽管有若干种可能的结合方式，但目前最常用的一种是垂直流湿地连接水平流湿地。这种技术已在奥地利、爱尔兰和斯洛文尼亚等国家使用。由于欧洲水框架指令的实施，混合系统在欧洲得到了较多的关注，该法案对水质有非常严格的要求。

实践证明，有一种混合型系统非常适合处理人口较少地区的污水。这个系统由一系列的人工湿地组合而成：先是一个垂直潜流湿地，其次是水平潜流湿地，最后是一个自由表面流湿地。这个系统是由本文作者

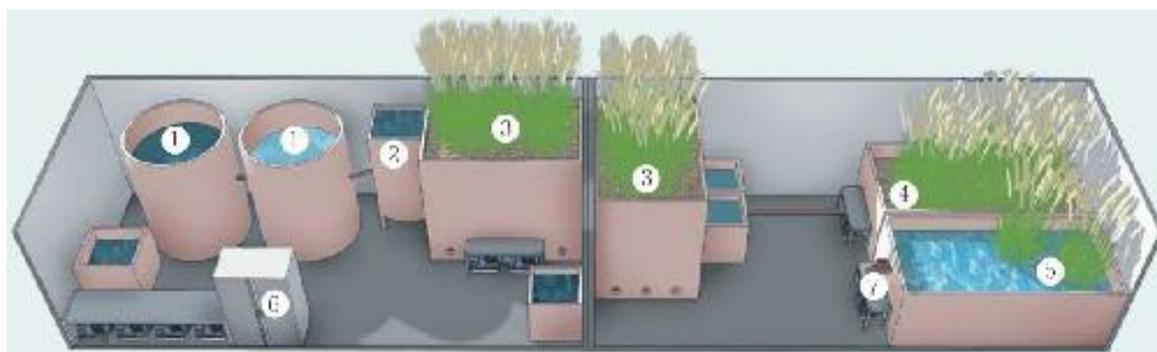
所在的加泰罗尼亚理工大学环境工程与微生物学研究组和塞维利亚水源新技术中心设计、建造和运行。

研究者既在实验室研究了这种系统，也在实际应用中进行了长时间测试，结果都表明此系统去除污染物的效率非常高，即使污水中的有机物含量很高也能高效净化。在第一阶段，垂直流湿地负责除去固体颗粒和多数有机物，并完成氨的硝化过程。然后，在水平流湿地进行厌氧脱氮反应，即将硝酸盐和亚硝酸盐转化为氮分子，释放到大气中。最后，在表面流湿地进行三级处理，进一步提高水的质量。在这一阶段的主要机制是光降解，可以降低病原微生物数量并通过光氧化作用清除一些顽固化合物。最终得到的水可用于城市、农业、工业、休闲和环保等方面，包括作物灌溉、公园和绿地供水、街道清洁、补给含水层或恢复环境退化地区等。

技术进步

混合型湿地

把不同类型的湿地组合起来，可以综合每一种方法的优点。奥地利、爱尔兰、斯洛文尼亚等国家已经推出垂直流湿地加上水平流湿地的混合系统。实验证明，加泰罗尼亚理工大学环境工程与微生物学研究组和塞维利亚水源新技术中心合作开发的混合型湿地，非常适于处理少数人口产生的污水。以下是该系统试点工厂的主要组成部分。



- ① 废水
- ② 一次处理
- ③ 垂直潜流湿地

有机物降解

吸附

硝化

④ 水平潜流湿地

有机物降解

吸附

反硝化

⑤ 自由表面流湿地

清除病原微生物

光氧化

⑥ 控制系统

⑦ 净化后的水

有效处理新兴污染物

近年来，一些研究指出，人工湿地能清除一些传统水处理技术难以消除的污染物。而这些被称为“新兴污染物”的化合物包括各种各样的物质，如药物、个人护理产品、农药、激素、工业添加剂以及它们的衍生物。由于对生态和公众健康可能存在影响，这些物质引发了社会和科学界的广泛关注。事实上，世界各地已有许多研究在含水层和饮用水中发现了这些化合物的痕迹。

一部分研究已经表明其中一些物质会带来危害。例如，自上世纪90年代以来，印度、巴基斯坦和尼泊尔的秃鹫数量减少了90%，原因是这些国家曾允许使用双氯芬酸这种消炎药来治疗牲畜，而该药物可能会导致秃鹫肾脏衰竭。双酚A，一种制造硬质塑料和环氧树脂时用的单体，由于会在生殖和发育阶段干扰内分泌系统，最近已被加拿大，法国，美国等国家明令禁止使用，尤其是在孕妇儿童产品中。

水环境中新兴污染物的浓度通常较低，有些仅为万亿分之几或十亿分之几(每升几纳克或微克)，所以看似对人体没什么危害。然而，目前

还没有研究评估长期接触这种浓度的污染物带来的影响。而一些针对污染物急性暴露的研究已经发现，污染物会给水生生态系统带来危害，包括河流生物多样性下降，鱼类和贝类雌性增多或性别比例改变，后者与废水中激素和其他物质导致的内分泌失调有关。

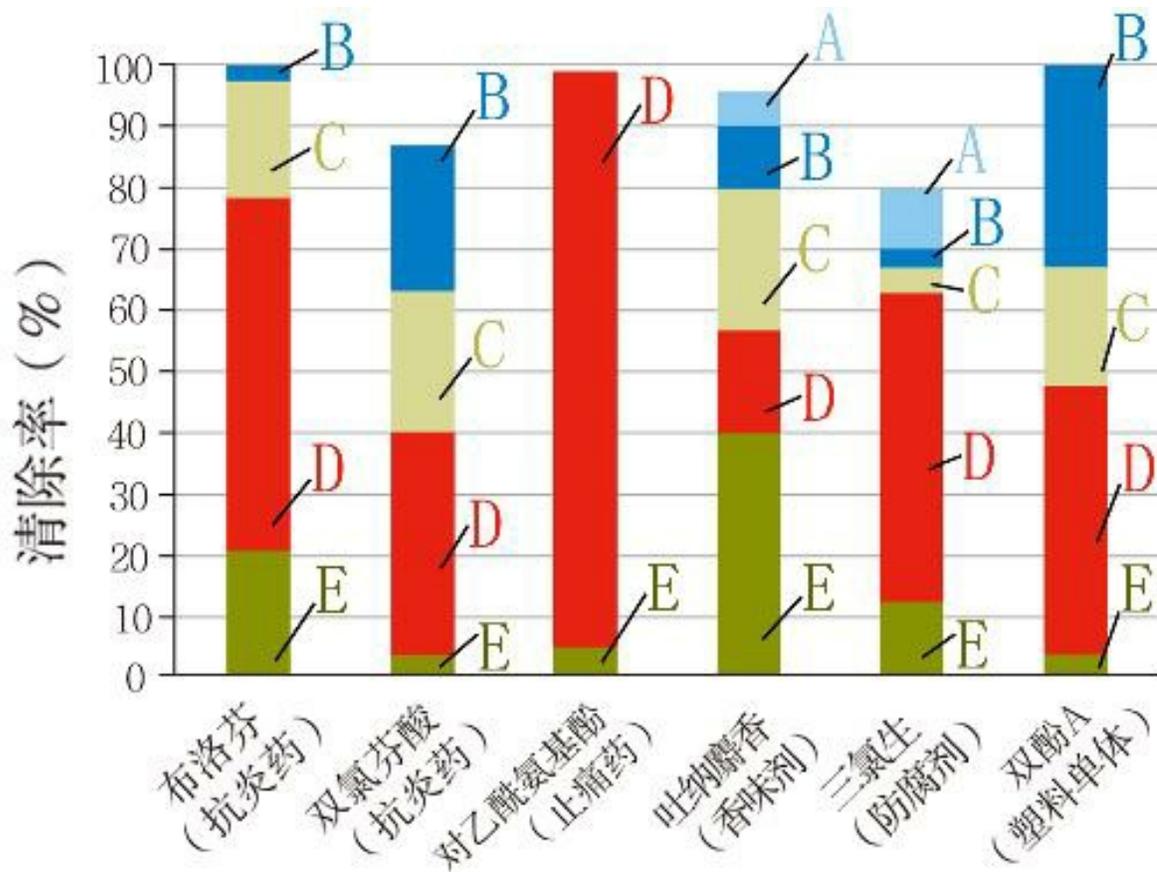
由于传统的污水处理方法并没有考虑这些新兴污染物，污水处理装置并不是为了处理它们而设计的。因此，尽管对环境影响不明，这些物质仍不断地被排放到水体中。现在，有一些可清除新兴污染物的三级水处理方法，其中多数是强氧化过程，例如臭氧氧化和紫外线照射等。然而，尽管这些技术的确能改善新兴污染物的处理效果，但往往是高成本和高耗能的。此外，在某些情况下，处理之后还可能产生比原化合物更加顽固、毒性更强的衍生物。

虽然在这一领域的研究还处于萌芽状态，但现在新兴污染物已经成为了科研热点，特别是针对它们的生态毒理学、降解机制和清除方法的研究。在这种情况下，有大量研究表明，与传统的污水处理系统，甚至其他更先进的技术相比，人工湿地可以更加高效地清除新兴污染物。这些系统有能力大幅减少某些传统方法无能为力的物质，例如双氯芬酸，同时也能减少水中的环境雌激素并降低其他毒性作用。人工湿地之所以净化效率高，有两个原因：一方面，湿地内的物理、化学和微生物过程极为复杂，有极为多样的细菌和种类繁多的降解反应；另一方面，污水会长时间与净化系统接触。

独特优势

清除污染物

实践证明，人工湿地有能力高效去除传统水处理方法无能为力的污染物。其中就包括所谓的“新兴污染物”，例如药物、杀虫剂和激素等。尽管这类物质在水环境中的浓度非常低，但有导致长期危害的可能。图中展示了塞维利亚水源新技术中心分析的几种处理手段对各类新兴污染物的清除率。



- A 水箱处理
- B 自由表面流湿地
- C 水平潜流湿地
- D 垂直潜流湿地
- E 初级处理

发展中国家面对的问题

虽然几乎所有发达国家都已经实现了卫生设施的全面覆盖，但发展中国家的情况却截然不同。如今，全球大约有25亿人口没有基本的卫生条件，这些人大多数生活在以下三个地区：撒哈拉以南非洲、南亚和东亚。然而，在这些地区的发展目标中，废水处理往往是最后才被考虑到。

发达国家更关注的是微量污染物（重金属、药物、个人护理产品等等），而发展中国家的重点则是减少病原体数量，从而减少疾病的传播。考虑到净化系统的可持续性，经济性和可操作性，人工湿地是实现这一目标的合适选择。因为人工湿地的大多数建造材料可在当地获取，还可以培训当地居民运行和维护湿地。这些系统还可以得到一些额外的收益，如获得生物质燃料、保护生物多样性，以及为渔业、农业及公共休闲设施提供用水。

尽管人工湿地潜力巨大，但在发展中国家的应用速度远远落后于发达国家，这主要是由于当地很多人缺乏相关的知识和经验。其次，援助计划倾向于选择那些能给投资者带来回报的技术。最后，虽然发达国家的顾问通常知道最适合他们自己国家的技术，但往往不会根据现实情况和贫穷国家的本土文化做出变通，所以他们时常在热带地区推荐北方的技术。

