

# 未来10年世界可能发生的 22个重大科技事件

## 希格斯粒子是否存在将得到确认

整理撰稿人:中科院国家科学图书馆总馆交叉与重大前沿团队

黄龙光(E-mail:huanglg@mail.las.ac.cn)、冷伏海、边文越

审稿专家:中科院高能物理所姜晓明研究员

### 1 希格斯粒子搜寻的科技内涵及意义

现代物理学有两大理论:广义相对论和标准模型。广义相对论用来解释空间、时间和引力的问题,标准模型是描述强力、弱力及电磁力这3种基本力及组成所有物质的基本粒子的理论。标准模型根据自旋将粒子分为费米子(包括夸克与轻子)和玻色子(包括胶子、光子、W粒子、Z粒子、希格斯粒子)两大类,根据标准模型的预言,这两大类粒子共有61个<sup>[1]</sup>。除了希格斯粒子外,其他粒子均已得到实验数据的支持和验证。

希格斯粒子是标准模型中最后一种待被发现的粒子,自旋为零,具有质量,不带电荷,非常不稳定。希格斯粒子是整个标准模型的基石,如果希格斯粒子不存在,意味着整个标准模型将失效。此外,希格斯粒子被认为是基本粒子的质量来源,如果希格斯粒子存在,就能很好地解释一些基本粒子具有质量而另一些没有的问题。

希格斯粒子的特点决定了搜寻它难度极大:

质量大,衰变快。质量大意味着制造希格斯粒子需要极大的碰撞能量,因此必须建造造价高昂的超级粒子加速器来提供这样大的能量。然而,即使碰撞产生了希格斯粒子,它也会在十亿分之一秒的时间内衰变为其他粒子,从而难以检测到。因此,物理学家使用非常高精度的探测器来进行光电信号的收集,通过一系列复杂的运算,从海量的数据和探测轨迹中筛除大量的普通粒子信号,挖掘出由希格斯粒子衰变而来的粒子信息,从而推导出希格斯粒子是否存在。

### 2 希格斯粒子搜寻的进展

希格斯粒子是彼得·希格斯于1964年<sup>[2]</sup>提出,并于1966年推导出希格斯粒子的衰变机制<sup>[3]</sup>。20世纪80年代早期,欧洲核子研究中心(CERN)发现W和Z玻色子,证实了理论预期,拉开了实验寻找希格斯粒子的序幕。一开始,物理学家们不知道希格斯粒子的质量,经过大量的实验,希格斯粒子的质量范围被大大缩小。80年代中期,CERN建造了长达27km的大型正负电子(LEP)对撞机环,希望能获得质量略高于100 GeV的希格斯粒

\* 修改稿收到日期:2013年9月9日

子。随后,美国物理学家提出要求建造极为昂贵的超导超级对撞机(SSC),希望能产生质量高达1 TeV的希格斯粒子(希格斯粒子理论上能达到的最大质量),然而美国国会在1993年停止了该项目,当年的预算超过100亿美元<sup>[4]</sup>。1995年,费米实验室发现质量接近174 GeV的顶夸克,根据标准模型,这意味着希格斯粒子的质量应低于200 GeV。90年代末,LEP对撞机的能量已超出了其设计值200 GeV,但物理学家们在4大探测器中仍未发现任何表明希格斯粒子出现的证据,此时希格斯粒子质量下限已提高至近108 GeV。2000年,LEP对撞机上的ALEPH实验发现115 GeV处存在新粒子的迹象,但综合LEP上的另外3个实验后则无显著信号。随后LEP对撞机关闭,进行长达10年的大型强子对撞机(LHC)建设。

LEP对撞机关闭后,美国费米实验室一枝独秀。然而,由于费米实验室Tevatron加速器的能量和亮度不够,直至2011年9月Tevatron加速器永久关闭时,费米实验室除了排除了156 GeV和177 GeV这个区间的质量<sup>[5]</sup>外,几乎没有新的重大的发现。

2010年LHC开始记录数据。LHC实验中,探索希格斯粒子的实验包括超环面仪器(ATLAS)和紧凑 $\mu$ 子线圈(CMS)2个实验。2011年,通过数次实验,将希格斯粒子的质量范围缩小到115—130 GeV<sup>[6]</sup>。2012年7月,CERN宣布,ATLAS和CMS发现质量为125—126 GeV<sup>[7,8]</sup>的新玻色子,置信度为5个标准差(即99.99994%的置信度,新粒子发现的判据),CERN将该粒子称为“类似希格斯粒子”。2013年3月,ATLAS和CMS在分析了更多的数据后,宣布该粒子“看起来越来越像希格斯粒子”<sup>[9]</sup>。

尽管如此,要确定希格斯粒子的存在,还需更多的数据。目前,LHC处于关闭升

级期,2015年升级完毕后,其能量将增加1倍,能产生更多的碰撞和数据,将有助于确认和进一步了解希格斯粒子。

### 3 中国科学家的作用

在国家科技部、自然科学基金委和中科院的共同资助下,我国科学家自1999年起就开始参与ATLAS和CMS国际合作。参与ATLAS实验的机构包括:中科院高能物理所、中国科技大学、南京大学、山东大学和上海交通大学。参与CMS实验的机构有:中科院高能物理所、北京大学和中科院上海硅酸盐所。

在发现“类似希格斯粒子”的工作中,我国科学家做出了重大贡献。在ATLAS实验中,液氙光子电子量能器、精密 $\mu$ 子漂移室探测器、谱仪触发系统电子学检测、网格计算系统等包含了南京大学、中科院高能所、中国科技大学等单位的科学家完成的重要器件,山东大学建造了400台ATLAS端盖 $\mu$ 触发探测器。在ATLAS实验的希格斯玻色子的物理分析结果方面,我国科学家在光子触发效率研究,测量双光子希格斯玻色子重建本底噪音,四轻子衰变 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ 研究中的数据生产、信号事例筛选与基于数据的Z+jet本底分析,通过 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 发现希格斯粒子的矢量玻色子融合产生过程, $H \rightarrow Z\gamma$ 分析等方面做出了重要贡献<sup>[10]</sup>。

在CMS实验中,我国科学家也做出了重要贡献。CMS实验1/3的端盖 $\mu$ 子探测器和端盖电磁能量器的所有晶体,均由我国科学家研制提供。特别是实验中用多变量分析方法区分信号与本底、提高希格斯粒子寻找的灵敏度方面,采用了CMS中国组的方法,灵敏度提高了3%。

#### 参考文献

- 1 Sylvie Braibant, Giorgio Giacomelli, Maurizio Spurio.



中国科学院

- Particles and Fundamental Interactions: An Introduction to Particle Physics. Italy: Springer, 2009, 313-314.
- 2 Peter W Higgs. Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons. Physical Review Letters, 1964, 13 (16): 508-509.
  - 3 Peter W Higgs. Spontaneous Symmetry Breakdown without Massless Bosons. Physical Review, 1966, 145 (4): 1156-1163.
  - 4 Michael Riordan. The Long Road to the Higgs Boson. <http://physicsworld.com/cws/article/indepth/2012/aug/09/the-long-road-to-the-higgs-boson>. 2012-8-9.
  - 5 CDF & D0 Collaborations. Combined CDF and D0 Upper Limits on Standard Model Higgs Boson Production with up to 8.6 fb-1 of Data. arXiv:1107.5518 [hep-ex], 2011-7-27.
  - 6 ATLAS Collaboration. Combination of Higgs Boson Searches with up to 4.9 fb-1 of pp Collisions Data Taken at a center-of-mass energy of 7 TeV with the ATLAS Experiment at the LHC. <http://cds.cern.ch/record/1406358?ln=en>, 2011-12-13.
  - 7 ATLAS Collaboration. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. Physics Letters B, 2012, 716 (1): 1-29.
  - 8 CMS Collaboration. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. Physics Letters B, 2012, 716 (1): 30-61.
  - 9 CianO'Lunaigh. New results indicate that new particle is a Higgs boson. <http://home.web.cern.ch/about/updates/2013/03/new-results-indicate-new-particle-higgs-boson>, 2013-03-14.
  - 10 李大庆. 中国科学家做出了重要贡献. 科技日报, 2012-7-5.

## 中微子振荡实验有望加快破解“反物质消失之谜”

整理撰稿人: 中科院国家科学图书馆总馆交叉与重大前沿团队

吕晓蓉 (E-mail: lvxr@mail.las.ac.cn)、李泽霞

审稿专家: 中科院高能物理所姜晓明研究员

### 1 中微子研究在粒子物理学中占有重要地位

1930年,奥地利物理学家泡利<sup>[1]</sup>为了解释 $\beta$ 衰变中能量不守恒的问题而提出中微子假设,但由于中微子不带电荷、质量极小(小于电子质量的百万分之一)且几乎不与其他物质相互作用(只参与弱相互作用和引力作用)而很难被探测到。因此长期以来,中微子只是在理论物理学家的计算方程中出现,而实验上始终无法证实它的存在。1934年,意大利物理学家费米提出了包含中微子的 $\beta$ 衰变理论,与实验数据定量符合。1941年,我国物理学家王淦昌在美国《物理评论》杂志上发表“关于探测中微子的建议”文章。美国物理学家艾伦根据王淦昌的方案进行的实验于1942年间接证

实了中微子的存在。1956年,美国物理学家莱因斯等人利用核反应堆作为强中微子源,在实验上首次直接观测到中微子(电子反中微子),并因此而获得1995年诺贝尔物理学奖。

中微子物理研究在历史上共获得3次诺贝尔奖,而该领域仍将成为未来非常活跃的研究领域。加速器中微子实验、大气中微子实验以及反应堆中微子实验的竞争将会愈加激烈,例如,日本的T2K实验和美国的NO $\nu$ A实验,计划中的中国江门中微子实验、美国LBNE实验、南极PINGU实验、日本Hyper-K实验、印度INO实验等,科学界期待着更为辉煌的成就。纵观科学发展的历程,每一次重大基础科学的发现都引发了技术的新飞跃。目前科学家已经开始展望未来中微子通讯的诱人前景以及用中微子探测地球内部地质构造的

中微子地球断层扫描技术。中微子未来研究对粒子物理与宇宙学理论的突破以及对社会、经济和文化产生的深远影响也许将超越人们的想象。

## 2 中微子振荡成为中微子研究的核心问题

20 世纪 60 年代,中微子研究进入崭新阶段。1962 年,美国物理学家莱德曼、施瓦茨和斯坦伯格等提出利用加速器产生中微子,实验结果发现了第二种中微子: $\mu$ 中微子。这一杰出发现验证了轻子的二重态结构,为弱电统一理论的建立奠定了基础,该项成果荣获 1988 年诺贝尔物理学奖。1957 年,前苏联理论物理学家庞帝柯夫首先提出“中微子振荡”猜想,认为中微子与反中微子在一定条件下可以相互转化。局限于历史条件,这一想法并不准确,但其思想导致了现代的中微子振荡理论:如果中微子质量不严格为零,且中微子的质量本征态与弱作用本征态不同,根据量子力学原理,不同的中微子之间将可以相互转换。这也是判断中微子质量是否为零的方法。中微子的质量成为中微子研究中的一个关键议题。粒子物理标准模型认为,中微子的质量为零,也就是说,中微子质量不为零将导致超出标准模型的新物理。1968 年,美国科学家戴维斯发现太阳中微子“失踪”现象,即到达地球的太阳中微子数只有理论预期值的 1/3。印度的宇宙线实验(20 世纪 60 年代)以及美国 IMB 和日本神冈实验(1985 年)发现大气中微子反常现象。日本神冈探测器探测到来自超新星 SN 1987A 的中微子(1987 年)。1998 年,日本物理学家小柴昌俊领导的超级神冈实验(Super-K<sup>[2]</sup>)证实大气中微子振荡。2000 年,美国费米实验室发现第三种中微子: $\tau$ 中微子。2001 年加拿大 SNO<sup>[3]</sup>实

验和日本反应堆 KamLAND<sup>[4]</sup>实验进一步确认了太阳和反应堆中微子振荡现象、2002 年日本 K2K 加速器实验则确认大气中微子振荡。戴维斯和小柴昌俊在探测宇宙中微子方面所取得的杰出成就共同荣获 2002 年诺贝尔物理学奖。这一成就催生了中微子天体物理学的诞生,打开了人类观测宇宙的又一新“窗口”。中微子探测技术作为一种新的天文观测手段,已成为研究早期宇宙形成、超新星爆发、恒星结构和演化以及宇宙暗物质和暗能量的新“探针”。

## 3 大亚湾中微子实验将我国粒子物理学研究水平推向世界最前沿

2003 年前后,中微子振荡现象通过众多的实验证据得以确立。中微子振荡与中微子质量相关联,成为中微子研究中的核心问题。之前发现的中微子振荡可归纳为两大类:大气中微子振荡和太阳中微子振荡。中微子振荡存在 3 个未解决的问题:寻找第三种振荡( $\sin^2 2\theta_{13}$ )、质量顺序( $\Delta m^2_{32}$ 的符号)问题以及对称性破缺( $\delta_{CP}$ )问题。能否用现有实验技术研究后两个问题与 $\theta_{13}$ 的数值大小有关,因此 $\theta_{13}$ 也决定了中微子物理实验的未来发展方向。2003 年,美国物理学会将利用反应堆测量混合角 $\theta_{13}$ 列为中微子振荡研究的第一优先级研究方向。世界各国共提出了 8 个实验建议方案,其中有 3 个最终得以进行,包括法国 Double Chooz 实验、中国大亚湾实验和韩国 RENO 实验。2003 年,中科院高能物理所的科研人员提出利用大亚湾核反应堆群产生的大量中微子开展中微子振荡实验,提出了实验总体方案。由于大亚湾核电站的高功率(世界第二)及其有利的地理条件(紧邻高山),使得大亚湾实验的预期精度达到了目前最高的国际设计精度,可将 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的测量精度提高到 0.01。



中国科学院

利用大亚湾反应堆测量 $\theta_{13}$ 是我国粒子物理发展的一个重大机遇。2006年,大亚湾中微子实验项目获得批准立项,是我国基础科学领域目前最大的国际合作项目,中国内地总投资1.7亿元,由中国、美国、俄罗斯、捷克、中国香港和台湾科学家共同参与。2011年12月24日—2012年2月17日进行的中微子实验测量结果表明<sup>[5]</sup>,中微子第三种振荡几率为9.2%,误差为1.7%,从而首次发现了这种新的中微子振荡模式。该项重大研究成果荣登美国《科学》杂志<sup>[6]</sup>2012年度十大科学突破,其评价为“如果物理学家无法发现超越希格斯玻色子的新粒子,那么中微子物理可能会代表粒子物理学的未来。大亚湾实验的结果可能就是标志着这一领域起飞的时刻”。大亚湾中微子实验国际合作组发言人王贻芳研究员在新闻发布会上指出,这一重要研究成果是对物质世界基本规律的一项新的认知,对中微子物理未来发展方向起到了决定性作用,并将有助于破解宇宙中“反物质消失之谜”,即宇宙中物质-反物质不对称现象。

中国大亚湾中微子实验在激烈的国际竞争中率先取得重大突破性成果,将我国粒子物理学研究水平推向世界最前沿。中国有可能在未来10—15年内在国际中微子物理研究领域占据重要地位。江门中微子实验(原称大亚湾中微子实验二

期)的目标已瞄准“质量顺序问题”,以及混合参数精确测量、超新星中微子等多个前沿重大目标,未来的加速器实验将有望解决“CP对称破缺角”的测量,而中微子的CP破坏很有可能与宇宙早期的物质起源问题有关。

中微子其他待解决的问题还有不少。例如,中微子是Dirac或Majorana费米子,即中微子是否是自己的反粒子将是粒子物理的一个根本问题;中微子的绝对质量仍然未知;中微子磁矩测量、超新星中微子研究、宇宙大爆炸中微子探测等仍将成为粒子物理、天体物理和宇宙学共同关注的研究前沿与热点方向,等等。

### 参考文献

- 1 Pauli W. Handbuch der Physik. Springer,1933,(24):Part I.
- 2 Fukuda S et al. Super-Kamiokande Collab. Phys. Rev. Lett., 1998, (81):1562-1567.
- 3 Q. R. Ahmad et al., SNO Collab. Phys. Rev. Lett., 2001,(87): 071301-1-6.
- 4 Eguchi K et al. KamLAND Collab. Phys. Rev. Lett., 2003,(90): 021802-1-6.
- 5 An F P et al. Observation of Electron-Antineutrino Disappearance at Daya Bay. Phys. Rev. Lett.,2012,(108): 171803-1-7.
- 6 Cho A. Key Neutrino Measurement Signals China's Rise. Science, 2012,(335):1287-1288.

## 暗物质粒子的探测和研究可能取得突破

整理撰稿人:中科院国家科学图书馆总馆空间科技团队

王海霞(E-mail: wanghx@mail.las.ac.cn:)、王海名

审稿专家:中科院高能物理所张新民研究员

### 1 作为研究宇宙大尺度结构形成过程的要素,暗物质的存在已被广泛接受

“暗物质”是指宇宙中具有引力效应,但是不

会直接和光发生作用的物质,被认为是由一种超出粒子物理标准模型的全新粒子构成。人们对其粒子物理的性质还知之甚少。20世纪初物理学的“两朵乌云”——以太说和黑体辐射——推翻了经

典物理理论,催生了量子力学和相对论。与之类似,对与暗能量并称为21世纪物理学的“两朵乌云”的暗物质的探测和研究,很可能产生新的物理学革命。

现代意义上的暗物质概念最早是由瑞士天文学家弗里兹·扎维奇提出的。1933年,扎维奇研究后发现星系团中星系运动的速度弥散,根据所测得的星系速度弥散并应用维里定理得到的星系团质量比从星系团中发光星体推断出的质量大400倍左右,因此推测星系团中可能存在不发光的物质。20世纪70年代,美国天文学家薇拉·鲁宾通过对旋涡星系的详细观测,使得“暗物质”这个概念得到了科学界的认可。2006年“钱德拉X射线望远镜”(Chandra)观测到两个星系团的合并,发现星系团中发光的热气体和两个星系的质量中心并不重合,这一现象被认为是暗物质存在的直接证据<sup>[1]</sup>。近年来,由于“威尔金森微波各向异性探测器”(WMAP)和“普朗克”(Planck)卫星对宇宙微波背景辐射各向异性的精确测量,我们可以通过拟合卫星数据精确确定宇宙中暗物质的总量。最新拟合结果是暗物质在宇宙中所占的组分约为26.8%,约占宇宙中物质总量的85%<sup>[2]</sup>。从暗物质的概念提出至今,人们在各种尺度的天文观测中都发现了暗物质存在的证据。

## 2 暗物质粒子探测手段多样,但至今尚无明确的存在定论

由于暗物质粒子不发光且不直接与光发生作用,普通的光学观测无法发现它的踪迹。目前大致有3种探测暗物质粒子的方法:

(1)在加速器上“创造”暗物质粒子并研究其物理特性。虽然被“创造”出来的暗物质粒子不能被直接观察到,但通过其他可以

观测到的粒子能够推测出是否有暗物质粒子产生,同时在“创造”暗物质粒子的过程中会带走能量,因此从丢失的能量及其分布可以推测暗物质的某些性质。迄今为止,所有的加速器实验尚未发现暗物质粒子的迹象。正在进行升级改造的欧洲核子中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)将在2015年重新启动,届时其质子束流的总能量可达14万亿电子伏特,有望“创造”出少量暗物质<sup>[3]</sup>。

(2)直接探测法。该方法是直接探测暗物质粒子和原子核碰撞所产生的信号,由于发生碰撞的概率很小,产生的信号也很“微弱”。为了降低本底,通常需要把探测器放置在很深的地下。暗物质直接探测实验是目前寻找暗物质粒子最重要的探测方式。目前的实验精度下,只可能探测到弱相互作用重粒子(WIMP)的信号,而更弱的信号,如轴子、超对称引力子是无法用这种方法探测的。目前国际上约有几十个科学小组在设计实验以期发现暗物质信号,如氙100(XENON100)、低温暗物质搜寻(CDMS)计划等。继2009年宣布所发现的2个事件可能与暗物质粒子有关之后,2013年4月13日,美国的地下暗物质实验——超级低温暗物质搜寻(Super-CDMS)计划项目组又报告了3个疑似暗物质事件,计算结果表明,其是WIMP的可能性为99.81%,但由于只有3西格玛水平,并不会作为暗物质证据进行发布<sup>[4,5]</sup>。

(3)间接探测法。是指通过测量暗物质粒子衰变或相互作用后产生的稳定高能粒子如伽玛射线、正电子、反质子、中微子等的能谱,发现暗物质粒子留下的蛛丝马迹。由于地球大气的影响,在地面上高精度测量粒子能谱的难度较大,实验最好在空间进行。但受到观测精度限制,“费米伽马射线空间



中国科学院

望远镜”(Fermi)、“反物质探测和轻核天体物理学载荷”(PAMELA)和“先进薄电离量能器”(ATIC)实验均未探测到确定的暗物质粒子。空间探测的关键是选择合适的探测粒子对象,且最好使用可以探测所有种类粒子的探测器,即大型磁谱仪。2013年4月,空间中首个测量精度达到1%的实验“阿尔法磁谱仪”(AMS-02)项目宣布在宇宙射线事件中探测到40万个能量在5亿—3 500亿电子伏之间的正电子,该实验结果符合宇宙中暗物质粒子碰撞湮灭产生正电子的理论,但目前还不能排除这些暗物质来自脉冲星的可能性<sup>[6,7]</sup>。

### 3 暗物质粒子探测和研究有望推动新的物理学革命

目前,世界主要科技强国对暗物质粒子的探测和研究都很重视。例如,美国国家科学基金会、美国国家航空航天局以及美国能源部在2006年联合成立了“暗物质与暗能量研究评估小组”,指出解决暗物质之谜的重要性尤为突出,并强调美国必须立刻加大投入,保持在该领域的领先地位。2008年,欧洲推出了天体粒子物理路线图,“什么是暗物质”位居未来10年重点解决的6个重要基本问题之首<sup>[8]</sup>。

利用地下、地面大型探测装置及空间探测实验,探测到暗物质粒子并揭开暗物质之谜,将是21世纪人类最伟大的科学发现之一。

在暗物质的直接探测实验方面,世界各国已广泛开展的实验有CDMS、XENON、宰普林(ZEP-LIN)、爱德维斯(EDELWEISS)等,而且其灵敏度在不断提高。在这方面,2008年我国规划了路线图,开始建设世界上埋深最深的地下实验室——中国锦屏地下实验室,对于开展高精度的暗物质直接探测实验具有重要的意义。目前,清华大学等基于高纯锗的中国暗物质实验(CDEX),上海交通大学等基于液氙的粒子和天体粒子氙观测站(PANDAX)实验是该实验室首批开展的两个暗物质直接探测实验<sup>[9]</sup>。

在暗物质粒子间接探测方面,南极地下2 000米的冰立方(IceCube)望远镜,地面的高能立体望远镜系统(HESS)、甚高能辐射成像望远镜系统(VERITAS)、主要大气伽马射线成像切伦科夫望远镜(MAGIC)等实验预期会在未来几年产生更多数据。随着实验的升级和灵敏度的提高特别是未来大型高海拔空气簇射观测站(LHAASO)项目的开展,我国西藏羊八井的宇宙线地面观测站在间接探测暗物质粒子方面将具有一定的潜力。在空间探测方面,FERMI、AMS-02以及我国的暗物质粒子探测卫星和空间站暗物质粒子探测项目都将对暗物质的研究做出有意义的贡献。

关于暗物质性质的研究与天文研究紧密相关。例如,对于暗物质的直接探测和间接探测,其信号的预言或解释都依赖于暗物质的密度及空间分布,因此,这些研究必须和天文研究紧密结合。在该方面,美国大口径综合巡天望远镜(LSST)和我国的南极昆仑站暗宇宙巡天望远镜(KDUST)预期将起到重要作用。

#### 参考文献

- 常进. 暗物质粒子探测:意义、方法、进展及展望. 工程研究——跨学科事业中的工程, 2010, 02(2).
- ESA. Simple but challenging: the Universe according to Planck. <http://sci.esa.int/planck/51551-simple-but-challenging-the-universe-according-to-planck/>. 2013-03-21.
- 华凌. 欧洲大型强子对撞机升级改造 有助于揭示宇宙中神秘的“暗物质”. [http://www.stdaily.com/stdaily/content/2013-04/04/content\\_590120.htm](http://www.stdaily.com/stdaily/content/2013-04/04/content_590120.htm). 2013-04-04.
- CDMS. Dark Matter Search Results from CDMS-II Silicon Detectors. <http://cdms.berkeley.edu/press.html>. 2013-04-15.
- 张梦然. 美地下暗物质实验发现暗物质初步线索. [http://digital-paper.stdaily.com/http\\_www.kjrb.com/kjrb/html/2013-04/20/content\\_200261.htm?div=-1](http://digital-paper.stdaily.com/http_www.kjrb.com/kjrb/html/2013-04/20/content_200261.htm?div=-1). 2013-04-20.
- CERN. AMS experiment measures antimatter excess in space. <http://press.web.cern.ch/press-releases/2013/04/ams-experiment-measures-anti-matter-excess-space>. 2013-04-03.
- Aguilar M, Alberti G, Alpat B et al. First Result from the Alpha

Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision Measurement of the Positron Fraction in Primary Cos-mic Rays of 0.5-350 GeV. Phys. Rev. Lett., 2013, 110(14): 141102.