不过，在过去十年中，人工湿地在许多低收入和中等收入国家得到了普及。今天我们可以很多国家找到应用的例子，如非洲的摩洛哥、埃及、肯尼亚、坦桑尼亚、乌干达，亚洲的印度、泰国、中国、巴基斯坦、尼泊尔、菲律宾、越南，美洲的哥伦比亚、墨西哥、拉丁美洲、巴西、智利、尼加拉瓜、萨尔瓦多、哥斯达黎加、秘鲁、乌拉圭、阿根廷，以及东欧的斯洛伐克、保加利亚、波斯尼亚、匈牙利、塞尔维亚等。这些湿地规模各异，有的供单个家庭使用，有的则可以处理几千人的生活污水。其用途也相当广泛，不但可以处理城市污水和径流，还可以处理矿井废水、垃圾填埋场渗滤液、医院和农业废水，以及各个行业的废水（纺织、制革、牛奶、糖、巧克力等行业的）。

一般来说，建造在发展中国家的人工湿地在净化水和去除污染物方面效果显著。这是由于它们大多分布在热带和亚热带地区，在温暖的气候下，生物活性更强，所以净化效果变得格外出色。另一方面，失败的例子大多要归咎于当地民众缺乏知识。

经验表明，如果想保证这些系统良好地运行，那么当地社区和地方政府有必要全方面地参与项目从设计到管理的方方面面。人工湿地的操作和维护不需要高科技，但社区的成员需要接受足够的指导，并得到专家适当和及时的援助。该技术的成功也依赖于当地可取得的材料和植物资源，这需要考虑到所在地的特点和每个项目的具体要求。我们的确需

要更多的卫生基础设施，但并不存在一个适用于所有地方的解决方案。

发展中国家对这种技术的接受程度也取决于人们能否从中获利。在这个意义上，利用湿地种植观赏花卉和牧草，或与蓄水系统结合，用于养殖和打造休闲观光的景区都可以产生经济效益。与此同时，这些活动产生的废水可以经湿地净化重新利用，实现营养物质的闭合循环。

在任何情况下，教育和信息传播都是推动一个地区建设人工湿地和其他自然系统的关键。近年来，人工湿地的发展得到了鼓励，因为欧盟增加了适用发展中国家的低成本技术项目的资金，例如在非洲的几个国家建设湿地的水生物技术（WaterBiotech）项目，还有最近与印度合作的5个城市污水处理项目。

扩展阅读

Treatment Wetlands (2.a edición). R. H. Kadlec y S. D. Wallace. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2009.

Integrated treatment of combined sewer wastewater and stormwater in a hybrid constructed wetland system in southern Spain and its further reuse. C. ávila et al., en Ecological Engineering, vol. 50, págs. 13-20, 2013.

Attenuation of emerging contaminants in a hybrid constructed wetland system under different hydraulic loading rates and their associated toxico-logical effects in wastewater. C. ávila et al. en Science of the Total Environment, págs. 470-471 y 1272-1280, 2014.

Progress on sanitation and drinking water: Update and MDG assessment. Informe de Unicef y la Organización Mundial de la Salud, 2015. Disponible en www.unicef.org/publications/index_82419.html Reutilización de aguas residuales. Olive Heffernan en IyC, septiembre de 2014.

Aprovechamiento de aguas residuales en España. Joan García en IyC, septiembre de 2014.

Gestión desinformada. Blanca Jiménez Cisneros en IyC, marzo de 2014. Un rompecabezas global. Michael E. Webber en IyC, febrero de 2015.

深度

责任编辑：吴非

气候 CLIMATE

冻土融化影响气候**100**年

正在融化的北极冻原有可能会在未来一个世纪甚至更长时间内加速全球变暖。问题是，影响会有多剧烈？

撰文 特德·舒尔（Ted Schuur） 翻译 吴晓东 审校 赵林



2016年9月，科学家在阿拉斯加希利附近的八英里湖中，钻出一根一米多长的多年冻土岩芯。土壤的颜色深暗、质地松软（见右图），这表明土壤富含可能分解并释放温室气体的有机质。摄影：布莱恩·亚当斯（Brian Adams）



特德·舒尔是北亚利桑那大学生态学教授。他在北极地区开展了近二十年的实地研究。舒尔是多年冻土碳网络的领导者。该网络是一个国际研究联合会，旨在综合集成多年冻土和气候领域的研究成果。

精彩速览

多年冻土是指持续处于冻结状态超过一年的土壤。目前，北极地区的多年冻土正在大量融化。随着土壤温度升高，微生物分解土壤中的动植物遗骸，将二氧化碳和甲烷释放到大气中。

在北半球，多年冻土带面积广阔，共含约14 500亿吨有机碳，几乎是地球大气中碳总量的两倍。大量监测数据表明，在本世纪，这些碳的5%~15%将会从土壤中逸出，成为大气中的温室气体。

按10%来计算，将有1300亿~1600亿吨碳在本世纪进入大气，加速全球变暖进程。而阻止多年冻土融化的根本途径，就是减缓全球气候变暖速率。

2016年4月初，在阿拉斯加内陆的冻原上，冬季的积雪尚未完全消融。我和5位科学家正在沿着一条栅栏，挖出大量压实的积雪。在这个平缓的山坡上，我们安置了6个防雪栅栏。这些栅栏可以将风吹雪（雪粒被气流挟带，在近地面运行）拦下，使雪粒堆积在栅栏前。我们希望在这处位于德纳利国家公园附近的偏远地区人为升高地表温度，从而模拟未来的气候变化。而这些体力活，正是该计划的一部分。

在北极圈内的陆地上，由于气候严寒，植被带由苔藓、地衣、草本和低矮灌木构成。这种寒带生态系统被称作冻原（tundra）。在冻原的植被下，有大量多年冻土（permafrost，持续处于冻结状态超过一年的

土壤，由岩石、冻结土壤和冰组成）。我们在阿拉斯加八英里湖（Eight Mile Lake）的研究点就处于冻原之中。

每年秋季，我们在研究点安装这些栅栏。每个栅栏高约1.5米，长8米。这些栅栏拦下的积雪将地表与寒冷的冬季空气隔开，就像保温毯一样，覆盖在多年冻土之上，这使得多年冻土的温度比周围更高。我们会在春季除去栅栏前比周围地区多出来的积雪，使得春季气温对栅栏覆盖的区域及周围冻土的影响一致，并确保该区域不受额外的积雪融水下渗的影响。由此，我们可以对试验区域与周围的土壤进行对照分析。

结果显示，冬季温度较高的多年冻土在夏季的融化速率更快、范围也更广。这与人们对北极和北方地区的生态系统中，多年冻土融化速率的预期一致。在这些地区，气温上升的速率是全球平均速率的两倍，因此夏季冻土融化的速率更快。之前被冻结的微生物恢复生命力，将过去千百年间堆积在冻土中的动植物遗骸分解，释放二氧化碳和甲烷。

地球北部的多年冻土带储藏大量有机物，只需其中一小部分向大气释放温室气体，就会极大地加速全球变暖。我们在阿拉斯加的试验是全球研究的一个重要组成部分，这些研究的目的是弄清楚未来几十年间，多年冻土释放的温室气体对全球变暖的影响。我们希望通过自己的研究作出更为可靠的预测。



左图：在积雪覆盖的阿拉斯加山脉脚下，白色围隔内的传感器用于研究土壤吸收、释放的二氧化碳量。

右图：北亚利桑那大学的梅根·泰勒（Meghan Taylor）正在记录数据。

13300亿~15800亿吨

毫无疑问，科学家希望得出尽可能准确的结论：多少多年冻土将融化？温室气体的释放速率有多快？对全球变暖会带来多大影响？而这些结论的得出需要基于对地球广大区域的评估。北半球的多年冻土带分布在1670万平方千米的范围内，几乎占北半球无冰陆地的四分之一，其深度可达几十至上百米。（在南半球，高纬度地区多被海洋或陆地冰盖覆盖，因此多年冻土的分布范围有限）

虽然卫星和遥感设备可以准确地记录冰盖面积的变化，却没有适用于多年冻土带的综合遥感系统。科学家在一些特定的多年冻土分布地区安装了地面传感器，但在全球范围内，数据点还远远不够。好在我们正在逐步增加传感器的数量。目前，全球陆地多年冻土网络在全球的1000多个钻孔中安置了仪器，用于监测表层数米乃至地下更深处土壤的温度。

该网络显示，在过去几十年间，多年冻土的温度一直在稳步上升，并于2014年和2015年在多地创造了最高记录。在历史温度很低（-10~-5℃）的地区，多年冻土的增温最为剧烈。而在很多温度接近冰点的地区，多年冻土的温度同样在上升。在这些地带，多年冻土的温度在-2~0℃之间，因此即使是1℃的升温，也会使冻土发生重大变化。在另一些地方，多年冻土的温度更加接近冰点，它们表面的活动层（在夏季融化，随后在冬季重新冻结的土层）变得更厚。将世界各地的监测数据综合到一起，我们可以对整个北极的土壤温度变化获得清晰的认识。

计算出有多少多年冻土会融化，只是我们目标的一部分。我们还需要掌握这些软化的土壤中含有多少有机物。与过去十多年一样，2016年春季，我的团队在八英里湖研究点钻取了多个1.5米长的土壤岩芯。我们和其他研究者贯穿冻原的研究显示，每立方米表层土壤的有机碳含量可达50千克。这部分碳存在于部分腐烂但被冻结的生物遗骸中。（无机碳则与之不同，它们往往是岩石的一部分，不会随着温度改变而发生变化）这一数值是同地区非多年冻土区中土壤有机碳含量的5倍，更是100倍于北极严酷条件下，每平方米灌木和其他植物中碳的存储量。

在多年冻土带，有机碳的分布范围常常深达数十米。据研究人员估计，在北半球的多年冻土中，有机碳的储量达13300亿~15800亿吨，几乎是地球大气层中碳含量的两倍。尽管北半球多年冻土带的面积只占全球土壤面积的15%，但该地区表层3米的土壤的碳储量，是全球其他地

区同等深度土壤中的50%。

此外，科学家还在一些此前从未研究过的地区进行了有机碳的测定，例如埋藏在一些北极浅海海床下的多年冻土。随着海水的渗透，多年冻土缓慢分解。我们尚不清楚这部分多年冻土含有多少有机碳。在北极地区三角洲的厚层沉积物中，碳含量也十分丰富，只是同样没有进行充分的测定。根据现阶段的估算，北极浅海和三角洲地带的有机碳储量可能有4000亿吨。

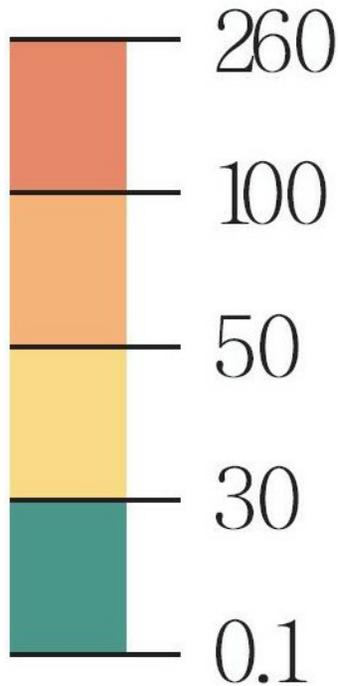
数据

碳库

北半球多年冻土带表层3米的冻结土壤中含有10 350亿吨有机碳。这些碳在冻土融化后可能会被释放、进入大气，从而加速全球变暖。在地球最北端，多年冻土分布极为广泛，往南它们变得不连续，但很多地区仍有很高的有机碳含量（红色和橙色）。



表层3米土壤中的有机碳 (kg/m^2)



数据来源: “Climate change and the permafrost carbon feedback,” By E.A.G. Schuur et al., In Nature, Vol. 520; April 9, 2015
地图: mapping Specialists