8 ASPERA. Status and Perspective of Astroparticle Physics

in Europe——Astroparticle Physics Roadmap Phase I. <http://www.aspera-eu.org/images/stories/files/Roadmap.pdf>. 2008-09

9 张新民, 陈学雷. 暗物质、暗能量研究进展及中国的机遇. 中国科学院院刊, 2011, 26(5): 496-503.

## 量子信息技术将成为下一代信息技术的先导和基础

整理撰稿人: 中科院国家科学图书馆成都分馆信息科技团队

唐川 (E-mail: tangc@clas.ac.cn)、张娟、房俊民

审稿专家: 中科大陆朝阳教授

量子信息科学是利用量子体系的独特性质对计算、编码、信息处理和传输过程给予新的诠释、开发新的、更为高效的信息处理功能的一门学科,它是量子力学与信息科学相结合的产物,主要包括量子计算和量子通信两个领域,其核心目标是实现真正意义上的量子计算机和实现绝对安全的可实用化的远距离量子通信<sup>[1]</sup>。此外量子密码、量子模拟与量子度量等分支也是当前和未来的研究热点。

### 1 全球化量子通信有望实现

经过 20 多年的发展,量子通信已从理论走向实验,并向实用化发展。近年来,量子通信的距离和速率都有了飞跃式的提升,通信距离已超过 200km。一些小规模的量子通信试验网已经建成,验证了量子通信技术网络化的可行性,并在国家安全、金融等信息安全领域开始发挥作用。

在量子通信领域,我国在多个方面已经达到了世界先进水平,其中在城域量子通信关键技术方面达到了产业化要求,产业化预备方面与欧美处于同等水平状态。中科大

潘建伟团队在实用化量子网络通信、量子存储和量子中继器技术研究方面处于国际前列。例如 2012 年潘建伟小组在量子中继器的实用化研究上取得了突破,实现了 3.2 毫秒的存储寿命及 73% 的读出效率的量子存储,为国际上量子存储综合性能指标最好的实验结果<sup>[2]</sup>。同时,中科院正在大力推动战略先导专项“量子科学实验卫星”,并于 2012 年首次成功实现百公里量级的自由空间量子隐形传态和纠缠分发,为发射全球首颗“量子通讯卫星”奠定了技术基础<sup>[3]</sup>。中科院计划在 2016 年左右发射量子科学实验卫星,在此基础上将实现高速的星地量子通信并连接地面的城域量子通信网络<sup>[4]</sup>。

下一步的国际竞争将更加激烈,各国将致力于将量子保密通信向更远距离和更大规模的广域网络发展,重点包括量子中继和卫星量子通信等。据科学家们预计,未来 10 年颇有望实现全球化量子通信,并在往后二三十年间对人类社会产生重大的影响,其在军事、国防、金融、工程和社会公共设施等信息安全领域都有着尤为重大的应用价值与开发前景。



中国科学院

## 2 量子计算有望获重要突破

目前,标准量子计算模式<sup>[5]</sup>、基于测量的量子计算模式<sup>[6]</sup>、拓扑量子计算模式<sup>[7]</sup>和绝热量子计算模式在少数几个量子逻辑比特的前提下得到了实验验证<sup>[8]</sup>,实现了简单的逻辑门操作<sup>[9]</sup>、纠错<sup>[10]</sup>,以及一些简单的量子算法演示<sup>[11]</sup>。

在硬件实现方面,国际学术界依然不能完全确定哪个物理体系能够最终胜出。固态物理系统、冷原子、量子光学体系等都各有优势,最终最有希望满足所有量子计算的要求的或许是一种混合型的、集成各体系的优势量子计算机。2012年,潘建伟小组实现了8光子比特拓扑量子纠缠<sup>[12]</sup>。2013年,潘建伟小组利用光量子计算机实现了求解线性方程组算法。奥地利因斯布鲁克大学领导的联合研究小组在2010年利用离子阱系统实现了14个量子比特的纠缠态的制备<sup>[13]</sup>。美国南加州大学证明加拿大D-Wave公司研制的D-Wave Two型量子模拟机成功演示了量子退火法<sup>[14]</sup>。

未来5—10年量子计算机的研制可望取得重要突破。各国竞争的焦点包括量子芯片(半导体量子芯片、超导量子芯片、离子/原子芯片、光子集成芯片等)、量子编程、量子测量以及量子芯片微纳结构材料等相关研究<sup>[15]</sup>。

## 3 量子密码将获实际应用

近年来,美国、欧盟、日本等投入了巨大资源研发量子密码技术<sup>[16]</sup>,并取得一系列成果,中国在该方面的进展也处于世界前列。量子通信的第一个演示性试验是由Bennett、Brassard及其研究团队在1989年完成的<sup>[17]</sup>,通过自由空间传输距离只有30cm。2004年,日本NEC公司宣布创下了光纤量子密码传输距离的新记录150km<sup>[18]</sup>。同年,中科大郭光灿研究组在北京与天津之间成功实现了125km光纤的点对点的量子密钥分配线路<sup>[19]</sup>。由于这些实验所使用的光源是衰减的激光,不是完美的单光子源,因此不能克服光子数分离攻击,安全的通信距离无法超过10km量级。

现阶段只有通过诱骗态量子通信技术才能克服光源不完美带来的漏洞,达到安全距离超过百公里的量子密钥分发,因此成为国际竞争最热门的领域之一。2007年,诱骗态量子通信技术同时被美国国家标准局<sup>[20]</sup>、欧洲维也纳大学<sup>[21]</sup>和中国潘建伟小组<sup>[22]</sup>这三个研究组实现,为城域安全量子通信奠定了基础。2012年,潘建伟研究组建设完成了国际上首个包含46个节点、规模化的城域量子通信网络——合肥城域量子通信试验示范网,在合肥市区多个政府部门、金融机构、军工企业和科研院所得以应用。基于已成熟的规模化城域量子通信组网技术,潘建伟研究组进一步将技术应用于国庆60周年阅兵式的通信安全保障工作、与新华社合作的“金融信息量子通信验证网”和为“十八大”提供信息安全保障的“基于量子通信的高安全通信保障系统”。

2013年,潘建伟研究组牵头的千公里级大尺度光纤量子通信骨干网工程“京沪干线”正式立项,将建设连接北京、上海,贯穿济南、合肥等地的高可信、可扩展、军民融合的广域光纤量子通信网络,建成国际上首个大尺度量子通信技术验证、应用研究和应用示范平台。

## 4 量子模拟有望取得重大突破

量子模拟就是指在一个人工构建的量子多体系统的实验平台上去模拟在当前实验条件下难以操控和研究的物理系统,获得对一些未知现象的定性或定量的信息<sup>[23]</sup>。2009年,中科大潘建伟研究小组通过操纵多光子纠缠态,在国际上首次实验证实了一种存在于两维空间的奇特粒子(任意子)的分数统计现象<sup>[24]</sup>。利用超冷原子BEC,人工构造出了规范势,实现了超冷玻色子的“自旋-轨道耦合”<sup>[25]</sup>。2010年中科大杜江峰研究组,在核磁共振系统中通过量子模拟的方式获得了氢分子的基态能量<sup>[26]</sup>,模拟了化学中异构化反应的动力学<sup>[27]</sup>。2011年美国哈佛大学研究小组利用单格点成像技术,成功地模拟并探测了一维反铁磁自旋链<sup>[28]</sup>。量

子模拟技术快速发展,正在接近经典计算机可以模拟的极限,未来5—10年有望取得重大突破。当前关键问题是研制具有相当规模的量子比特实验平台,以及研制可实用的固态量子存储器等关键器件。量子模拟是量子计算机最有前景的应用领域,有望比普通的量子计算机更早实现<sup>[15,29]</sup>。

## 5 量子度量学正在兴起

量子度量学是近几年兴起的一门学科。量子度量学突破了经典测量的标准量子极限,正日益引起世人的关注,可望在量子定位、量子雷达、量子时钟、量子高精相位测量、量子成像等方面开辟新的潜在应用。例如潘建伟研究组成功制备了10比特纠缠态,并实验观测到了光子相位超分辨,且突破了标准量子极限,这是到目前为止光学系统中利用纠缠比特数目最多的量子度量学成果,也为下一步更高分辨率和灵敏度的精密测量奠定了重要基础<sup>[30]</sup>;中科大郭光灿研究组和以色列的联合科研组开发出了新型量子弱测量技术,首次利用廉价的商用发光二极管白光光源实现量子高精测量,时间测量的精度达到阿秒量级,相应距离的测量精度达到0.1nm,即可以分辨出一个原子大小的位置移动。同时,探测装置简单实用且性能稳定,不受环境消相干的影响,为量子精密测量技术走向实用化打下了重要基础<sup>[31]</sup>。

传统的信息技术已越来越接近其物理极限,量子信息技术将能突破摩尔定律瓶颈,提供前所未有的强大计算能力、无与伦比的安全性,将成为下一代信息技术的先导和基础。我国目前在量子通信领域已取得了诸多国际领先的成果,并在量子计算、量子密码等方面也跟上了世界的步伐,在该新兴领域占据了一席之地,并且寻求在未来的

国际竞争中抢占这一战略制高点。

### 参考文献

- 1 郭光灿,周正威,郭国平等. 量子计算机的发展现状与趋势. 中国科学院院刊, 2010, 25(5):516-524.
- 2 Bao X H, Reingruber A et al. Efficient and long-lived quantum memory with cold atoms inside a ring cavity. *Nature Physics*, 2012, 8:517-521.
- 3 Yin J, Ren J G, Lu H et al. Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels. *Nature*, 2012, 488:185-188.
- 4 量子通信:无法破译的密码. 光明网. [http://tech.gmw.cn/2013-06/18/content\\_7989200.htm](http://tech.gmw.cn/2013-06/18/content_7989200.htm).
- 5 Cai X D et al. Experimental quantum computing to solve systems of linear equations. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110: 230501.
- 6 Gao W B et al. Experimental measurement-based quantum computing beyond the cluster-state model. *Nature Photonics*, 2011, 5:117.
- 7 Yao X C et al. Experimental demonstration of topological error correction. *Nature*, 2012, 482:489-494.
- 8 周正威,陈巍,孙方稳等. 量子信息技术纵览. *科学通报*, 2012, 57(17): 1498-1525.
- 9 Gao W B et al. Experimental realization of a controlled-NOT gate with four-photon six-qubit cluster states. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 104:020501.
- 10 Lu C Y et al. Experimental quantum coding against qubit loss error. *Proc. Natl. Acad. Sci USA.*, 2008, 105: 11050-11054.
- 11 Lu C Y et al. Demonstration of a compiled version of Shor's quantum factoring algorithm using photonic qubits. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 99:250504.
- 12 Yao X C et al. Experimental demonstration of topological error correction. *Nature*, 2012, 482:489-494.
- 13 Monz T, Schindler P, Barreiro J T et al. 14-qubit entanglement: creation and coherence. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 106:130506.
- 14 Boixo S, Albash T et al. Experimental signature of



中国科学院

- programmable quantum annealing. *Nature Communications*, 2013, 3067:1-8.
- 15 中国科学院. 科技发展新态势与面向2020年的战略选择. 北京: 科学出版社, 2020, 110.
- 16 Gisin N et al. Quantum cryptography. *Rev. Mod. Phys.*, 2002, 74: 145.
- 17 Bennett C and Brassard G. The dawn of a new era for quantum cryptography: the experimental prototype is working. *SIGACT NEWS*, 1989, 20:78.
- 18 Kimura T et al. Single-photon interference over 150-km transmission using silica-based integrated-optic interferometers for quantum cryptography. *quant-ph/0403104*, 2004.
- 19 Mo X et al. Intrinsic-stabilization uni-directional quantum key distribution between Beijing and Tianjin. *quant-ph/0412023*, 2004.
- 20 Rosenberg D et al. Long-distance decoy-state quantum key distribution in optical fiber. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 98:010503.
- 21 Schmitt-Manderbach T et al. Experimental demonstration of free-space decoy-state quantum key distribution over 144 km. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 98:010504.
- 22 Peng C Z et al. Experimental long-distance decoy-state quantum key distribution based on polarization encoding. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 98:010505.
- 23 周正威, 陈巍, 孙方稳等. 量子信息技术纵览. *科学通报*, 2012, 57 (17): 1498-1525.
- 24 Lu C Y et al. Demonstrating anyonic fractional statistics with a six-qubit quantum simulator. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102:030502.
- 25 Zhang J Y et al. Collective dipole oscillations of a spin-orbit coupled Bose-Einstein condensate. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 109: 115301.
- 26 Du J, Xu N, Peng X et al. NMR implementation of a molecular hydrogen quantum simulation with adiabatic state preparation. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 104: 030502.
- 27 Lu D, Xu N, Xu R et al. Simulation of chemical isomerization reaction dynamics on a NMR quantum simulator. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 107: 020501.
- 28 Simon J, Bakr W S, Ma R et al. Quantum simulation of antiferromagnetic spin chains in an optical lattice. *Nature*, 2011, 472:3 07-312.
- 29 Cirac J, Zoller P. Goals and opportunities in quantum simulation. *Nature Physics*, 2012, 8:264-266.
- 30 Gao W B, Lu C Y et al. Experimental demonstration of a hyper-entangled ten-qubit Schrödinger cat state. *Nature Physics*, 2010, 6:331-334.
- 31 Xu X Y, Kedem Y, Sun K et al. Phase estimation with weak measurement using a white light source. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 111 (3): 033604-033607.

## “人造生命”展现诱人前景

整理撰稿人: 中科院上海生命科学信息中心人口健康与生物医药团队

刘晓(E-mail:liuxiao@sibs.ac.cn)、王慧媛、王方、熊燕

审稿专家: 中科院院士, 中科院上海生命科学院赵国屏研究员

### 1 “人造生命”为生命规律的探索提供新途径

2010年, 美国科学家实现了人工全合成支原体基因组, 培育出由人造基因组控制的、可自我复

制的细菌细胞, 标志着人类实现了首个“人造生命”, 证明了人工合成生命的可行性<sup>[1]</sup>。

“人造生命”(artificial life / synthetic life)是以系统生物学研究为基础, 融入工程学的思想和概

念,综合利用化学、物理、信息科学的知识和技术,从头合成或改造重合成具有特定生物学活力的生物分子及其复合物、功能线路和细胞器,从而创造细胞、组织、器官、生物个体乃至生态系统。“人造生命”为生命起源、进化以及生命运动规律的探究开辟了新思路、新手段,也极大地促进了合成生物学的发展。

## 2 国际重大进展和突破不断涌现

(1)合成生物学成为发达国家资助重点。以“人造生命”为目标的合成生物学得到了美国、英国等国家的高度重视。美国国家科学基金会早在2006年就资助建立了“合成生物学工程研究中心”(SynBERC),此后,美国国家科学院、国防部高级研究项目局、国家科学基金会等相继资助了多项合成生物学相关研究项目。欧盟委员会第七框架计划在“生物技术新兴发展趋势”主题中规划了4项合成生物学相关研究项目资助开展细胞工厂及应用、合成生物学的相关标准及安全等研究。英国商务、创新与技能部2012年发布《合成生物学路线图》,随后大学与科学部2013年投入超过6 000万英镑支持合成生物学的发展,确保英国在该领域的全球领导地位。

(2)基因组合成、线路设计和合成生物制造领域取得重大突破。目前,“人造生命”正在经历从向自然学习模拟、天然生物元器件的改造与人工替换,到基于定量生物学模型的复杂生命系统的从头设计和合成、组装的发展过程。随着高效率、高质量、低成本的寡核苷酸合成及大片段DNA拼接技术的快速发展,“人造生命”的对象已从病毒、细菌发展到酵母<sup>[2]</sup>等真核生物;其研究目的也从最初的概念证实和使能技术发展,逐渐迈向复杂生命体系运动机理研究及人工遗传

线路和底盘生物设计构建等工程体系的建立。成功合成自然界中不存在的可执行DNA功能的人造分子XNA,为生命起源的研究开辟了新思路<sup>[3]</sup>;生物器件、功能线路、网络设计等技术快速发展,已成功建立能根据细菌基因型预测其表型的计算模型<sup>[4]</sup>;人工合成模拟遗传线路,实现了在活细胞中执行精密计算的功能<sup>[5]</sup>,在哺乳动物细胞内构建出复杂的基因逻辑网络<sup>[6]</sup>;利用DNA和RNA制成生物晶体管<sup>[7]</sup>,为活体细胞计算机的研发跨出关键性一步;开发出真核生物转录因子元件模块及遗传线路构建技术<sup>[8]</sup>及能对基因组进行简单、精确编辑的新技术<sup>[9]</sup>。同时,利用合成生物学技术,合成生物制造领域取得重大进展,在实现青蒿酸在人造底盘中生物合成的基础上,通过优化元件和途径,实现了产量的极大提高,并启动大规模半合成青蒿素的生产<sup>[10]</sup>,也使紫杉醇<sup>[11]</sup>、人参皂苷<sup>[12]</sup>等植物稀有活性成分在微生物细胞中的快速高效合成成为可能。

## 3 推动传统生物技术的革命性突破和经济社会的重大变革

基因组学、系统生物学、定量生物学及计算生物学的发展,为生物体的改造利用提供了前所未有的知识环境。基于系统生物学的合成生物学为全面、定量和可预见地设计、改造生物带来了革命性的机会,但真正要人工合成生命还有很长的路要走。未来,有望通过开发更加高效、低廉的DNA合成技术、精确的大片段基因组组装技术,创建最优的合成途径;通过测量生命组分、模拟生命过程,设计生命蓝图、合成生命物质,创造生命细胞和生命系统。

实现人工生命系统构建理论和技术的突破,不仅能全面认识和理解生命的本质与天然生物系统的工作原理及规律,还将在世界范围内激发新一轮理论探索和技术革命



中国科学院

的浪潮。随着工程化层次及使能技术效率的不断提升,将从根本上革新传统医药工业、化学和生物制造业,大大提升生产力、改变人类生活方式,建立“高效、清洁、节约、可持续”的发展模式,对未来经济和社会产生深远影响。

#### 4 加强前瞻规划和布局,应对机遇和挑战

我国已具备开展合成生物学和“人造生命”研究的基础,同时该领域的发展已得到国家的高度关注。2010年以来,科技部“973”、“863”计划均部署了相关研究项目,相继设立了“人工合成细胞工厂”、“新功能人造生物器件的构建与集成”、“微生物药物创新与优良的人工合成体系”、“用合成生物学方法构建生物基材料的合成新途径”、“抗逆元器件的构建和机理研究”,以及“合成微生物体系的适配性研究”等重大研究项目,资助了“人工合成酵母”国际合作计划。中科院在“创新2050”路线图中,就将“人造生命”与生命起源和进化列为交叉前沿核心科学问题之一,并于2008年建立了中科院合成生物学重点实验室。

近年来,我国科学家在合成生物学的基础研究和技术创新方面也取得了一些重要进展。例如,成功开发出一种简单、稳定、容易使用的光调控基因表达系统<sup>[13]</sup>;通过重编码大肠杆菌细胞运动模式,阐释了一个全新的生物图形成原理<sup>[14]</sup>;利用“模块途径工程策略”构建酵母工程菌,降低了植物源萜类的合成成本<sup>[15]</sup>;建立了在蓝细菌中由CO<sub>2</sub>合成丙酮的代谢途径,实现利用光能直接产生酮类化合物<sup>[16]</sup>;通过在家蚕中构建受化学信号控制的性致死人造基因线路,实现在生产上仅饲养雄蚕而达到产量高、质量好的目标<sup>[17]</sup>等。

中科院具有学科交叉和研究力量整合的优势,可针对重大科技问题,开展前瞻性布局和研究,以生物进化过程中发挥关键作用的事件为核心研究对象,在相关生物元件、模块、器件、线路、细胞器、细胞乃至组织的设计与合成上实现突破,引领学科发展方向;加强重点实验室和工程技术

平台的建设,产生一系列具有应用前景的新方法和新技术。同时,从关系国计民生和产业发展的医药、农业、化工、环境等相关重大产品入手,建立具有特定生物制造能力的人工生物体系,促进“合成生物制造”的应用基础和产业转化研究,获得若干创新“产品”,为我国可持续经济体系的建立与发展奠定科学基础。

#### 参考文献

- Gibson D G, Glass J I, Lartigue C et al. Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. *Science*, 2010, 329(5987): 52-56.
- Dymond J S, Richardson S M, Coombes C E et al. Synthetic chromosome arms function in yeast and generate phenotypic diversity by design. *Nature*, 2011, 477(7365): 471-476.
- Pinheiro V B, Taylor I A I, Cozens C et al. Synthetic genetic polymers capable of heredity and evolution. *Science*, 2012, 336: 341-344.
- Karr J R, Sanghvi J C, Macklin D N et al. A whole-cell computational model predicts phenotype from genotype. *Cell*, 2012, 150: 389-401.
- Daniel R, Rubens J R, Sarpeshkar R et al. Synthetic analog computation in living cells. *Nature*, 2013, 497(7451): 619-623.
- Ausländer S, Auslander D, Muller M et al. Programmable single-cell mammalian biocomputers. *Nature*, 2012, 487(7405): 123-127.
- Bonnet J, Yin P, Ortiz M E et al. Amplifying Genetic Logic Gates. *Science*, 2013, 340(6132): 599-603.
- Khalil A S, Lu T K, Bashor C J et al. A Synthetic Biology Framework for Programming Eukaryotic Transcription Functions. *Cell*, 2012, 150(3): 647-658.
- Cong L, Ran F A, Cox D et al. Multiplex genome engineering using CPISPR/Cas Systems. *Science*, 2013, 339(6121): 819-823.
- Paddon C J, Westfall P J, Pitera D J et al. High-level semi-synthetic production of the potent antimalarial artemisinin. *Nature*, 2013, 496(7446): 528-532.
- Ajikumar P K, Xiao W H, Tyo K E J et al. Isoprenoid pathway optimization for taxol precursor overproduction in *Escherichia Coli*. *Science*, 2010, 330(6000): 70-74.