碳释放有多快？

考虑到多年冻土中储存着大量的有机碳，其融化过程必将释放大量温室气体。而具体的数值，则取决于3个关键问题。

首先，有多少碳能够转化成温室气体？微生物的新陈代谢可以分解利用一部分有机碳，但仍有相当一部分有机碳无法被微生物利用，因而会留存在土壤中。

其次，微生物作用释放温室气体的速率有多快？一部分碳可以在不到一年的时间内快速分解，进入大气，但更多是在融化后的几十年间逐渐分解、释放。这部分碳已经处于半分解状态，微生物只能逐步对其进行分解。

第三个关键问题是，微生物将释放哪些温室气体？二氧化碳和甲烷的比例将决定最终的气候变暖程度。尽管两者均为重要的温室气体，但

在100年内，同等质量的甲烷产生的温室效应是二氧化碳的33倍。而如泥炭沼泽等被水淹没的土壤氧气含量低（称为厌氧环境），这些土壤释放的甲烷远多于二氧化碳。

我们使用红外气体分析仪，在八英里湖和周围冻原的研究点对温室气体的释放量进行了大量测定。相比于吸收的碳，八英里湖的冻原释放到大气中的碳似乎更多。在栅栏周围，由于积雪提升了地表温度，植被的生长速率更快、生物量（单位面积所有植物的干重）更大，从而将更多大气中的二氧化碳吸收并储存在体内。但另一方面，升温也有利于微生物分解土壤中的有机碳。在夏季，植物吸收的碳完全抵消了土壤释放的碳，但在漫长的秋冬季节，微生物持续分解有机碳，而植物则处于休眠期。因此，考虑全年的排放与吸收，气温上升使得该地区每年向大气净释放更多的碳。

将我们的结果与来自世界各地的其他结果结合分析，我们发现，融化的多年冻土向大气释放的碳超出人们此前的预测。就像盲人摸象一样，北极地区每位研究人员的信息都具有独特的重要意义。将这些信息综合，可以让我们对多年冻土区碳排放的规模 and 本质产生全面的认识。多年冻土碳网络还综合了会议报告、机构简报和媒体的采访报道，为寻求应对策略的决策者和广大公众提供参考信息。

最近的一项综合研究为我们解答了二氧化碳和甲烷相对释放量的问题。在有氧条件下（土壤干燥），微生物分解的主要产物是二氧化碳，而在湿地和泥炭土的厌氧条件下，主要产物包括二氧化碳和甲烷。美国北亚利桑那大学的助理教授克里斯蒂娜·舍德尔（Christina Schädel）是多年冻土碳网络的关键人物，她与我的团队一起开展工作。舍德尔的研究重点是，二氧化碳与甲烷释放量的动态变化最终可能对气候造成什么样的影响。

不同于我们的野外研究，舍德尔主要在实验室进行分析。她将冻结土壤带回实验室，放置在玻璃容器中并使容器升温，从而可以精确测量土壤中的碳分别转化成二氧化碳和甲烷的速率和数量。通过对来自全球的大量数据进行统计学分析，她发现无论在有氧还是厌氧条件下，二氧化碳都是土壤样品释放的主要温室气体。令人惊讶的是，尽管厌氧分解可以释放更高效的温室气体——甲烷，但有氧分解释放的温室气体对气候的影响却是厌氧分解的两倍。

这意味着，在排水条件较好、土壤干燥的地区，多年冻土的融化对气候的影响大于那些低洼、被水淹没的多年冻土。虽然甲烷仍然是冻土融化释放的重要气体，但北极地区高地与低地的环境分布情况，将在很大程度上决定多年冻土融化对气候的影响。



常年观测土壤和大气之间二氧化碳、甲烷交换的仪器塔，可以用于指示每年土壤生态系统的碳是净吸收还是净释放。

1300亿~1600亿吨

在有关多年冻土的诸多问题中，最为关键的自然是，多年冻土融化后会对气候造成什么样的影响？结合野外和实验室分析的数据，以及计算机模型对未来气候变化的模拟，多年冻土碳网络得出了答案。科学家认为，全球多年冻土碳库中的5%~15%将在本世纪释放，其中绝大部分是二氧化碳。

如果取这一预测的中间值，即10%，这意味着将有1300亿~1600亿吨碳在本世纪进入大气。如果这些碳主要以二氧化碳的形式释放，相当于到目前为止因为森林砍伐和其他土地利用方式变化而排放的碳总量，

但远低于化石燃料燃烧产生的碳排放。因此，此前一些未将多年冻土考虑在内的气候模型，实际上低估了气候变化的速率。在本世纪结束以后，多年冻土向大气释放碳的进程可能仍将持续，每增加一吨碳，人类社会遭受的损失就增加一分。

如何把更多的碳留在未融化的多年冻土里？对北极的多年冻土进行修复显然不切实际，唯一可行的解决方案是限制化石燃料的使用和森林砍伐，以此减缓全球变暖。只有这样，才能减缓北极地区多年冻土的融化速率，从而为所有纬度的人群争取更多的适应时间。

2015年，科学家首次得出了5%~15%这个数据，但要提升预测的可信度，我们仍需在多年冻土带建立一个全面的观测系统。随着传感器数量的增加，我们将能更好地监测多年冻土融化的过程，这些结果将为我们对待多年冻土的方式提供重要参考，我们也期待从中发现一些意想不到的结果。

包括美国能源部的下一代生态系统实验（北极项目）、美国航空航天局的北极北方地区脆弱性实验计划在内，一系列新的项目陆续启动，它们将填补目前的数据空缺，使得八英里湖等观测点的数据实现由点到面的扩展，最终覆盖全球。

一个至关紧要的问题是，随着气温上升，植物生长速率的提升是否可以抵消多年冻土的碳释放？最新的模拟结果表明，较长的生长季节、较暖的温度、多年冻土融化后土壤养分的增加，以及生长速率较快的植物分布范围的扩大，使植物生长速率的提升可能在本世纪抵消多年冻土释放的碳。但这个结果与八英里湖和其他观测点的测定结果相矛盾，这些测定显示，陆地生态系统中碳的全年净含量在减少。

更准确地模拟多年冻土融化后地面的沉降过程，是了解碳排放进程的另一个关键因素。目前，在模拟多年冻土与气候相互作用的大型模型中，这一部分并未被包含在内。随着多年冻土中的冰融化并流走，地面发生沉降，这会导致多年冻土的融化过程更加剧烈。如果我们将广泛的地面沉降考虑在内，之前对碳释放的预测是否需要得到进一步的修订？

2016年春季，我和同事回到八英里湖，看到了十分明显的地面沉降效应。我们在大约10年前搭建的木板路已经因为持续的地面沉降变得扭曲，我们布设的气体通量监测器和其他设备也出现了倾斜。当地的地面

变得起伏不平，坑坑洼洼。

2016年春季，八英里湖多年冻土的融化深度也比以往更深。在一些地方，融化深度超过一米，在前几年这种融化程度只是在夏季快结束时才会出现。这些异常的数据与北极其他地方的极端气候极其相似：记录显示，覆盖在北冰洋上的海冰提前消退，北半球的积雪和格陵兰冰盖提前融化。

多年冻土中的碳正源源不断地进入大气层，尽管不像有些人担心的那样，迅速爆发并在一夜之间改变气候，但这些碳确实将在今后很多年间广泛、持续地进入大气层。因此，人类社会将会面临更为严峻的考验。

本文译者 吴晓东是中国科学院西北生态环境资源研究院副研究员。
赵林是中国科学院西北生态环境资源研究院研究员，主要研究方向包括冰冻圈与水循环、寒旱区土壤学。

扩展阅读

High Risk of Permafrost Thaw. Edward A. G. Schuur and Benjamin Abbott in *Nature*, Vol. 480, pages 32–33; December 1, 2011.

Expert Assessment of Vulnerability of Permafrost Carbon to Climate Change. E.A.G. Schuur et al. in *Climatic Change*, Vol. 119, No. 2, pages 359–374; July 2013.

Climate Change and the Permafrost Carbon Feedback. E.A.G. Schuur et al. in *Nature*, Vol. 520, pages 171–179; April 9, 2015.

Methane: A Menace Surfaces. Katey Walter Anthony; December 2009.

深度

责任编辑：罗凯

对话 DIALOG

建筑碳排放，30年后下降74%

重塑能源不单纯是为了对抗全球变暖，也是为了能源安全。

本刊记者 罗凯



人物

姓名 乔恩·克雷斯（Jon Creyts）

机构 美国落基山研究所（Rocky Mountain Institute）

职务 落基山研究所常务董事

研究方向 能效提升和可持续社区的发展

2011年，落基山研究所针对美国能源改革撰写了一份前瞻性报告，这份名为《重塑能源》的报告清晰地刻画了未来新能源发展的路径，并且很快在业界引起了轰动。2013年，落基山研究所受中国发展改革委员会能源研究所邀请，作为技术合作伙伴参与“重塑能源：中国”项目，希望帮助中国提高能效和可再生能源占比，促进经济增长。

当时，乔恩·克雷斯（Jon Creyts）也来到了北京，他是落基山研究所的常务董事，主要负责“重塑能源：中国”研究项目的推进。对他来说，分析中国的能源问题，就像是为全球所有发展中国家做一个标志性的样本，一旦规划好新型能源生产和消费的路线，并且逐步推进，就能起到巨大的示范作用，引发连锁反应。

2016年的秋天，克雷斯再次来到中国。这次，他带上了《重塑能源：中国》的报告，在落基山研究所设立在北京的办公室中与《环球科学》记者会面。言辞间，国内新能源改革的技术路线已经跃然纸上，我们值得继续留意的，是那些在实践的过程中，仍会面临的问题。

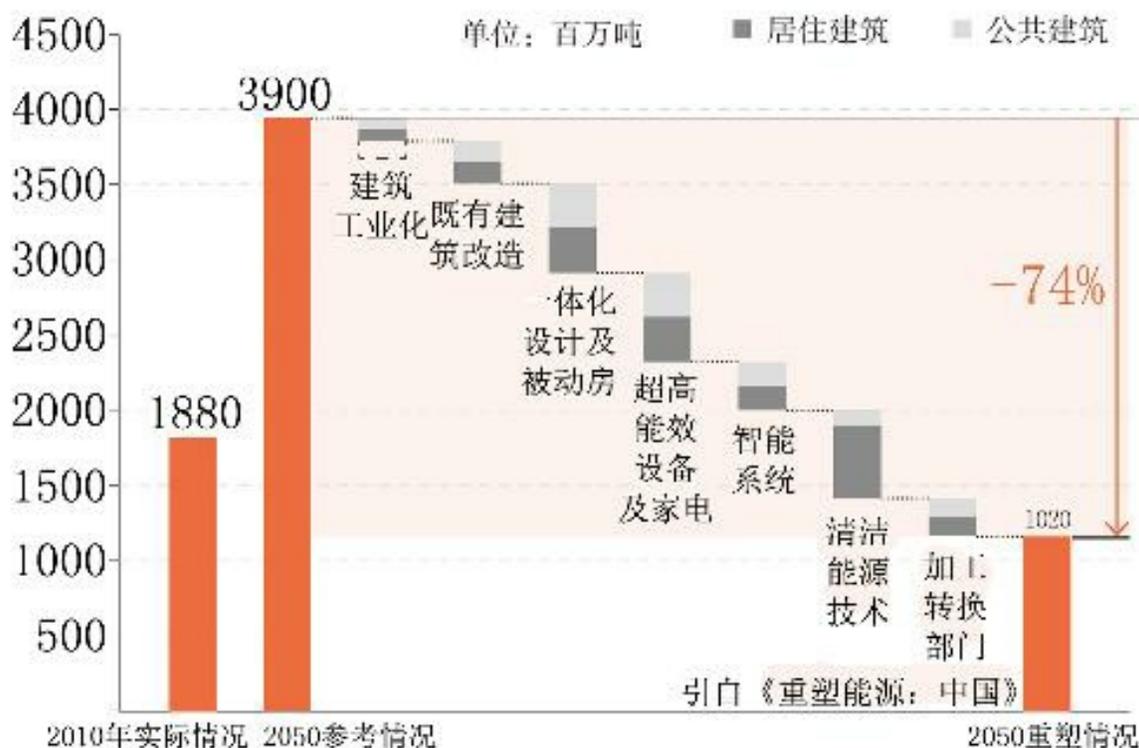
《环球科学》：由于地理位置和技术发展阶段不同，中美两国在能源结构上存在巨大差异，你觉得最明显的不同在哪里，在推进新能源变革中，又产生什么影响？