- 12 Han J Y, Hwang H S, Choi S W et al. Cytochrome P450 CYP716A53v2 Catalyzes the Formation of Protopanaxatriol from Protopanaxadiol During Ginsenoside Biosynthesis in *Panax Ginseng*. *Plant Cell Physiol*, 2012, 53(9): 1535-1545.
- 13 Wang X, Chen X J, Yang Y. Spatiotemporal control of gene expression by a light-switchable transgene system. *Nature Methods*, 2012, 9: 266-269.
- 14 Liu C L, Fu X F, Liu L L et al. Sequential establishment of stripe patterns in an expanding cell population. *Science*, 2011, 334: 238-241.
- 15 Guo J, Zhou Y J, Hillwig M L et al. CYP76AH1 catalyzes turnover of miltiradiene in tanshinones biosynthesis and enables heterologous production of ferruginol in yeasts. *PNAS*, 2013, 110: 12108-12113.
- 16 Zhou J, Zhang H F, Zhang Y P et al. Designing and creating a modularized synthetic pathway in cyanobacterium *Synechocystis* enables production of acetone from carbon dioxide. *Metabolic Engineering*, 2012, 14: 394-400.
- 17 Tan A J, Fu G L, Jin L et al. Transgene-based, female-specific lethality system for genetic sexing of the silkworm, *Bombyx mori*. *PNAS*, 2013, 110: 6766-6770.



中国科学院

## 人脑神经连接线路图有望绘出

整理撰稿人: 中科院上海生命科学信息中心人口健康与生物医药团队

许丽 (E-mail: xuli@sibs.ac.cn)、李祯祺、王玥

审稿专家: 中科院生物物理所赫荣乔研究员

人脑是自然界中最复杂的系统之一。据估计, 成年人大脑中约有  $10^{11}$  个神经元, 这些神经元通过约  $10^{15}$  个突触互相连接, 形成了高度复杂的大脑结构网络, 因此, 在单神经元甚至是神经突触分辨水平可视化全脑神经网络研究上实现突破, 是理解脑功能和脑疾病的基础。人脑连接组是对脑功能的神经连接通路及其网络结构进行全解析、模拟以揭示人脑工作机理的研究。人脑连接组研究力图从宏观(大脑脑区)到微观(单个神经元)的各个层次上, 全面而细致地刻画从总体到个体水平的人类大脑结构网络图谱, 是对人脑结构和功能连接模式的综合研究。人脑连接组研究将为理解大脑工作机制以及洞悉脑部疾病形成、发作机理

及防治产生重要意义, 并将为人工智能系统带来进步。

### 1 国际发展现状

绘制人脑神经连接线路图已成为国际生命科学研究和未来发展的制高点。2004年, 美国NIH提出了“神经科学研究蓝图”框架, 并设立人脑连接组项目(Human Connectome Project, HCP), 旨在从毫米水平研究大脑各区域的神经连接, 绘制出不同活体人脑功能、结构图谱。2013年2月, 美国总统奥巴马提出的“脑活动图谱计划”(Brain Activity Map, BAM)则计划绘制出活体大脑内“每一个神经细胞上的每一个电脉冲”的图谱。同年4月, 美国正式启动为期10年的

“通过推动创新型神经技术开展大脑研究”(Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies, BRAIN)计划。2013年初,欧盟也决定投资10亿欧元开展为期10年的“人类脑计划”,旨在建立一个由计算机模拟的完整大脑。日本、英国、德国等也纷纷部署脑科学相关研究计划。

影像技术、光遗传学、纳米技术、侵入性先进材料、神经科学生物库、远程监控技术等多种技术的发展与革新推动了人脑连接组研究的快速发展。弥散张量成像技术(diffusion tensor imaging, DTI)和功能磁共振成像技术(magnetic resonance imaging, MRI)是目前研究人脑结构、功能联系的主要影像手段;光遗传学技术则可利用光调控大脑环路对神经元细胞之间如何相互作用形成功能进行进一步分析;而网络分析算法为研究大规模脑网络的拓扑结构提供了重要工具。

人脑连接组学发展迅速,被*Science*杂志列为2013年6大值得关注的科学领域之一。2013年上半年,HCP对外公布了其前两批研究数据,并首次绘制了3D大脑思维连接图,总数据量达4TB<sup>[1-2]</sup>。6月,首张超高精度的三维脑图——“BigBrain”绘制成功,可展示皮质层细胞结构甚至是脑神经元之间的微电流,为医学和药物研发提供了基准图谱<sup>[3]</sup>。2013年8月,研究人员成功利用超级计算机模拟了1秒钟的人脑神经网络活动。目前,德国研究人员正着手通过将神经元注入硅片,在硅芯片上呈现神经形态(neuromorph)系统,为人脑计算机模型的构建奠定基石。

## 2 中国现状

中国在脑科学研究领域一直给予高度支持。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》、《国家“十二五”科学和技术发展规划》、《“十二五”生物技术发展规划》和《国家自然科学基金“十二五”发展规划》均针对脑科学研究进行了部署。2010年,科技部启动“973”计划项目“影像的脑网络研究及其临床应用”。国家自然科学基金委于2011年启动的“情感和记忆的神经环路

基础”重大研究计划,针对“情感”和“记忆”两类认知功能及其障碍的脑网络表征与相关技术的研究进行支持。中科院也于2012年启动了“脑功能联结图谱”战略性先导科技专项(B类),旨在描述各脑区特殊种类神经细胞群之间有功能的连接和运作,并根据脑科学发展态势和最新技术条件,选择重要的脑功能(感觉、情绪、学习记忆、决策),力求完整地描述在正常生理状态和病理状态下,这些承担重要功能的神经网络连接的构造和运作机制,以绘制一张完整的大脑活动图谱。

在政策支持下,中科院、北京师范大学、清华大学等多个机构开展了脑科学研究,并取得多项成果。2007年,北京师范大学科研人员建立了世界首张活体人脑结构连接网络草图,发现人脑不同区域之间的灰质厚度具有“小世界”组织方式<sup>[4]</sup>;首次发现遗忘型轻度认知障碍和恢复期老年抑郁症存在相似的神经环路损害模式,为了解阿尔茨海默病的发病机制提供了新思路<sup>[5]</sup>;北京师范大学联合美国NIH揭示血流供应和大脑功能拓扑结构间存在紧密联系<sup>[6]</sup>;中科院研究人员正式提出“脑网络组学(Brainnetome)”的概念<sup>[7]</sup>。技术上,华东理工大学研究人员开发了一种全新的光激活操控系统Light On系统<sup>[8]</sup>;中科院研究人员最新开发的神经细胞双色钙成像技术(dual color calcium imaging)可用于获取神经细胞电活动的动态信息,将对人类“智力蓝图”的绘制起到推动作用<sup>[9]</sup>;华中科技大学也正着手研发高分辨全脑神经网络可视化仪器,为揭示大脑奥秘制造“人脑遥感卫星”。同时,中科院等研究机构的科学家为未来基于大型数据库的人脑功能连接组关联研究提供了标准化基础<sup>[10]</sup>。

全球的大量集中投入,技术的快速发展,推动脑科学发展迈入新时代,堪比人类基因组计划的人脑神经连接线路图将有望绘出,并将带来巨大的科学、社会和经济回报。

### 参考文献

- 1 NIH Blueprint: The Human Connectome Project. Human Connectome Project releases major dataset on brain connectivity.

2013. <http://humanconnectome.org/about/pressroom/press-releases/human-connectome-project-releases-major-dataset-brain-connectivity/>.
- 2 NIH Blueprint: The Human Connectome Project. HCP Releases Q2 Data. 2013. <http://humanconnectome.org/data/>.
- 3 Katrin Amunts, Claude Lepage, Louis Borgeat et al. BigBrain: An Ultrahigh-Resolution 3D Human Brain Model. *Science*, 2013, 340(6139): 1472-1475.
- 4 Yong He, Zhang J Chen, Alan C Evans Y et al. Small-world anatomical networks in the human brain revealed by cortical thickness from MRI. *Cereb Cortex*, 2007, 17(10): 2407-2419.
- 5 Bai F, Shu N, Yuan Y et al. Topologically convergent and divergent structural connectivity patterns between patients with remitted geriatric depression and amnesic mild cognitive impairment. *J Neurosci*, 2012, 32: 4307-4318.
- 6 Liang X, Zou Q, He Y et al. Coupling of functional connectivity and regional cerebral blood flow reveals a physiological basis for network hubs of the human brain. *PNAS*, 2013, 110(5): 1929-1934.
- 7 Jiang T. Brainnetome: A new-ome to understand the brain and its disorders. *Neuroimage*, 2013, 80: 263-272.
- 8 Xue Wang, Xianjun Chen, Yi Yang. Spatiotemporal control of gene expression by a light-switchable ransgene system. *Nature Methods*, 2012, 9: 266-269.
- 9 Hao Li, Yiming Li, Zhengchang Lei et al. Transformation of odor selectivity from projection neurons to single mushroom body neurons mapped with dual-color calcium imaging. *PNAS*, 2013, 07.01 (online).
- 10 Yan C G, Craddock R C, Zuo X N et al. Standardizing the intrinsic brain: Towards robust measurement of inter-individual variation in 1000 functional connectomes. *Neuroimage*, 2013, 80: 246-262.



中国科学院

## 光合作用及“人造叶绿体”将可能取得革命性突破

整理撰稿人: 中科院国家科学图书馆成都分馆先进工业生物技术团队

郑颖(E-mail: zhengy@clas.ac.cn)、陈云伟、丁陈君

审稿专家: 中科院院士, 中科院植物所匡廷云研究员

光合作用是地球上最大规模的能量和物质转换反应过程, 是地球上最大规模的太阳能利用方式, 为几乎所有的生命活动提供有机物、能量和氧气, 与当前人类面临的粮食危机、能源危机、资源危机和环境变化等问题的解决密切相关。光合作用的高效吸能、传能和转能的分子机理是光合作用研究的核心问题, 是重要的科学前沿, 阐明其机

理具有重大的科学意义和实践意义。大量研究发现, 天然植物光能利用效率远未达到理论极限值, 挖掘和提高光能利用效率具有巨大的潜力。目前, 光合作用的研究主要涉及光能高效转能的分子机理及其调控原理的研究; 从遗传本质上挖掘调控光合作用效率的关键基因资源; 培育高光效农作物和能源植物品种以及人工模拟光合作用体系; 开

发固定太阳能并高效转化成人类所需清洁能源的新技术<sup>[1]</sup>。

## 1 光合作用研究将推动农业和能源工业快速发展

地球上每年通过植物光合作用合成的有机物有2 200亿吨,相当于人类每年所需能耗的10倍。光合作用是作物产量形成的物质基础,植物干重的90%—95%来自光合作用,因此提高作物光能转化和碳素同化效率是提高作物产量的重要途径。

未来成功揭示光合作用能量传递和转化机理并成功解析光合膜蛋白复合物的空间结构后,将可能使光合膜系统成为第一个在原子水平能以物理和化学概念进行解释的复杂生物膜系统。这不仅能揭示光合作用高效转能的奥秘,跨越物理世界与生命世界不可逾越的鸿沟,促进复杂系统凝聚态物理、化学的理论研究,丰富和发展超分子体系的电子传递及能量传递理论,还能为提高农作物光能转化效率,开辟太阳能利用新途径,并为利用太阳能生物转化原理大规模生产清洁能源,研制生物电子器件及生物芯片奠定理论基础<sup>[1]</sup>。

在认知自然光合作用过程的基础上,通过仿生技术,发展由有机和无机体系组成的“人工光合作用”,从太阳能制取“太阳燃料”,实现高效水分解及二氧化碳还原,已成为能源领域研究的重点。目前的研究主要围绕高效转能的分子机理及其调控原理,探索模拟光合作用所面对的新思路、新方法、新技术、新材料等重要的科学技术问题,以及开发太阳能生物电池、藻类和光合微生物产氢及产油技术开展。这些研究成果将促进太阳能光生物转化利用新兴产业的形成,从而将会对世界能源资源格局产生深远影响。

## 2 人工光合作用体系的构建成为研究前沿

要解决能源体系可持续发展的需要,摆在人类面前一个巨大的问题是,如何能够在提供人类所需能源的同时降低二氧化碳的排放,保持生态

环境的安全。为此,必须寻求建立可持续发展的能源体系。基于光合作用的原理,建立自然的和人工的太阳能转化系统,生产清洁能源是解决当前能源与环境问题的重要途径。

如何固定太阳能,并高效转化成人类所需的清洁能源,是当今重要的科学和技术问题之一。模拟光合作用是解决这一问题的重要方法,也是未来能源战略的一个重要方向,因而倍受各国政府和科学家的重视。欧盟启动了“人工叶片”计划,开展光伏技术、模拟光合作用、改造光合固碳途径等研究;美国启动了“模拟光合作用进行太阳能制氢研究计划”;英国生物技术与生物科学研究委员会和美国国家科学基金会联合投入611万欧元,用以探索突破光合成限制的方法,以大幅提升粮食和生物能源作物的产量<sup>[2]</sup>。

突破植物光合作用过程中光能吸收、传递和转化的分子机理及调控原理等瓶颈,以及提高作物光合作用效率等一直是光合作用研究的重点。日本冈山大学在世界上首次用1.9 Å高分辨率解析了光系统II光合膜水裂解蛋白的空间结构<sup>[3]</sup>,被*Science*杂志评为2011年十大科技突破之一,该结构不仅对生命科学至关重要,也可能为清洁能源的开发提供一个钥匙<sup>[4]</sup>。美国伦斯勒理工大学的最新成果提供了光系统II的重要信息,解答了光系统II中太阳能水分解反应的关键问题<sup>[5]</sup>。瑞典皇家理工学院化学系的研究人员已成功构建出了一种能使水快速氧化成氧气的分子催化剂,首次使人工光合作用接近了自然光合作用的速率<sup>[6]</sup>。

近年来,模拟植物光合作用体系,构建“人造叶绿体”的研究也取得了重大进展。美国麻省理工学院的科学家在实验室内再现了光合作用过程,在整个过程中光合作用将水分解成氢和氧,并产生了氢气和氧气<sup>[7]</sup>。英国格拉斯哥大学的研究人员利用合成生物学方法力图创造一种能将太阳能转化为液体燃料的人造“叶片”,复制类似光合作用的化学反应<sup>[8]</sup>。英国东安格利亚大学的科学家正尝试通过在微生物中放入微型太阳能面板来人工模拟光合作用过程<sup>[9]</sup>。

科研人员还结合合成生物学技术,设计组装各类光合作用生物体系。美国田纳西大学的研究人员通过控制蓝绿藻光系统I来生产能源<sup>[10]</sup>。丹麦哥本哈根大学的研究打破了植物细胞功能的进化划分过程,将内质网中生产天然生物活性化合物的整个代谢途径迁移至叶绿体中,开创了一条在叶绿体中合成大量天然化学物质的新途径<sup>[11]</sup>。

### 3 中国高度重视光合作用基础研究与 应用开发

由于光合作用研究在理论和实践上的重要意义,我国高度重视光合作用的研究。近十几年来,由中科院植物所先后主持了生物学、物理学、化学及农学交叉的、以光合作用机理研究为主的三期“973”项目。由中科院生物物理所主持了“973”重大科学问题导向性项目“光合作用与人工叶片”。长期以来,中科院不断组织光合作用的机理研究及多学科交叉仿生模拟的重点支持项目,使我国在光合作用这一领域内取得了在国际上具有重要影响的成果,在光合膜蛋白结构与功能,特别是在光系统II的结构与功能研究以及光合膜蛋白组装调控机理等重大问题上取得了突飞猛进的突破<sup>[12,13]</sup>。仿生模拟方面,我国科学家首次成功组装了以植物捕光天线蛋白(LHCII)为主体的生物有机太阳能电池,不仅拓宽了有机电池的吸收光谱,而且使光能利用效率提高了30%<sup>[14]</sup>。随着我国光合作用研究成就持续在国际上产生重要影响,2011年由中科院植物所主办,首次在中国成功举办第15届“国际光合作用大会”<sup>[15]</sup>。

未来光合作用的研究将通过新一代转基因技术与分子机理设计相结合的方法,培育高光效植物品种,大幅度提高农作物产量。通过仿生学和合成生物学研究的交叉

和整合,设计制造新型的生物纳米材料装置和生物催化分子器件,使太阳能高效转化为化学能,并实现“人工光合细胞”规模化生产氢及各种化合物,引发生物利用太阳能的革命性进步。

#### 参考文献

- 1 中国科学院. 科学技术与中国的未来: 中国至2050年生物资源科技发展路线图. 北京: 科学出版社, 2009, 13-36.
- 2 Scientists aim to improve photosynthesis to increase food and fuel production. <http://www.jic.ac.uk/corporate/media-and-public/current-releases/110328AlisonSmithPhotosynthesis.html>.
- 3 Yasufumi Umena, Keisuke Kawakami, Jian-Ren Shen et al. Crystal structure of oxygen-evolving photosystem II at a resolution of 1.9 Å. *Nature*, 2011, 473: 55-60. DOI: 10.1038/nature09913.
- 4 Breakthrough of the year. *Science*, 2011, 1629-1635.
- 5 Milikisiyants S, Chatterjee R, Christopher S et al. The structure and activation of substrate water molecules in the S2 state of photosystem II studied by hyperfine sub-level correlation spectroscopy. *Energy & Environmental Science*, 2012, (5): 7747-7756.
- 6 Lele Duan, Fernando Bozoglian, Sukanta Mandal et al. A molecular ruthenium catalyst with water-oxidation activity comparable to that of photosystem II. *Nature Chemistry*, 2012. DOI: 10.1038/nchem.1301.
- 7 Steven Y Reece, Jonathan A Hamel, Kimberly Sung et al. Wireless Solar Water Splitting Using Silicon-Based Semiconductors and Earth-Abundant Catalysts. *Science*, 2011, 334: 645-648. DOI: 10.1126/science.1209816.
- 8 Richard Hildner I, Daan Brinks I, Jana B Nieder et al. Quantum Coherent Energy Transfer over Varying Pathways in Single Light-Harvesting Complexes. *Science*, 2013, 340(6139): 1448-1451. DOI: 10.1126/science.1235820.
- 9 UEA scientists mimic nature in £800,000 renewable ener-



中国科学院

- gy project. 2013. <http://www.bbsrc.ac.uk/news/industrial-biotechnology/2013/130122-n-uea-scientists-mimic-nature.aspx>.
- 10 Andreas Mershin, Kazuya Matsumoto, Liselotte Kaiser et al. Self-assembled photosystem-I biophotovoltaics on nanostructured TiO<sub>2</sub> and ZnO. *Nature: Science Reports*, 2012, 2(34), DOI: 10.1038/srep00234.
- 11 Agnieszka Zygadlo Nielsen, Bibi Ziensen, Kenneth Jensen et al. Redirecting Photosynthetic Reducing Power towards Bioactive Natural Product Synthesis. *ACS Synth. Biol.*, 2013, 2(6): 308-315. DOI: 10.1021/sb300128r.
- 12 Zhenfeng Liu, Hanchi Yan, Kebin Wang et al. Crystal structure of spinach major light harvesting complex at 2.72 Å resolution. *Nature*, 2004, 428: 287-292. DOI: 10.1038/nature02373.
- 13 Wei Chi, Xuwu Sun, Lixin Zhang. Intracellular Signaling from Plastid to Nucleus. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 2013, 64: 559-582. DOI: 10.1146/annurev-arplant-050312-120147.
- 14 Kai Yao, Cheng Liu, Yiwang Chen et al. Integration of light-harvesting complexes into the polymer bulk hetero-junction P3HT/PCBM device for efficient photovoltaic cells. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(6): 7342-7349. DOI: 10.1039/c2jm16616j.
- 15 第十五届国际光合作用大会在北京成功召开. [http://www.nsf.gov.cn/Portal0/InfoModule\\_407/31535.htm](http://www.nsf.gov.cn/Portal0/InfoModule_407/31535.htm). [2010-11-22].

## 人-机-物三元融合将促进信息服务进入普惠计算时代

整理撰稿人: 中科院国家科学图书馆成都分馆信息科技团队

房俊民(E-mail: fjm@clas.ac.cn)、田倩飞、徐婧、唐川

审稿专家: 中科院计算技术所洪学海研究员

### 1 人-机-物三元计算是实现普惠计算的范式变革

过去50年,信息技术的发展主要追求高性能、通用和规模化生产,较忽视低成本、易用性、可靠性、安全性和个性化。未来的信息产品则是要满足数以十亿计的广大民众的个性化需求<sup>[1]</sup>。为了面向大众实现高增值、低成本、可持续的普惠计算(普惠是指让广大民众都能够低成本、高增值、可持续地获益。普惠计算是指以全民普惠为目标的计算机科学研究和应用),需要让计算进入广大民众生产生活的业务价值层面,这意味着计算需要从信息空间进入人-机-物三元世界,不再局限于使用计算机与网络硬件、软件和服务,而是综合利用人类社会(人)、信息空间(机)、物理世界(物)

的资源,通过云计算、物联网、移动通信、光子信息等技术支持,协作进行个性化大数据计算<sup>[2]</sup>。为此,计算机科技及产业必须发生基本性的范式变革。该范式变革就是人-机-物三元世界,或三元计算。

典型的人-机-物三元世界是由人、嵌入式系统(网络组件)和物理环境所组成的开放环境。其中,嵌入式系统能增强人与物理世界的交互。人-机-物三元世界能通过身体和大脑传感器量化人的感知活动,进而推断用户的意图。嵌入式系统能将用户意图转换为机器控制信号,让机器执行元件充当人的代表,并与物理环境进行交互。最后,由人观察物理世界交互情况,以此为据制定决策并结束此次循环<sup>[3]</sup>。

## 2 信息服务进入普惠计算时代的突出特点

未来10年内,人-机-物三元融合将使得信息科技渗透到实体经济和社会服务活动中。通过人-机-物开放式协作交互过程提升生产生活的智能化水平。传统计算机科学将演变成为人-机-物三元计算信息科学,传统信息技术将升级为海-网-云信息技术,出现新的硬件、软件、应用模式、协议和标准<sup>[4]</sup>。

在人-机-物三元融合的趋势下,以民众的计算需求为中心的普惠计算意味着要向大众提供重要的信息服务计算价值,以满足个体需求。为此,普惠的信息服务计算应包括4项特性:(1)高增值的大众利用:以中国为例,至2050年IT用户应覆盖八成以上的人口,且人均IT投资增长超过13倍;(2)可支付的计算:每位用户利用IT的总成本应大幅下降,且所获的IT价值等同或更多;(3)可持续的计算:IT利用呈数量级增长,但能耗和排放物不应呈数量级增长;(4)三元计算:只有发生变革性创新时,上述特性才能实现。这种创新的主要机遇将源自人类社会、信息空间和物理世界的融合与交互<sup>[5]</sup>。

## 3 信息服务进入普惠计算时代将产生重大经济社会影响

人-机-物三元世界是一个多人、多机、多物组成的动态开放网络社会,在人-机-物三元融合作用下,云计算所推动的以人为出发点、以个人的计算需求为第一负载的e-People将超越e-Business、e-Science和e-Government成为主流服务模式,将使民众在医疗卫生、地理信息、电子商务、科研教育、影视娱乐等方面享受更高质量服务。例如,在人机界面、受控辅助机器人和智能假肢、修复或增强人类与物理世界的交互等领

域将出现多种令人兴奋的应用,并且研究人员能更好地应对半自动机器人、无线体域网、嵌入式系统设计和意图推断算法开发等交叉领域的挑战<sup>[6]</sup>。据估计,普惠计算有望将中国计算机市场在2040—2050年增长到每年10万亿元<sup>[7]</sup>。