克雷斯：中国的能源结构之所以特殊，是因为煤炭在其中的占比非常高。全世界有一半的煤炭都是被中国消耗掉的。此外，中国也是全球最大的原油进口国，原油进口对中国经济的后续发展产生了很多制约因素。

中国不像美国或者俄罗斯，有大量天然气资源可用，如果把对环境有明显污染的煤从主要供能方式中去掉，国内的能源安全就成了问题。用新能源去填补这部分空缺并不是简单的环境保护问题，或者对抗全球变暖的问题。这是在为能源安全寻找一条新的出路，让经济更好地发展。

目前，煤炭发电占中国总发电量比例的八成左右，直接停掉燃煤发电不太现实。现在只有一边提高燃煤效率，减少污染和排放，一边扩大太阳能和风能的产能，提高电力调度的效率，填补新的能源需求。如果在未来10年中，中国不新增燃煤电厂，到新能源技术成熟，能够与传统燃煤发电竞价时，就可以顺势用新的清洁能源大面积替代燃煤发电。我们预估，到2030年时，燃煤机组装机规模要控制在10亿千瓦左右，2050

年装机规模需要进一步降低，控制在5.5亿千瓦左右。



通过调整能源策略，到2050年时，中国因建筑能耗排放的二氧化碳可比原计划降低74%。

《环球科学》：解决燃煤问题能在多大程度上改变中国的能源结构，这个症结解除后，能源转型还有什么问题？

克雷斯：燃煤发电只是属于电力供应中的一部分，在讨论重塑能源的主要路径时，我们希望能从4个方面入手，包括工业、建筑、交通运输和能源转换。其中能源转换主要指的就是电力供应。中国2011年的发电量为4.7万亿千瓦时，如果按现有趋势发展，到2050可能会发展到12.8万亿千瓦时，而按重塑能源的方式调整后，可以缩减到10.8万亿千瓦时的发电量。

调整方式很明确，在限制煤电的同时，发展核电和可再生能源电力。我们在美国专门建立了企业可再生能源中心（Business Renewables Center, BRC），协助企业直接购买电力公司规模的可再生能源。目前，已经有160多家公司通过这个平台直接购买了可再生能源。2015年，美国95%的可再生能源交易都是由这个中心的会员企业完成的。我们希望能在中国也尝试推动“企业可再生能源中心”项目，把可再生电力的需求方和提供方聚在同一个平台上，让它们更容易达成合作。

同时，我们也在进一步研究“绿色调度”，希望通过协调各利益相关方，把绿色的、清洁的电力优先调度出去。虽然国内短时间内无法让太阳能、风能等可再生能源在平均价格上与传统电力持平，从而取得调度的优势，但是在太阳能和风能资源集中地区，新能源的成本已经足够低廉了，我们可以在这里先促成一些合作。当然，我们是一家非盈利的研究机构，当市场机制相对成熟后，就会逐渐退出，让市场发挥作用，推动清洁能源的发展。

《环球科学》：《重塑能源：中国》在讨论重塑能源的重要路径时，把建筑单独拿了出来。我们很容易理解工业、电力等行业对重塑能源的重要性，但是建筑节能为什么会成为其中的重要组成部分？

克雷斯：虽然中国现在已经有大量的摩天大楼和数不清的高层建筑，但是，新建筑拔地而起的速度并没有明显减慢。就目前的情况来看，在中国一栋大楼的使用年限并不长，通常在几十年后就会拆掉再建。提高新建建筑的能效能够实现能源节约。而且，即使是已经建成的建筑，也有很大的改造空间。

前不久，落基山研究所位于科罗拉多州的办公总部刚刚落成，这座能够容纳130人办公的建筑能够在日常运行中达到零能耗的标准。我们采用太阳能为整座建筑供能，结合大量被动式的能源设施，通过精心的设计保证建筑的气密性和隔热性，好让整座建筑在太阳能的功能范围内，保证室内环境的舒适度。其中有些技术非常简单有效，比如，在两层玻璃间放入薄膜材料并注入氩气，就能让它变成“超级窗户”，制造出超过美国隔热标准3倍的绝佳隔热透光材料。

如果中国以后新建建筑都能在建造前做好节能设计，仅这一个环节就能节省大量的能源。还有，即使已经建造好的建筑，经过节能改造，也能极大地降低能源消耗。

我们曾经为纽约的帝国大厦做过节能改造。这座近90岁的建筑内部设施非常陈旧，能源效率特别低，但它本身是美国最具代表性的历史建筑之一，所以即使要做能效改造也不能改变它的外表。

气密性和隔热性能非常好的窗户在这里也派上了用场，我们还给它做了墙体保温，安装按需调节的通风系统和楼宇控制系统，建筑内的灯具也全部换成了节能式。我们使整座建筑的能效提高了近40%，让它比

业界当时的平均水准还要高。

可以想象，如果能够把这些措施应用到中国既有建筑的改造上，庞大的建筑基数完全可以产生出惊人的节能效果。根据我们的估计，推进重塑能源推荐的节能路线后，在2050年时，将使因建筑能耗排放的二氧化碳降低74%。这可不是一个应该被忽略的数字。

《环球科学》：说到重塑能源的4个重要途径。其中每一项都与石油行业密切相关。在重塑能源的总体路线图中，按照电热当量法计算，非化石能源占比也会从2010年的4%逐步提升，在2050年时达到34%。这与中国三大石油巨头及其麾下百万工人的利益紧密相关，你怎么看这种竞争关系？

克雷斯：中国本土的产油量很少，大部分需要进口，为了确保石油的平稳供给需要投入大量额外的资金。但是，新能源改革却是一次契机，可以让能源从出产、加工到消费的整个流程都放在国内，更简单就能确保能源安全问题。

其实这还有一个思维转变上的问题。如果三大石油巨头只是把自己定位在化石燃料提供者的位置上，他们就一定会面临市场份额缩减的问题。新能源汽车的涌现会使石油的消耗量出现下滑，目前只有重型机车和化工领域依然无法离开石油，他们的重点可能会放在这里。如果三大巨头把自己定义为能源公司，那接下来，他们的策略可能会积极跟进新能源技术的研发，在新能源市场中攻城掠地，从而保障自己的市场份额。

重塑能源是一项长期计划。从2010年开始，转型已经启动，到2050年时，中国应该会进入中等发达国家水平。到时候，电动汽车应该会全面普及，非化石能源会占据非常高的比例，甚至近零能耗建筑和复合型的高效工厂也会随处可见。现在，随着中国经济进一步快速增长，我们希望可再生能源能帮助中国解决气候变化、城镇化污染和能源安全问题带来的各种挑战。我们也知道，在实践中推进可再生能源需要解决许多具体的问题，但为了更友好的环境和更高的生活质量，这些努力总是值得付出的。

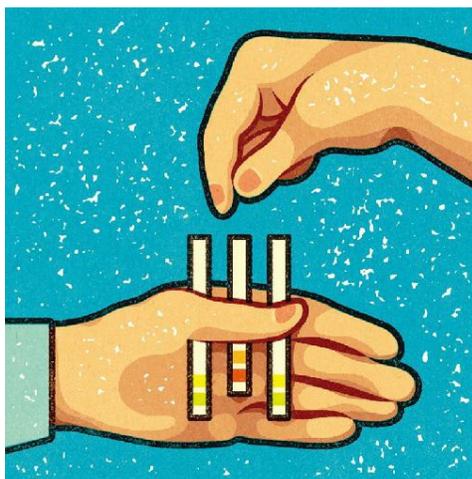
哪些检查在误导患者？

对于技术上准确，但对人体健康往往有害的检查项目，FDA将采取制裁措施。

撰文 查尔斯·施密特（Charles Schmidt） 翻译 贾明月



查尔斯·施密特是美国缅因州的一名自由科学记者，主要关注全球健康与环境方面的新闻。



在美国，诊所和医院每年都会开出价值几十亿美元的实验室检查项目，这些项目包括血液胆固醇水平，以及是否存在增加阿尔茨海默病患病风险的基因，简直会把患者从头到脚查个遍。医生和患者默认，他们能信任这些检查的结果。

大部分时候的确如此，但是，不同实验室的检查结果的可信程度并不一样，一旦产生有缺陷的检查，可能会导致严重的后果。有时，这些检查会漏掉威胁生命的疾病；有时，却会查出并不存在的问题，这可能会让患者接受没有必要甚至对健康有害的治疗方案。

本来确认疾病风险或确诊疾病的各种工具，都使用了一套共同的医学标准，但是，由于管理疏漏和历史遗留问题，很多种类的实验室检查都不受这类标准的约束。一般我们把这些检查叫做实验室自建检查项目（lab-developed test, LDT），由设计检查的实验室做具体的操作，并作进一步解释。与之相对的其他检查（比如快速检测链球菌的化验）会更便捷，各地医生和相关工作人员都能理解和使用这些数据。大部分人第一次遇上LDT检查，可能都是因为广泛使用的血检能提供的信息非常有限，一般的体检让医生无法做出诊断。

麻烦的是，很多专家认为，这类检查大多是没用的，有些甚至可能会危害患者。比如，可能会让很多健康人相信自己患上了罕见的疾病，或者诊断出现在还不会造成什么问题的病症，又或者在没有可靠科学方法证明病人确定是健康的情况下，就让他们相信自己的身体是健康的。“我们往往认为实验室检查结果是终极真相，”哈佛大学医学院的病理学助理教授拉米·阿诺特（Ramy Arnaout）说，“但是，没有什么检查是百分百准确的，有些LDT在医学上根本没用。”

美国食品及药品管理局（FDA）正在采取措施，希望恢复大众对实验室自建检查项目的信心。2014年，FDA发布了还在讨论期的一份指南，第一次将这些检查项目划归联邦监管。指南还规定，实验室必须在项目可能面世之前，向FDA提交有效性证据。尽管FDA还没有对指南的生效时间作出进一步说明，但来自业界的一些声音表示，最终裁决可能会很快生效，这使部分实验室的主管非常懊恼，实施指南可能会推升成本，阻碍医疗实践。

不断扩大的漏洞

25年前，LDT在医学实践中的作用微不足道，FDA对它们不屑一顾。只有少数几个LDT能够广泛使用，其中最有名的是用于发现宫颈癌的宫颈涂片检查。当时FDA的官员采用了一种“自由裁量”的政策，这就意味着，他们基本上对LDT放任自流，只关注那些明显可能会对患者造成伤害的工具，比如有问题的起搏器。

不过，在20世纪90年代以后，研究者开发出了新型的基因工程技术，LDT的便捷性得到了极大的扩展。以前的LDT只是寻找少量特殊的蛋白质，而新出现的基因检查方法，可以在人类基因组的30亿对碱基中选取任意数量的碱基做筛查，寻找与疾病相关的异常。此外，检查变得越来越自动化，使LDT也越来越容易设计和使用。

技术的改进让LDT呈爆发式增长，进入市场的LDT的数量和多样性都发生了巨大的改变。有人估计，目前在美国有11000家实验室提供6万到10万种不同的LDT。显然，没有人知道具体的数字，因为这些检查不需要在任何地方登记。

在现行的美国联邦法规中，LDT躲在巨大的漏洞下，不需要评估医学有效性，也不会被要求公布相关的研究进展。创建LDT的实验室只需要符合某些基本的科学实践标准就行了。在医生可以开始为患者开出LDT之前，甚至之后，美国FDA都不会像对待大部分处方药或医疗设备那样进行审查。

这个漏洞意味着，与开发大部分其他种类的医疗产品相比，开发新型LDT并以此牟利非常简单。不管是对只提供一两项检查的小型创业公司，还是对提供上千项检查的大型诊断实验室，研发LDT都要容易得多。然而，随着检查数量不断增长，也出现了一系列的报告，表明某些LDT已经因为产生有误导性的结果伤害了患者。

装满鱼的池塘

FDA明确指出，有20种不同类别的LDT是明确有害的，其中包括经常给出错误结果的莱姆病检查和百日咳检查，还有声称能确定女性罹患卵巢癌风险的检查。比如有一种LDT就试图通过检测CA125蛋白在血液中的水平，推断患者是否可能会患有卵巢癌。2016年9月，FDA认定，筛查这种蛋白质“不能提供明确的作用”，并警告医生不要推荐或使用这

种检查手段。

这些让FDA发怒的检查可能的确检测了他们声称要检测的物质。问题是，检测的物质可能无法证明或者代表受试者的某项健康状态，它们不是有效的指标。比如，在卵巢癌检查中，CA125确实是由卵巢产生的，理论上，CA125水平高可能预示着存在多余的卵巢细胞——也就是说可能存在肿瘤。但实际上，很多CA125水平高的女性并没有卵巢癌，相反，很多卵巢癌患者的CA125水平并不高。因此，并不能通过CA125的检测数据准确诊断患者是否得了卵巢癌。但是，很多检查结果呈阳性的女性显然会被影响：可能由于过分恐惧患上癌症，她们无论如何也要把自己健康的卵巢摘除掉。

要想确定一种医学检查的结果是否可以准确指示疾病，科学家可以使用一种有些难以理解的统计比例数值——阳性预测值（positive predictive value, PPV）。这个指标考虑的是特定人群中某一种疾病的发病率。

为什么这样的指标在确定一项检查是否有用时很重要？要理解这一点，最好通过一个比喻。如果你把挂了鱼饵的鱼钩投入一个装满鱼的桶中，当你感觉鱼线被拖拽时，有鱼上钩的可能性非常大。不过，如果这个挂了饵的鱼钩投入的是一个没有鱼的淡水湖，鱼线拖拽时，有鱼上钩的可能性就低了很多，更有可能的是被树杈挂住了。因为相同体积的水里，桶里的鱼比湖里要多得多，所以桶里的拖拽PPV接近100%，而没有鱼的湖里，拖拽PPV要低很多。

这项重要的统计学特性非常有用，它解释了为什么FDA会对这种现行的卵巢筛查提出质疑。开发这种筛查的实验室声称卵巢癌检查的PPV为99.3%，拥有很高的检出率。而生物统计学家通过独立的严密分析发现，这个数字是基于一项单一无对比的实验得出的，实验中有半数患者已经确诊患有卵巢癌了——这是一个经过高度选择的人群，相当于医学上装满鱼的池塘。

在美国，一般每2500名绝经后女性中会有1名出现卵巢癌，当研究者用这个几率重新计算上述检查的PPV时，数值直接降到6.5%。换句话说，在这个特殊的恶性肿瘤检查中，15名拿到阳性结果的患者中只有1名真的患有卵巢癌。而其他14名患者假如认可这个检查的结果，很有可

能因为相信自己有99.3%的可能患有癌症，接受根本不必要的手术，摘除她们本来十分健康的卵巢。

业内人士的忧虑

FDA并没有足够的资源去监管近年上市的所有LDT，因此他们计划根据特定检查的误导性或错误结果导致重大伤害的可能性，把这些检查分为3类。在最新的指南中，如果错误结果会导致死亡或长期残疾，相关LDT就会被认为是高风险的，需要接受最严格的审查，不仅检查的信息需要录入一个全国性的数据库，提供检查的人也需要在出售服务前，向FDA证明检查的安全性和有效性。约翰斯·霍普金斯布隆伯格公共卫生学院（Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health）的医生乔舒亚·沙夫斯泰因（Joshua Sharfstein）说：“基本上，在允许一种高风险LDT上市前，FDA要看到正面的证据才行。”

不过，即使是按这种分类方法管理，也让很多行业领袖和一些专业医学会感到忧虑，美国医学会（American Medical Association）就是其中一员。“这实际上取决于FDA选择如何定义高风险，但这一点目前并不清楚。”明尼苏达州罗契斯特市梅奥医学实验室（Mayo Medical Laboratories）的首席医学官柯蒂斯·汉森（Curtis Hanson）说，这家实验室每年会进行2500万个实验室检查。“高风险的检查可能占到如今市场上LDT的1%~10%。FDA如何才能有效率地审查，进一步找到那些存在问题的少数案例，而不拖慢审查进程？”

对患者和他们的医生来讲，问题更加根本：为什么一个商业化的医学检查还需要他们来操心，还需要他们来担忧检查是否弊大于利？

专栏 **COLUMN**

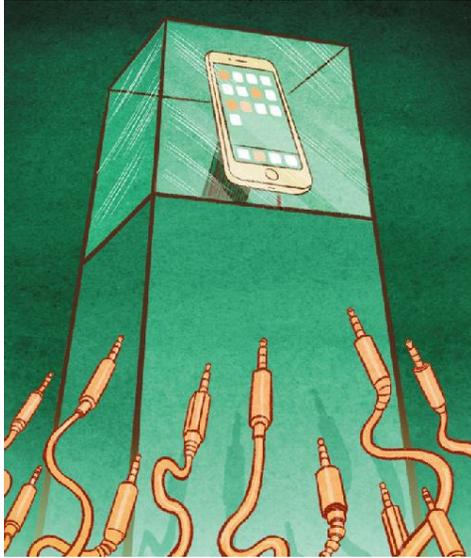
别为耳机插孔哭泣

苹果已经抛弃了耳机插孔，其他厂商很快也会跟上。

撰文 戴维·波格 (David Pogue) 翻译 薄锦



戴维·波格是雅虎技术频道的专栏作家，也是美国公共广播公司 (PBS) 几个新星短剧 (nova miniseries) 的主持人。



2016年9月，苹果发布了一款不带耳机插孔的新iPhone。人们并不满意。

有评论人士写道：“这是为了利润省掉一只连接头，徒增大把麻烦。”另一人说：“苹果就是想看看大众到底能有多蠢。”第三个人评论：“根本没有理由抛弃无可挑剔的通用耳机插孔。”

而事实证明，这么做还真的有些理由。插孔本身的确很小，但是安装在手机里的插座相对而言就很大了。苹果表示，将它移除后，就能放进一块更大的电池，让iPhone 7每次充满电后的续航时间增加两个小时，还能为摄像头添加稳定装置，减少拍摄照片时产生的抖动，甚至还能再把扬声器换成立体声的。

苹果将在套装中同时提供一对新的耳塞式耳机（插入手机的充电口使用）和一个两英寸的转换插头（供标准耳机使用）。但是所有的有线耳机终究只是权宜之计，早晚有一天，我们都会去买无线耳机，现在它们的售价低到只有17美元（就在今年，蓝牙耳机的销售额首次超过了有线耳机）。苹果说，所有设备都在往无线方向发展，我们的音频配件又有何不可？

如果你是一名来自半人马座阿尔法星的地球观察员，大概会对此一头雾水，搞不懂这一堆地球人在吵吵个什么劲儿。苹果砍掉了一个已有52年历史的配件，给出了另外两种免费的办法来替代它，然后利用省出

来的内部空间提供更好的性能。这有什么大不了的？

另一方面，如果你是一个在过去20年中一直关注技术领域的人类，大概又会对我们如此健忘感到奇怪。

苹果素来爱打着“进步”的旗号，砍掉那些“标准”配件，这没什么好惊讶的。毕竟，它可是那家因为消灭了软驱、光驱和拨号调制解调器而出名的苹果呀。它还去掉了智能手机上的实体键盘呢。而且它也先后停用了一系列自己家的连接头，像ADB、SCSI、FireWire，还有iPhone最早使用的充电插口。

每一次，公众都义愤填膺。“iMac电脑，简洁优雅，不用软盘——肯定要完。”1988年的《波士顿环球报》（*Boston Globe*）如此点评道。（然后iMac很快就成了畅销电脑。）但是每一次，整个电脑行业的反应都一样：有样学样。戴尔、惠普等公司，也都从自家的标配PC中剔除了软驱和拨号调制解调器。

所以当中的套路很明显了：科技公司（常由苹果带头）更改了某件事的惯常做法。公众惊呼这是血淋淋的谋杀。专栏作家也跟着捶胸顿足（我曾经也是其中一员）。

但是过个两年，我们就完全接纳了新技术，彻底忘了旧的。你上一次怀念拨号调制解调器的神速，恐怕已经是好多年前的事了吧，希望自己还有软驱可用呢，至少也得是10年以前。

那是否意味着，我们这群人类简直愚不可及，目光短浅？倒也不是。就科技产品而言，每一次的变革都是有成本的。金钱成本，这个肯定不用说。行业完全抛弃标配的软驱和光驱时，我们手里的那一大堆盘立刻变得一文不值。面对渐行渐远的耳机插孔，我们同样也要为新出现的无线耳塞付出成本。

还有学习成本。每当有人淘汰了一种我们已经得心应手的技能，带来一种我们感到陌生的新技能，总要我们花些时间去迎接这项挑战。甚至还有便利成本。转向新标准的过渡期间，我们常常不得不购买和携带一些转换用品，譬如外接DVD驱动、USB调制解调器——或者是耳机插孔转换插头。

然而最最重要的，还是迎接变革所要付出的心理成本，那种原始的“谁动了我的奶酪？”的无助心情。人类这个物种，并不喜欢生活方式的变迁，哪怕逻辑告诉我们应当促成它们的发生。（同理可见：气候变化，饮食，吸烟。）

这是因为，在人类的内心深处，改变就意味着突然跳入未知的疆域。而未知，就像我们的尼安德特人祖先在逐渐走近一个漆黑无比的洞窟时的感受那样，会让人心生恐惧。

大型科技公司永远都会乐于把大众猛推进未来里。到头来，抵抗是无用的——但也是完全可以理解的。

专栏 **COLUMN**

女科学家的透明天花板

要改变科学界女性遭遇各种歧视的现状，我们需要转变整个文化。

撰文 汉娜·A·瓦伦汀（Hannah A. Valentine） 翻译 薄锦



汉娜·A·瓦伦汀是美国国立卫生研究院的首任科学人力资源多样性主管



当今时代的女性科学家在谋求事业发展时，是否能够获得一视同仁

的对待呢？相关研究表明，事实恐怕并非如此。举例来说，《学术医学》（*Academic Medicine*）上刊载的最新研究发现，美国男性科学家的工资水平显著高于女性，差距可达20000美元之多。另一研究表明，相比于男性科学家，女性也不易获得稳定的研究经费支持，而研究经费是所有科学家的事业命脉。