## 4 相关研究已引起业界广泛关注

目前,人-机-物三元融合及普惠计算的研究已引起各界关注。中国科技部和国家自然科学基金委员会出版的《2011至2020年信息技术发展》战略研究报告中,面向人-机-物三元世界的发展趋势得到了肯定。人-机-物三元计算(以及美国科学家提出的计算透镜和计算思维)概念促进了新的交叉学科子领域和研究团体的形成。例如,“物联网”领域的研究在中国已获广泛关注,并成为若干大学的新学科项目;美国哈佛大学正开展演进计算研究;新成立的美国卡内基梅隆大学计算思维研究所、康奈尔大学计算可持续性研究所也瞄准了相关研究方向<sup>[8]</sup>。此外,欧盟提出的物联网战略研究路线图<sup>[9]</sup>、欧盟未来新兴技术旗舰计划项目的“人脑工程”<sup>[10]</sup>、美国国家标准与技术研究院(NIST)发布的“21世纪网络物理系统的战略研发机遇”<sup>[11]</sup>、通用电气公司提出的“工业互联网”<sup>[12]</sup>等战略规划与研究项目,均系在人-机-物三元融合趋势下的相关举措。

## 5 中国积极推动相关研发进程

近年,中国政府有关部门以及中科院对入-机-物三元融合和普惠计算的有关研究提供了系列资助,取得了较为显著的研究进展,表明我国在该方向上已具有良好基础。

普惠三元计算的概念最早于2001年提出,当时中国正在制定2001—2020年科学与技术发展中期计划。此后,该概念在中科院的大量研究中得以延伸发展<sup>[8]</sup>。2007年,



中国科学院

中科院针对2050年信息技术发展的挑战、需求和潜在路线图发起了为期2年的研究,在此基础上,中科院研究人员提出:需要一种新的范式(被命名为“普惠计算”)来应对未来数十年中的IT挑战<sup>[5]</sup>。2009年,中科院发布《中国至2050年信息科技发展路线图》报告,指出发展普惠泛在的信息网络是我国经济社会发展和科学研究的重要需求,并提出了人-机-物三元世界和信息技术普惠大众的思想<sup>[7,13]</sup>。2012年8月,中科院启动了“面向感知中国的新一代信息技术研究”先导专项,人-机-物三元融合的信息技术是研究重点之一<sup>[14]</sup>。未来一段时间,为进一步提升计算技术价值,逆转传统计算产业发展停滞趋势,实现高增值、低成本、可持续的普惠信息服务发展目标,信息服务业必将在人-机-物三元融合的大趋势下向普惠计算时代大踏步前进。

#### 参考文献

- 1 中国科学院. 中国至2050年信息科技发展路线图. 北京: 科学出版社, 2009, 27.
- 2 中国科学院. 科技发展新态势与面向2020年的战略选择. 北京: 科学出版社, 2013, 94.
- 3 Gunar Schirner, Deniz Erdogmus, Kaushik Chowdhury et al. The Future of Human in-the-Loop Cyber-Physical Systems. IEEE Computer Society, Jan, 2013.
- 4 中国科学院. 科技发展新态势与面向2020年的战略选择. 北京:

- 科学出版社, 2013, 95.
- 5 Zhiwei Xu, Guojie Li. Computing for the Masses. Communications of the ACM, 2011, 54(10).
- 6 中国科学院. 科技发展新态势与面向2020年的战略选择. 北京: 科学出版社, 2013, 10.
- 7 徐志伟, 李国杰. 普惠计算之十二要点. 集成技术, 2012, 1(1): 20-25.
- 8 Xu Z W, Tu D D. Three new concepts of future computer science. Journal of computer science and technology, 2011, 26(4): 616-624. DOI 10.1007/s11390-011-1161-4.
- 9 European Commission. Internet of Things Strategic Research Roadmap. [http://www.internet-of-things-research.eu/pdf/IoT\\_Cluster\\_Strategic\\_Research\\_Agenda\\_2009.pdf](http://www.internet-of-things-research.eu/pdf/IoT_Cluster_Strategic_Research_Agenda_2009.pdf)[2013-8-9].
- 10 European Commission. Human Brain Project. <http://www.human-brainproject.eu/>[2013-8-9].
- 11 NIST. Strategic R&D Opportunities for 21<sup>st</sup> Century Cyber-Physical Systems. [http://www.nist.gov/el/upload/12-Cyber-Physical-Systems020113\\_final.pdf](http://www.nist.gov/el/upload/12-Cyber-Physical-Systems020113_final.pdf)[2013-1].
- 12 General Electric. Introducing the Industrial Internet. <http://www.ge.com/stories/industrial-internet>[2013-8-9].
- 13 Li Guojie. Information Science and Technology in China: A Roadmap to 2050. Beijing: Science Press (Berlin: Springer-Verlag), 2010.
- 14 信息技术战略性先导科技专项启动. [http://www.cas.cn/xw/zyxw/yw/201208/t20120814\\_3627162.shtml](http://www.cas.cn/xw/zyxw/yw/201208/t20120814_3627162.shtml).

## 未来电网将实现从交流向直流的重大变革

整理撰稿人: 中科院国家科学图书馆武汉分馆先进能源团队

张军(E-mail: zhangjun@mail.whlib.ac.cn)、陈伟、李桂菊

审稿专家: 中科院电工所肖立业研究员

### 1 可再生能源发展对电网技术提出挑战

随着可再生能源发电技术的发展, 以可再生

能源为主、终端能源以电力为主的清洁能源系统格局将逐步形成。以2012年为例, 全球可再生能源累计装机容量超过1 470 GW(其中非水电可再

生能源超过480 GW),同比增长8.5%,超过全球电力装机总量的26%,供应了全球21.7%的电量。太阳能发电装机容量突破100 GW大关,成为仅次于水电和风电的第三大可再生能源发电技术<sup>[1]</sup>。

可再生能源发电具有间歇性、波动性、分散性的特点,大量接入集中式可再生能源电站和分布式可再生能源电力,对未来电网发展提出了挑战。

## 2 输电技术的演变和特点

1882年世界上建成的第一条输电线路是直流输电线路,但由于早期直流输电功率损失大、变压困难,很快被交流输电技术所取代。然而,随着远距离大容量输电线路不断增加以及广域大电网的形成,交流输电也遇到了技术瓶颈问题,如固有的系统同步性、输电稳定性较差、输电效率相对较低等。同时,交流大电网运行安全问题也日益突出。

另一方面,直流输电技术则随着高压换流技术及大功率电力电子器件的发展日益进步。20世纪50年代以来,高压直流输电技术(简称HVDC)开始崭露头角,该技术通过整流站将送端交流电能转换为直流电能,通过直流线路将直流功率输送到逆变站,再通过逆变站将直流电能转化交流电能送到受端交流系统的直流输电技术。其优点是:(1)高压直流输电系统架空线路只需正负两极导线,可实现大功率、低损耗、长远距离电力的直接输送;(2)可以实现交直流电力系统的并联输电或非同步联网,通过调节有功功率,有效抑制交流线路的功率振荡,提供交流的暂态、动态稳定性能;(3)通过改变送电端和受电端的运行方式,控制系统潮流的大小和方向,减少或避免大量过网潮流;(4)长距离输电时,直流电网建设投资低,扩容方便,效益高。

## 3 全球高压直流输电技术的发展

目前世界上已建和在建的高压直流输电工程已达100多个<sup>[2]</sup>,对多端直流输电及直流电网技术的研究也日益深入。高压直流输电技术相关的重大突破也不断涌现。1997年ABB公司首次采用大功率绝缘栅双极型晶体管(IGBT)研制了电压源换流器,成功实现了可关断器件换流。这种直流输电技术具有无功有功可独立控制、无需滤波及无功补偿设备、可向无源负荷供电、潮流翻转时电压极性不改变等优势,更适于构建多端直流输电及直流电网。2010年西门子公司又成功研制出新型模块化多级IGBT换流器,将数百个微型换流器整合在一起,使容量等级提高到1000兆瓦以上。直流电网的另一项瓶颈技术是直流断路器。2012年,ABB宣布他们已经在此方面取得了突破性进展,研制成功320kV的直流断路器样机,为直流电网的建设打下了良好的基础。

近年来一些发达国家将电网现代化作为战略规划和研发部署的重点。2005年欧盟建立智能电网技术平台,此后陆续发布了《欧洲未来电网愿景与战略》(2006)<sup>[3]</sup>、《欧洲未来电网战略研究议程》(2007)<sup>[4]</sup>、《欧洲未来电网战略部署方案》(2010)<sup>[5]</sup>,又发布了《至2035年的智能电网战略研究议程》(2012)<sup>[6]</sup>。欧洲未来电网的设计中提出了超级电网(Super Grid)概念,拟通过高密度高压直流电网建设,将分散的各欧洲国家市场整合成欧洲通用电力市场,并试图在非洲北部沙漠地区建设大规模太阳能发电基地,通过高压直流线路引入欧洲。

德国作为高压直流电网技术的领头羊,2009年公布了《2020年能源政策路线图》,提出在2015年前投资60亿欧元对60000 km的国家电网进行智能升级改造,并新建850 km高压直流输电线路<sup>[7]</sup>。随着德国民



中国科学院

用核电站将于2022年全部退役,德国拟建立贯穿全国交流电网的4条高压直流线路,将电力从风电资源丰富的北部地区输送至南部。

2003年美国能源部制定《电网2030》<sup>[8]</sup>和《国家输电技术路线图》<sup>[9]</sup>提出设想,采用超导技术、储能技术和直流输电技术的骨干电网构架,将美国电网建设成为由全国性骨干网、区域电网、地方配电网和分布式微型电网构成的综合性电网。

可以预计,随着可再生能源日益成规模地接入电网,未来电网将实现从交流运行模式向直流运行模式的转变。高压直流输电技术的发展,还将改变数据通信等对功率密度、可靠性、稳定性要求更高的相关领域的供电模式,从而对能源生产、输配和利用方式、电气行业的产业结构产生重大影响,并孕育一批高新技术产业。

#### 4 中国对发展高压直流电网技术的重大需求

截至2011年底,全国并网可再生能源发电装机容量达到5 159万千瓦,占总装机容量的4.89%;并网可再生能源发电量933.55亿千瓦时,约占总发电量的2%。其中以风能为主,并网风电约占并网可再生能源发电装机的87.33%;风电发电量约占并网可再生能源发电量的78.38%。

从长远看,我国的可再生能源发电具有大规模发展的资源基础,将在未来发挥主流甚至主导能源的作用。据统计,每年全国陆地接收的太阳辐射总量相当于24 000亿吨标煤,我国离地10米高的风能资源总储量约为32.26亿千瓦,可开发利用风能储量约10亿千瓦。我国水能资源理论蕴藏量近7亿千瓦,占我国常规能源资源量的40%。

随着我国可再生能源基地建设步伐的日益加快和规模的迅速扩大,现有的交流电网越来越难以适应发展,传统的电力装备、电网结构和运行技术等在接受超大规模可再生能源方面也越来力不从心,对电网动态安全稳定带来革命性挑战。为此,必须采用新技术、新装备和新电网结构来满足未来能源格局的深刻变化。

#### 5 中国直流输电技术发展现状

我国高压直流电网技术发展起步较早。早在1990年8月就建成了葛洲坝—上海南桥±500千伏直流输电工程。这是我国第一个大型直流输电工程,其工程输送距离1 054公里,额定输送容量120万千瓦。之后又陆续建设了三峡—常州、三峡—上海、三峡—广东±500千伏直流输电工程,直流线路全长2 900余公里。

近年来以“建设强交强直的交直流互联电网架构”为指导思想,我国开始推动特高压直流输电工程建设。2010年7月向家坝—上海特高压直流输电示范工程成功投运,并正在推进锦屏—苏南、哈密—郑州、溪洛渡—金华等特高压直流输电工程建设。根据国家电网规划,拟构建华北—华东—华中1 000kV交流主网架,与西北和东北送端电网通过直流异步相联,所需的区外来电分别通过特高压直流和特高压交流输入。山西、蒙西、陕北、宁夏、锡盟等大型煤电、风电和四川水电以及沿海核电通过特高压交流接入,西北、东北等地大型煤电、风电和西南大型水电通过特高压直流输电通道送入<sup>[10]</sup>。

《国家能源科技十二五发展规划》提出,“十二五”期间我国主要FACTS装置将实现国产化;研制成短路故障限流器、直流断路器、电力电子变压器、超导储能系统、超导直流输电等示范系统;VSC-HVDC直流换流器在100kV系统得到应用。