就某些标准而言，女性科学家做得还是很好的。新颁发的博士学位和硕士学位中，约半数都由女性摘得，以助理教授作为事业起点的男女比例也大体等同。此外，研究表明，白人女性从美国国立卫生研究院（NIH）拿到研究项目经费的可能性跟白人男性是一样的，而这正是实现事业独立和拿到终身教职的关键第一步。不过，同样是这项研究表明，亚裔与非裔的美籍女性科学家拿到经费的可能性就要低上一些，这意味着其他族裔的女性面临着“双重束缚”。争取研究经费的竞争本就异常激烈，每三名科学家（女性或男性）中只有一名能够获得足够的NIH经费来维持实验室的开销，在这种环境下，上述这种细微的差别对待就显得格外重要。

差别对待还不止这一处。比如说，即便获得了研究经费，女性科学家要让经费源源不断地保持到有所发现的那一天，仍然可能面临着重重障碍。在接受了三四年的经费支持后，科学家必须想办法说服NIH，自己已经做出了足够的成果，应该继续获得进一步资助。有研究者对科学家审批科研经费时给出的评语进行了文本挖掘分析，结果发现评审人员面对女性的申请，更爱使用“不同凡响”、“卓越”这样的褒义词汇，但是给她们的评分却要低于男性。这一证据意味着，评审人员在评判女性提交的申请时标准有所不同。

从初入科研事业开始，女性从院校获得的经费就要比男性少：平均下来，女性能够拿到的实验室启动经费，要比男性少40%。两种性别在请假时所获得的对待也同样存在差别。男性常常会请“为文化所认可”的带薪假，比如学术假，这对他们最后拿到的薪酬不会有任何影响。而女性虽然也请学术假，但更多的时候，她们的请假事由都与家人有关，而这会招人诟病。

于是在很多时候，女性干脆就选择不请假。我们需要重新审视这些排斥家庭观念的陈腐制度。我们还应重新检讨对兼职教师的学术偏见，以新的目光看待工作与生活的平衡点，将其视作为事业发展的帮手，而

不是事业停滞的根源。我们知道，富有弹性的工作安排可以提高满足感，甚至工作绩效。

至少，我们可以先解决一个问题——薪资待遇，只要让各大学的系主任和校长对此负起责任就能做到。薪资平等，应当成为考核校领导层绩效的一项关键因子。研究经费方面，我们知道确实存在着弱势群体。NIH近期研究表明，美籍非裔科学家提交的申请最终能够拿到经费的比例，要显著低于白人科学家提交的申请（11%对17%）。NIH眼下正在研究，若将经费申请书中的所有个人信息删除，是否会导致最后的评审结果有所不同。倘若确然如此，删除个人信息说不定也能同样影响到女性申请的评审结果。最后，我们必须解决最近频频引起关注的性骚扰问题，虽然无论男女均有这方面的困扰，但是女性遭受性骚扰的比例要明显高出一大截。

女性能为研究工作带来独特的视角，而从国家的立场出发，我们需要集合所有的一流头脑。改正这一问题，是符合所有人利益的明智之举，社会进步要靠男女共同改变旧有文化。越界行为往往属于无心之过。但存在于我们潜意识中，无意抱有的成见，却会导致歧视，进而对满足感、生产效率和职业发展造成巨大的影响。无法消除女性在科学界所遭遇的不平等待遇，对于男女双方而言都是一种失败，对于整个生物医学研究事业同样如此。

佛罗里达，美国最奇怪的州

佛罗里达是飓风的家园、入侵物种的乐土，同时还是海平面上升和天坑出没的地方。

撰文 史蒂夫·米尔斯基 (Steve Mirsky) 翻译 红猪



史蒂夫·米尔斯基开始撰写反重力思考专栏时，一块典型的构造板块距离现在位置大约还有0.9米。他也是《科学美国人》播客 Science Talk 的主持人。



这是飓风的家园，入侵物种之州，也是海平面上升的土地。在这里，你要么自由地生活，要么在陷坑里死去——上面这些说法都可以作为佛罗里达的官方法定昵称。然而塔拉哈西（佛罗里达州首府）的立法

机关却似乎铁了心要选“阳光州”，虽然亚利桑那、加利福尼亚、内华达、新墨西哥和得克萨斯的日光都要比佛罗里达充沛——这块知识的金砖是我在一本新书里挖掘到的，书名叫《哦，佛罗里达！美国最奇怪的一个州是如何影响全国的》（*Oh, Florida!: How America's Weirdest State Influences the Rest of the Country*）。

作者是《坦帕湾时报》（*Tampa Bay Times*）的记者克雷格·皮特曼（Craig Pittman），土生土长的佛罗里达人，也正因为如此，他成为了佛罗里达州的“少数族裔”。他在书的第二页写道：“佛罗里达的1900万人口中，只有约1/3是本地人——在这600万本地人中包括一部分在过去十年中出生的儿童（没人知道他们有多少，准确的数字要到2020年普查时才会透露）。”

这个不法土地交易州的人口爆炸，是我在公路上畏首畏脚的一个原因。在我眼里，公路上有一半司机好像都是小青年，他们在驾驶之余还要忙着发短信、涂痤疮软膏，要集中精神可真不容易。而另一半司机则属于“最伟大的一代”（指美国大萧条时期成长的一代人），他们的反应和视力自艾森豪威尔交出白宫钥匙之后就一直在退步。皮特曼写到，到2012年为止，佛罗里达有6.5万名持有驾照的司机年龄在91岁至100岁之间，

另有“455名持有驾照的司机达到或超过了100岁。”乖乖！

说到白宫和不良驾驶，当你读到这些文字时，佛罗里达州可能又一次在大选中和全美的民意撞车了（参见1876年和2000年的总统选举。）这件事我目前还无法确定，因为我写这篇专栏是在2016年10月初，手里并没有水晶球可以预知将来——不过我倒可以在佛罗里达州小镇卡萨达加（Cassadaga）买一只。皮特曼在书中也写到了这个地方，说它“人均水晶球拥有量极高，人称世界超自然之都（*Psychic Capital of the World*）”。幸好，佛罗里达州还是詹姆斯·兰迪（James Randi）的老家，这位前魔术师和逃生大师奉献了后半辈子的时间驳斥这类超自然的说法。

《哦，佛罗里达！》还写了这个州的奸诈（包括政治腐败和商业腐败，两者常有勾结）和愚蠢（就和迪斯尼乐园的那些蠢狼笨鸭子一样）。不过皮特曼也尽量插进了许多科学知识——比方物种入侵。“科

学家认为，佛罗里达的入侵物种比其他任何一个州都多。”他写道。

鬣蜥就是一个越来越麻烦的问题——我曾在格莱兹路和441国道（博卡拉顿道路名）的繁忙路口看到有6只鬣蜥在一片砂土上撒欢。你们这些西博卡拉顿（West Boca Raton，位于佛罗里达州棕榈滩县的住宅区，环境优越且游客较少）的拥趸可要留神。不过现在最著名的入侵物种还数缅甸蟒，它们在大沼泽地（Everglades）已经到处都是，并且据皮特曼的说法，已经“将那里栖息的兔子、浣熊和狐狸消灭干净了。这些蟒蛇还试过把短吻鳄吞掉，但是遭到了短吻鳄的反击。”

你也许看过一张2005年在互联网上疯传的蟒蛇大战短吻鳄的照片。那条13英尺（约4米）的巨蟒吞下了一条6英尺（约1.8米）的鳄鱼，鳄鱼用爪子挖穿蛇腹，两者同归于尽。“蛇的肚子都炸开了。”皮特曼写道。他的书里还写到了入侵的野猪、猴子和非洲大蜗牛。这些蜗牛都是走私进来的，它们的黏液据说能够养生，人们喝下之后纷纷得病。

佛罗里达周围的海洋“自从有可靠记录的1880年以来”已经上升了约20厘米，皮特曼写道。这个上升速度还在加快。而佛州的陆地“质地如同瑞士奶酪，地质学家称之为‘喀斯特’，即很容易崩塌的石灰石岩洞。”那也就是陷坑了。1981年在温特帕克（Winter Park）就出现了一个陷坑，它吞噬了“25万立方码（约15万立方米）土壤、一家进口车修理店的5辆保时捷、一个奥运标准泳池的深水区、两条街道的大块街面、还有一座有三个卧室的住房。”

我今年就要到佛罗里达去过感恩节，得趁它还在的时候去看看。

专栏 **COLUMN**

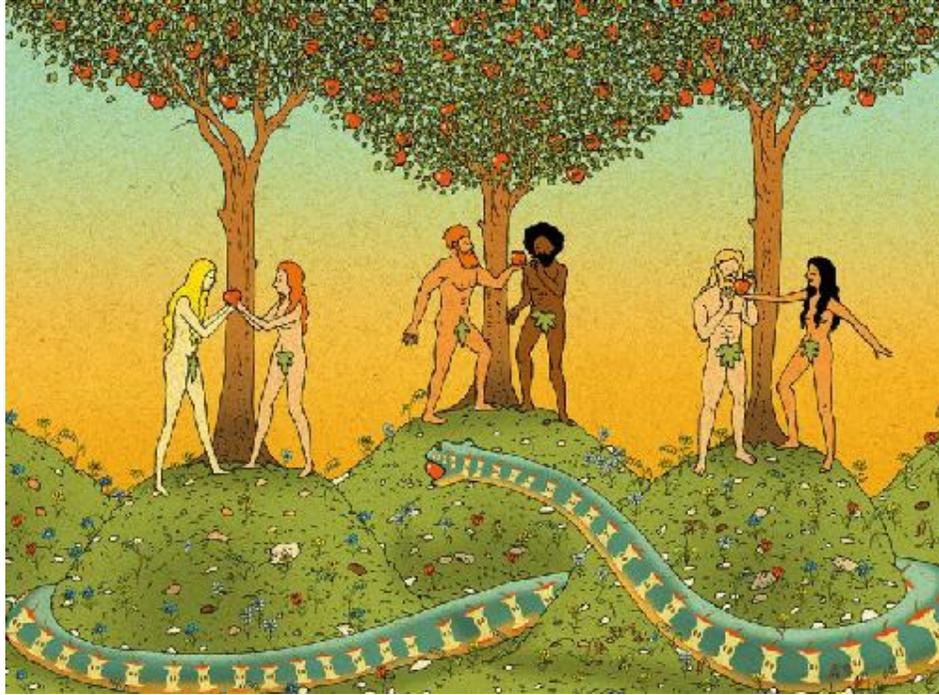
什么左右了性取向

这是一场关于性取向的新战斗，有人总想用社会道德扰乱科学研究。

撰文 迈克尔·舍默（Michael Shermer） 翻译 红猪



迈克尔·舍默是《怀疑论者》杂志的出版人。他的最新著作是《道德的弧度》（*The moral arc*）。欢迎在Twitter上关注他：[@michaelshermer](#)。



你是什么时候打算做异性恋的？什么？

根据人口分布（人口中大约有95%是异性恋），阅读本栏的各位读者大多数应该都是异性恋。你们并不是主动选择了这个性取向，正如同性恋的男女没有主动选择他们的性取向一样。然而不久之前，非同行评议的期刊《新亚特兰蒂斯》（*The New Atlantis*）却在秋季号上刊登了一项关于“性征和性别”的新研究，作者是约翰斯霍普金斯大学的劳伦斯·S·迈耶（Lawrence S. Mayer）和保罗·R·麦克休（Paul R. McHugh）。两人在文中宣称：“这个领域中还没有确切的科学知识”，还说“没有科学证据显示性取向是固有的、天生的生物学属性”，并且“没有人是生来如此的”。这听起来简直像上一次发生性别论战时的论调，那可是在上世纪90年代，现在怎么还有人这么说？

深挖背后的信息，你会发现一条有趣的线索，《新亚特兰蒂斯》的发行者之一是美国伦理与公共政策中心（EPPC）。中心的宗旨是“将犹太教—基督教的道德传统应用在公共政策的重大问题中”。这已经不是科学态度了。EPPC的网站上还说，他们的学者“一直致力于维护并发扬美国的建国纲领，尊重人的固有尊严、个人的自由和责任、正义、法治以及有限的政府。”

不管人的性取向是否由生物学决定，这几条纲领难道不是对每一个

人都适用的吗？当然，在今天的大多数西方国家，人民也确实得到了这样的保护。然而在犹太教—基督教主导的美国却有着这样一种论调：

《圣经》说同性恋是一种罪（《利未记》20章13节）。如果性取向有强大的生物学原因，你就很难要求那些男女同性恋者为自己的罪行负起道德责任；但如果性取向可以自由选择，那他们就还是可以得到纠正（通过“性取向转化疗法”）和宽恕（常用的比喻是“恨罪恶，爱罪人”）的。福音传教士吉米·斯瓦加特（Jimmy Swaggart）这样解说了其中的逻辑：“虽然原罪的种子里包含了各种偏差、反常、堕落与恶行，但同性恋者却不可说自己生来就是如此的，就像醉鬼、赌徒和杀手不是天生的一样。”

虽然《新亚特兰蒂斯》的两位作者没有得出这样粗鲁而偏狭的结论，但是在美国国立卫生研究院的荣誉研究员、遗传学家迪安·哈默（Dean Hamer）看来，他们的研究依然很成问题：“这项研究的参考文献和论证都是选择性的、过时的，它的目的是扰乱我们对于性取向和性别认同的理解，而不是澄清这些概念。”比如迈耶和麦克休宣称，性取向的概念是“模糊的”，“没有可以用于实证研究的公认的定义”。事实并非如此。美国心理学会明确地将性取向定义为“一种持续的模式，由情绪、浪漫和/或性吸引主导，对象可以是男性、女性或是男女两种性别”。哈默也指出，性取向的“模糊”程度要比“自尊”和“热情”之类的人格特质低得多，但科学家在研究后两个概念时却可以不受宗教和政治的干扰。

迈耶和麦克休在数据的采用上似乎也有偏颇：在过去16年间发表的同行评议的论文中，有6项研究用恰当的概率抽样方法研究了这个问题，他们却只参考了其中的一项，而且像哈默指出的那样，“还是对遗传因素的影响估计最低的一项。”两人的这篇论文还遭到了一项大规模元分析研究的否决，这项研究是西北大学的心理学家迈克尔·贝利（Michael Bailey）和他的同事共同完成的，2016年9月，他们在同行评议期刊《公共利益中的心理科学》（*Psychological Science in the Public Interest*）上发表了结果，指出“表明性取向由非社会因素造成的证据，要比它由社会因素造成的证据更多。”这些证据包括：“针对合理取样的双胞胎，研究基因遗传影响相对稳定的案例；从跨文化的案例中，研究兄弟出生顺序对于性取向的稳定影响；以及男性婴儿在被手术或社会‘改造’成女孩之后，他们的性取向却维持不变的事实（也就是他们依然为女性所吸引）。相比之下，一些经常有人谈到的社会因素（包括成

年同性恋者的引诱、父母教育的混乱或者同性恋父母的影响）通常都起不到什么作用，而且还会与许多其他因素发生混淆。”

任何与宗教或政治交叉的研究领域都面临一个问题，它很有可能会出现怀有成见的推理和证实偏见。《圣经》中说到的“寻找，就寻见”，就是这个意思。用既定的概念框定认知，意识形态就会掩盖事实，而遭殃的却是科学了。

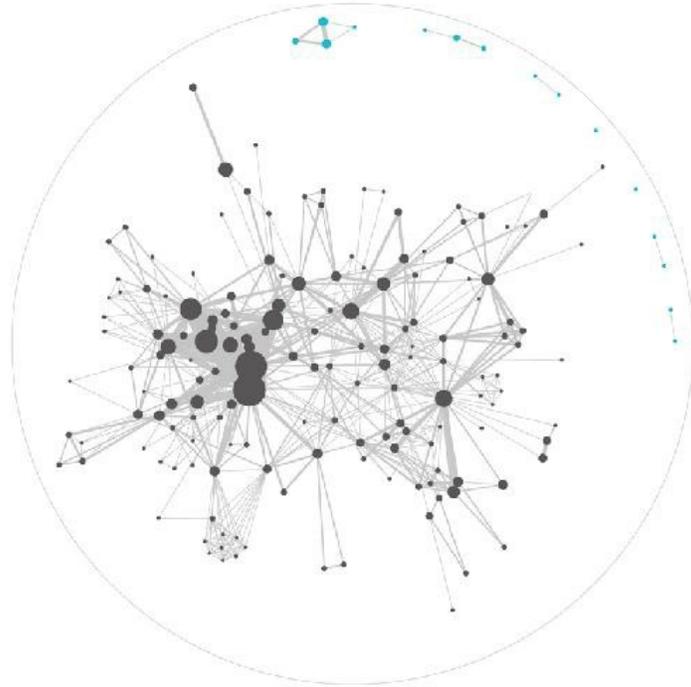
特斯拉、Facebook创新之道

从专利拥有者所处的圈子和协作的过程，可以看出一家公司的创新模式。

撰文 马克·菲谢蒂（Mark Fischetti） 翻译 郭凯声

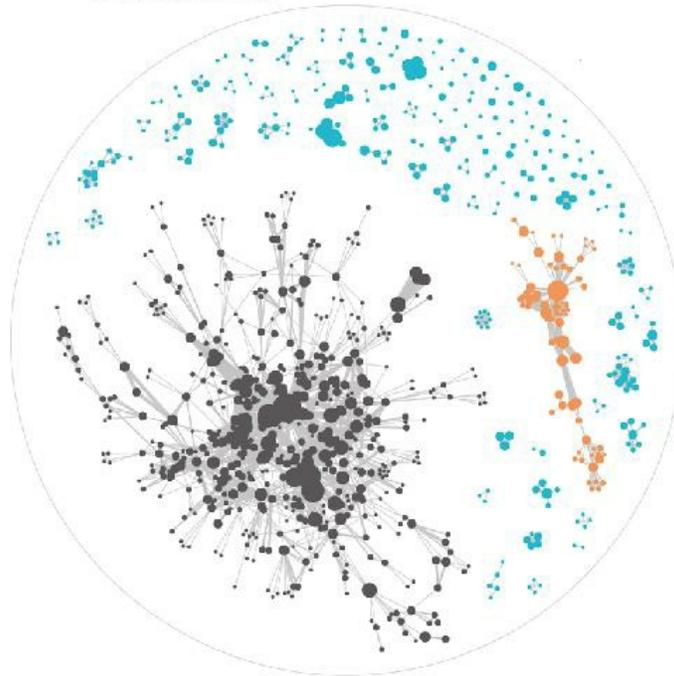
关于企业如何进行革新的问题，已经有许多著作在进行探讨，但大多数依据的都是个案研究。最近，美国专利与商标局从数据的角度，对企业创新进行了深入剖析。美国专利与商标局分析了三家不同行业的大型高科技企业——包括电动汽车公司特斯拉（①）、社交网络公司Facebook（②）以及生物技术公司Intrexon（③），统计了这些企业的员工所获得的专利。美国专利与商标局资深经济师阿曼达·迈尔斯（Amanda Myers）指出，从员工发明专利时所处的圈子和协作过程，可以看出公司的创新模式。这三大企业都取得了骄人成绩，可见，成功之路并非只有一条。

① 特斯拉：



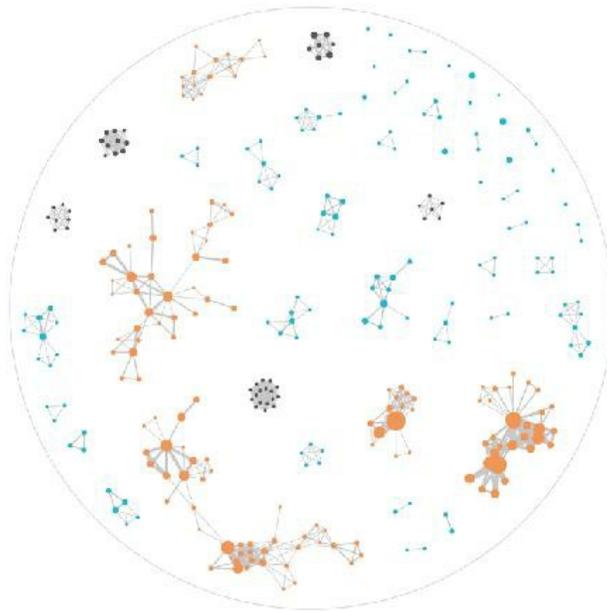
特斯拉的绝大多数发明人才组成了一个庞大的合作网络（灰色），其中有些人是获得过多项专利的高产牛人（最大的结点），有些人则在多个团队间起着牵线搭桥的作用（众多互连线条汇合的结点）。少数几名员工则基本上是单枪匹马在奋斗（蓝色）。特斯拉看起来是依靠一个单一且复杂的创新圈子，在这个圈子中，几乎每一位发明者都与其他许多发明者有联系，这或许是因为许多研发工作都与产品的核心即电池技术有关。凭借广泛的合作，各种创新点子可以飞快地在众多创新达人之间交流。

② Facebook:



在特斯拉和Intrexon，都是只有一种创新模式占主导地位，而Facebook的情况则有所不同。Facebook的专利持有者通过多种不同的方式合作，从各个不同方面为最终产品作出贡献。一个规模庞大的创新圈子网罗了该公司大约60%的发明人才（灰色），包括最多产的一些骨干人物（最大的结点）。还有一批员工组成了一个相对较小且成果丰硕的次级圈子（橙色）。其他一些员工则聚集在若干更小的独立团队中玩创新。

③ Intrexon:



Intrexon的发明队伍包括好些个规模相当大且相互独立的团队（不同颜色的密集点群）。也有一些发明者要么单打独斗，要么两人一组或三人一组地独自搞革新。总的来说，Intrexon的创新网络高度分散，这或许与该公司开发的是一些彼此大不相同的专业产品有关系。

• 1 ● 76

每个点（即结点）表示一位发明人，点的大小则代表某位发明人在2007到2011年间所获专利的数量。共同拥有至少一项专利的发明人通过线条连接起来。线条的粗细代表共有专利的多少（细线表示少，粗线则表示多）。聚集成团的点表示发明人之间有紧密的合作关系。

数据来源：U.S. Patent and trademark office and www.patentsview.org
制图：凯蒂·皮克（Katie Peek）

读来编往 **FEEDBACK**

责任编辑：罗凯



编辑寄语

上一期封面故事《2016年十大创新技术》很受欢迎，从读者的反馈来看，这些极具未来感的技术激起了人们的向往。其中“抗病毒的终极方案”尤其受到关注。这仿佛也从侧面说明，人类的历史就像一部疾病对抗史，我们总是希望战胜威胁，获取更高质量的生活。而在这场与自然的博弈中，也总是通过科技让我们触及了更好的生活。新的一年即将来临，希望我们能在这里一同见证新的科技发展。



- ◎ 2016年12月刊，第27页，左栏，倒数第3行，“投入实用”应为“投入使用”。
- ◎ 2016年12月刊，第43页，右栏，最后一段倒数第3行，“一搜”应为“一艘”。
- ◎ 2016年12月刊，第78页，左栏倒数第3段第3行，“19世纪，初”应为“19世纪初，”。感谢杨洋和杨利军挑错，我们将送上最新一期的刊物。



此前，我们在12月的前沿栏目中刊登了一篇《暗物质研究前途未卜》的报道，一位读者发来了精彩评论。如果某篇文章也对你有所触动，欢迎通过微信、微博、邮件，把你的想法分享给我们。

暗物质研究的转折兴许就要到来

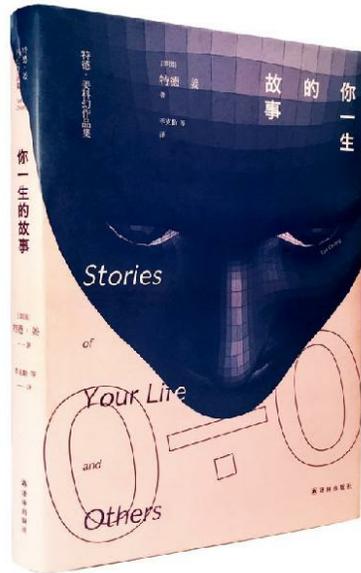
像看连续剧一样关注《环球科学》对wimp实验的持续报道，从之前由于实验改进外加各种理论发展而充满希望，到现在实验一无所获令科学家们不得不淘汰掉一些理论。对于普通人来说，这一结果是会挫败士气的。但对于科学家来说，这很可能是一件好事：上个世纪初，所有测量以太风和光速的实验，都否认了以太的存在以及揭示了光速恒定这一事实，这才让科学家们不得不在实验的基础上重新思考，才有了爱因斯坦的相对论。

这次wimp实验会迫使科学家淘汰掉原本认为很有潜力的一些暗物质理论，确实很痛心。但wimp理论突飞猛进的时代兴许就要来临了，因为当排除一切不可能后剩下的即便再不可能，也可能就是真相！

读者 石晓菲



每月推荐



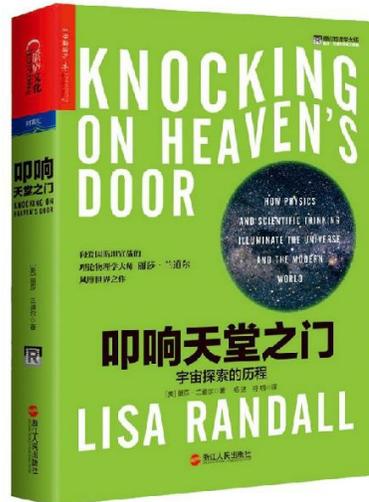
你一生的故事

作者：特德·姜

译者：李克勤等

出版：译林出版社

之所以推荐一本科幻小说，是因为特德·姜实在太特别了。仅仅出版15篇小说，却屡获世界科幻大奖，其中包括星云奖、雨果奖、轨迹奖和日本科幻大奖。我们常说，科学研究非常核心的一点，是要认识事物的因果性，在相同的实验条件下，要让成果能够反复出现。但量子力学最新的研究成果却让概率占了上风，上帝不仅会掷骰子，还会把骰子掷到人们看不见的地方。类似的，特德·姜喜欢借助外星来客探讨他心中的因果律，如果你已经被故事的开头吸引，那么最后，你一定会折服在他的世界观中。



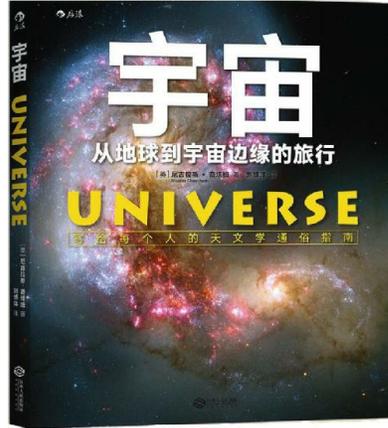
叩响天堂之门

作者：丽莎·兰道尔

译者：杨洁 / 符玥

出版：浙江人民出版社 / 湛庐文化

提及兰道尔，很多人会下意识地想到这是一位美女科学家，但看过这本书后，任何人都会忽略掉这个无聊的标签。谁会拒绝一本读完第一段就停不下来的书呢，谁又会刻意讨论这位作者的性别和颜貌呢。内容足够精彩，就是对读者最大的尊重。书中，兰道尔用生动的语言从简单的物理现象开始铺垫，一直深入到最微观的各类粒子，再一气呵成地用高能对撞机把整个粒子物理学的发展史讲了个透。她轻快的语言和流畅的叙述不仅能让你体验科学进展带来的乐趣，还能让你迫不及待地想读三部曲中的后两部。



宇宙

作者：尼古拉斯·奇塔姆

译者：刘博洋

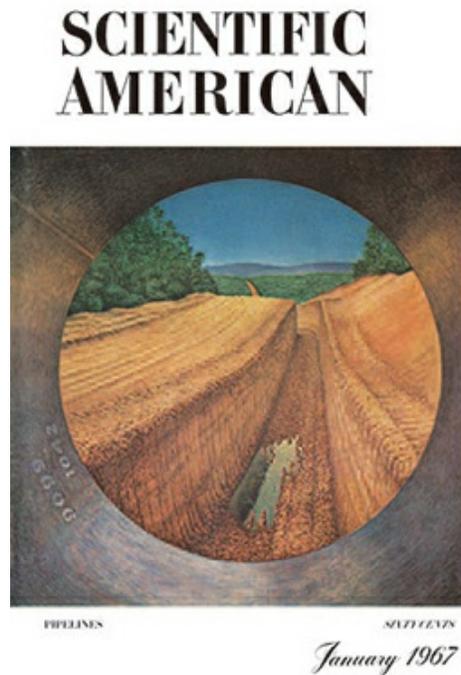
出版：江西人民出版社 / 后浪

后记中，编辑写到，视觉是人类极为重要的感知手段，以光为媒，宇宙在我们面前不再是黑暗和不可理解的。的确，当对光的本质有了更深入的了解后，我们的眼神就已经可以跳脱出原来的极限，把可见光以外的电磁波合成为我们可以辨识的颜色，从而一窥数以亿记光年以外的星体。这本以宇宙为主题的天文图册还从另一个纬度给我们了新的感受，从地球到太阳系，再一步一步飞往更遥远的宇宙边缘??一场漫长的星际旅行就此展开，每一次翻页的瞬间，你都能跨越更遥远的距离，感受宇宙的浩瀚。

经典回眸

50, 100 & 150 YEARS AGO

见证世界科学的每一次进步/翻译：红猪



1967年1月

兜售测谎仪的人

在过去几年里，“测谎”这种做法和测谎仪本身都遭到了越来越严格的审查。虽然测谎仪最初是为协助警方工作而开发的，但是富有进取心的实干家早早就发现了它的新用途，大约从1950年起，它就已经在工业

界和政府部门站稳了脚跟。眼下美国有大约500家商业测谎仪公司。

许多公司都在招募测谎仪操作员，这不仅是为了调查特定的损失，也是为了辅助招工前的面试，从而在应聘者中甄别出那些有犯罪记录者、酗酒者、同性恋者或是可能背叛公司的人。只要出了美国联邦政府，对于测谎仪的使用就基本不受监管。目前唯有伊利诺伊、肯塔基和新墨西哥三个州颁布了法规，要求测谎仪的操作者持有执照。

用沥青固化流沙

有人正在巧妙地借用石油产品改善贫瘠土地。1961年，埃索研究工程公司（Esso Research and Engineering Company）在利比亚的125英亩（约0.5平方千米）流沙地上喷洒低级石油，以此固化沙丘。这些沙丘本来寸草不长，连沙漠植被也无法在上面生存。但是现在埃索公司却宣布，他们在此地种植的桉树和金合欢树苗有八成活了下来，现在已经长成平均高25英尺（约7.6米）的大树了。

眼下利比亚政府已经委托他们再固化3000英亩（约12平方千米）流沙，最终可能在这片没有树木的沙海中创造出一座国家森林。



1917年1月

电影不输舞台剧

电影为何会如此受欢迎？为什么它能与最好的舞台剧较量而不落下风？大城市的观众见多识广，一部三幕的舞台剧，要是第一幕就给猜出了剧情走向，就很难再维持他们的兴趣了。现代生活要求剧情简短干脆，电影剧本多多少少都只是故事的大纲，故事情节要在尽量短的时间内呈现。同样一个故事，舞台剧要用三个小时讲完，电影只要一个小时就可以呈现完，效果却完全不逊色于舞台剧。舞台剧中除了那些极富感染力的对白之外，其他都是电影可以取代的。



1917年：槽锯在冻结的湖面上切下一块块蛋糕似的寒冰，以供私人或商家使用。

机动车生产

在刚刚过去的一年里，美国生产的汽车总数，包括载客车和商务车辆，已经超过了其他任何年份。人们对汽车原理的认识已经到了“殊途同归”的阶段，现代的大多数汽车都体现着相同的设计原理。无论引擎里是四个汽缸还是十二个，售价是500美元还是5000美元，生产商都已经对零部件的比例和它们最合适的材料了如指掌，现在就连最廉价的汽车，也不太会因为设计失误而出现引擎或底盘故障了。

“收割”冰块

美国人民每年消耗的冰块中有很很大一部分来自几英里或几百英里之外的地方——从那些安静的湖面上开采而得。每到冬季，冰块“收割”业便会雇佣大量男性。虽然寒冷的天气使北方诸州乡村的许多工厂彻底停产，但那些渴望开工的人还是可以通过冰块收割这份工作得到丰厚的收入（见插图）。

Table of Contents

[三篇文章，三个未来](#)

[《科学美国人》国际版本速览](#)

[全球学术期刊概览](#)

[2016年《环球科学》十大科学新闻](#)

[【天文学】“盖亚”号：绘制银河系新图景](#)

[【空间科学】木卫二上真的有喷泉？](#)

[【环境】奥巴马的环境保护功绩](#)

[【农业】南非高中生发明迷你蓄水池](#)

[【生物学】狮子比老虎更聪明？](#)

[【简讯】全球科技热点](#)

[【生物学】重新认识溶酶体](#)

[【神经科学】大脑如何感受幽默](#)

[【新技术】浪涌电压保护器](#)

[【化学】铜让硫醇更臭](#)

[【环境】中国五城市空气污染状况调查](#)

[【食品】烹调能降低含镉大米毒性](#)

[【封面故事】量子纠缠创造了虫洞](#)

[【天文学】行星形成只要“3分钟”](#)

[【遗传学】人类演化在这里加速](#)

[【医学】HIV疫苗：黎明已来](#)

[【农业】抗生素滥用调查：养殖场弥漫耐药菌](#)

[【人类学】神话故事：一部人类迁徙史？](#)

[【环境】人工湿地：自然净化污水](#)

[【气候】冻土融化影响气候100年](#)

[【对话】建筑碳排放，30年后下降74%](#)

[【健康科学】哪些检查在误导患者？](#)

[【技术档案】别为耳机插孔哭泣](#)

[【科学评论】女科学家的透明天花板](#)

[【反重力思考】佛罗里达，美国最奇怪的州](#)

[【怀疑论者】什么左右了性取向](#)

[【图表科学】特斯拉、Facebook创新之道](#)

[读来编往](#)

[经典回眸](#)