预计中国将在直流电网基础理论和多端直流输电技术方面取得突破,并在西北部可再生能源资源丰富地区建成区域直流电网,实现区域可再生能源的规模化应用,提高可再生能源的比例。

#### 6 中国直流电网技术发展展望

发展直流电网来解决中国未来可再生能源规模接入电网的问题是紧迫的任务。我国要在直流电网的理论体系和关键技术等方面实现系统性整体突破,还需要解决一批关键科技问题:研究电网演化及未来直流电网的构造,建立直流电网的安

全稳定性理论;发展新型高性能传感器及其网络、直流电网的建模与仿真技术、直流电网云计算和云计算技术、广域直流网通用信息平台的构造及信息安全技术;突破直流断路器及限流技术、广域直流网协调调度与优化运行控制、故障定位与网络重构、分布式电网及其接入、储能技术、超导电力技术等一批关键技术;研制新型电力电子器件、高压大功率电力电子装备、新型电工材料等。

中科院电工所对我国未来直流电网建设的合理性、网络架构和广域可再生能源资源互补利用模式及超导直流输电技术等开展了研究,并启动了基于多种能源互补(含多种储能系统)的直流电网示范系统的建设,并建成了 360 米、万安培级的超导直流输电示范工程。

预计我国在 2020 年前,可建立与中国国情相适应的直流电网理论体系和技术体系以及标准体系,全面突破直流电网的关键技术,为今后中国新一代电网发展奠定坚实基础。未来电网向直流运行模式的革命性转变,将催生大量的科技创新机遇和一大批战略性新兴产业,直流电网科技的系统性突破,将为中国未来清洁能源体系的整体建立提供技术保障。

#### 参考文献

- 1 UNEP. 全球可再生能源投资趋势 2013. <http://fs-unep-centre.org/publications/global-trends-renewable-energy-investment-2013>.
- 2 [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_HVDC\\_projects](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_HVDC_projects).
- 3 European SmartGrids Technology Platform. 2006-04-01. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future[R/OL]. <http://www.smartgrids.eu/documents/vision.pdf>.
- 4 European SmartGrids Technology Platform. 2007-12-01. Strategic Research Agenda for Europe's Electricity Networks of the Future[R/OL]. [http://www.smartgrids.eu/documents/sra/sra\\_finalversion.pdf](http://www.smartgrids.eu/documents/sra/sra_finalversion.pdf).
- 5 European SmartGrids Technology Platform. 2010-12-26. Strategic Deployment Document for Europe's Electricity Networks of the Future[R/OL]. [http://www.smartgrids.eu/documents/SmartGrids\\_SDD\\_FINAL\\_APRIL2010.pdf](http://www.smartgrids.eu/documents/SmartGrids_SDD_FINAL_APRIL2010.pdf).
- 6 European Technology Platform SmartGrids. 2012-03-08. SmartGrids Strategic Research Agenda (SRA) for RD&D needs towards 2035[R/OL]. [http://www.smartgrids.eu/documents/20120308\\_sra2012.pdf](http://www.smartgrids.eu/documents/20120308_sra2012.pdf).
- 7 Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. 2009-04-03. Energy Policy Road Map 2020[R/OL].
- 8 U.S. Department of Energy. 2003-07-01. "Grid 2030" — A National Vision for Electricity's Second 100 Years[R/OL].
- 9 U.S. Department of Energy. 2004-01-01. National Electric Delivery Technologies Roadmap: Transforming the Grid to Revolutionize Electric Power in North America[R/OL].
- 10 刘振亚,张启平. 国家电网发展模式研究. 中国电机工程学报,2013,33(7).



中国科学院

# 太阳能光伏发电将实现平价上网

整理撰稿人:中科院国家科学图书馆武汉分馆先进能源团队

陈伟(E-mail:chenw@mail.whlib.ac.cn)、张军、李桂菊

审稿专家:中科院广州能源所赵黛青研究员、蔡国田副研究员

## 1 光伏发电发展现状与挑战

太阳能光伏发电是太阳能发电技术中发展最为迅速且前景最被看好的发展方向。自2008年以来光伏发电装机容量年均增长率达60%,截至2012年底,全球光伏累计装机量首次突破了100 GW<sup>[1]</sup>。据国际能源署预测,到2050年全球太阳能光伏发电量将占全球发电量约11%,每年能减少约23亿t的CO<sub>2</sub>排放<sup>[2]</sup>。

光伏发电也面临着重大挑战。太阳能能源密度较低,且容易受日照时间、辐照强度等自然因素的影响;其基本发电原理也限制了光伏系统的转换效率难以达到同常规能源发电一样的水平;且材料、制造等方面的因素也导致了大规模光伏发电与常规能源相比,在发电成本上处于明显劣势,上网电价难以与水电、煤电、核电竞争。

## 2 低成本光伏发电需要突破的关键科技问题

现阶段光伏发电发展离不开政府补贴,而要摆脱政策扶持,实现基于市场经济规律的普及,成为主要替代能源之一的关键在于大幅度降低发电成本,使之达到发电成本与常规能源相当。降低光伏发电成本一般从以下几个方面着手:(1)降低规模化工业生产制造成本;(2)提高太阳能电池主要材料硅的利用效率,降低原料成本;(3)大力发展新材料和新技术提高太阳能转化效率。其核心是提高电池转换效率的同时尽量降低其生产成本,进而降低整体发电成本,实现平价上网。关键科学问题在于如何提高太阳光的吸收率和光激发电子空穴的产生率,以及有效促进光生电子、空穴的转移。涉及到的关键技术包括:提高太阳能电池

能量转换效率的新概念、新机制研究;光伏材料开发与性能改善;光伏器件结构设计;光伏材料和器件的制备与表征技术等。

## 3 光伏发电的前景与未来

随着原材料价格下降、光伏发电产业技术的日益进步和全球光伏市场规模不断扩大,已为光伏发电实现平价上网提供了产业和技术基础。目前第一代太阳电池以晶硅为材料,成本高,目前商业化后最高转换效率为22%,而且正进一步向高效率和薄片化发展。同时随着技术进步和制造规模的扩大,第一代太阳能电池成本正迅速下滑,晶硅组件价格已从2006年每瓦特约4美元降至2012年的1美元以下。第二代半导体薄膜太阳电池的实验室转化效率为12%,工业化发电效率为8%—10%,成本较第一代太阳能电池低并还在继续下降中,如2012年其平均价格就下降了20%<sup>[3]</sup>,未来将继续向高效率、稳定和长寿命方向发展。第三代新概念太阳电池转换效率可达35%以上,在未来10年有望取得突破,使其电价可与传统能源相比拟。

光伏发电已成为世界主要国家普遍关注和重点发展的战略性新兴产业。各国政府都在加大投入,促进光伏科技突破和产业发展。美国计划到2020年光伏系统累计总装机量达到7 GW,总成本降低75%,达到约1美元/W(相当于6美分/kWh),使得到2020年与其他能源形式相比,大规模光伏系统能在没有资金补贴的情况下具备市场竞争力,以促进全国范围内太阳能系统的广泛部署<sup>[3]</sup>。欧盟光伏产业计划设定了到2020年光伏发电满足12%欧洲电力需求目标,提出将传统交钥匙光伏

系统成本降至 1.5 欧元/W 以下,日照条件良好的南欧地区光伏发电成本达 7—14 欧分/kWh<sup>[4]</sup>。日本提出的光伏发电路线图坚持以“实现电网平价”为理念,设定了到 2017 年光伏发电成本降至 14 日元/kWh、2025 年降至 7 日元/kWh 的目标,将太阳能光伏发电发展成为主要能源之一<sup>[5]</sup>。

近年来,我国太阳能光伏产业发展迅速,已成为我国为数不多的、可以同步参与国际竞争并有望达到国际领先水平的行业,形成了包括硅材料及硅片、光伏电池及组件、逆变器及控制设备的完整制造产业体系。

在规划上,2009 年中科院就启动了太阳能行动计划,重视在新原理、新方法、新材料、新工艺上的突破,确定了 2015 年分布式利用、2025 年替代利用、2035 年规模利用共 3 个阶段目标。在 2012 年中国政府先后制定了《太阳能发电发展“十二五”规划》和《太阳能发电科技发展“十二五”专项规划》,2013 年 7 月 4 日又公布了《国务院关于促进光伏产业健康发展的若干意见》<sup>[6]</sup>,计划在 2015 年将太阳能光伏发电的装机容量提高到 35 GW,预计中国可能在 2015 年实现光伏发电上网电价每度电 1 元的目标。同时计划在 2020 年使中国光伏装机总量达到 50 GW 甚至 100 GW,在此背景下,实现每度

电 0.6—0.8 元的目标。

综上所述,随着光伏发电效率不断提高且发电成本的不断降低,预计到 2020 年前后,光伏发电价格将降低到可以实现平价上网的程度。这一实现将会对可再生能源的利用产生非常积极的促进作用,进而引发能源结构的重大变革。

#### 参考文献

- REN21. Renewables Global Status Report 2013. 2013. [http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2013/GSR2013\\_highres.pdf](http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2013/GSR2013_highres.pdf).
- IEA. Technology Roadmaps - Solar photovoltaic energy 2010. [http://www.iea.org/papers/2010/pv\\_roadmap.pdf](http://www.iea.org/papers/2010/pv_roadmap.pdf).
- DOE. SunShot Vision Study, 2012. <http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/47927.pdf>.
- European Photovoltaic Industry Association, European Photovoltaic Technology Platform, 2010. Solar PV European Industrial Initiative Implementation Plan. [http://setis.ec.europa.eu/implementation/implementation-plans/Solar\\_EII\\_PV\\_Implementation\\_Plan\\_final.pdf/at\\_download/file](http://setis.ec.europa.eu/implementation/implementation-plans/Solar_EII_PV_Implementation_Plan_final.pdf/at_download/file).
- NEDO.「太阳光发电ロードマップ(PV2030+)」概要版. 2009-06-08. <http://www.nedo.go.jp/content/100080327.pdf>.
- 国务院. 国务院关于促进光伏产业健康发展的若干意见. 2013-07-04. [http://www.gov.cn/zwggk/2013-07/15/content\\_2447814.htm](http://www.gov.cn/zwggk/2013-07/15/content_2447814.htm).

## 深层地热能将成为主要可再生能源之一

整理撰稿人: 中科院国家科学图书馆武汉分馆先进能源科技团队

李桂菊(E-mail: ligj@mail.whlib.ac.cn)、张军、陈伟

审稿专家: 中科院地质与地球物理所庞忠和研究员

地热能是蕴藏在地球内部的巨大自然资源。地热能是一种清洁的能源,其开发前

景十分广阔,已成为 21 世纪能源发展中不可忽视的可再生能源之一。



中国科学院

## 1 主要科技内涵及意义

地热能包括浅层地热能和深层地热能。浅层地热能是指地球浅表层数百米内的土壤砂石和地下水中蕴藏的低温热能<sup>[1]</sup>,在当前技术经济条件下可以得到充分的开发和利用;而深层地热是指地球深层数千米、温度更高的深层地热能或干热岩资源。在干热岩开采技术基础上提出的增强型地热系统(EGS)近年来成为地热领域的研究重点。EGS是指通过注入井注入水或其他工质流体(比如CO<sub>2</sub>等)进行地下循环,通过人工产生的连通裂隙带,水与岩体接触被加热,然后通过生产井返回地面,形成一个闭式回路。EGS是以工程措施建造地热储层,从低渗透性岩体中经济地采出相当数量的深层热能的人工地热系统<sup>[2]</sup>。

深层地热能具有稳定、连续、利用效率高等优势,以开采和利用地下低渗透性结晶质干热岩中的热能为目标的EGS技术已成为许多国家新能源发展的重点方向。目前EGS还处于示范阶段,未来10年是增强型地热系统发展的关键期。国际能源署(IEA)地热路线图报告建议各国政府提供持续充足的研发与示范资源,以在未来10年规划和开发至少50个EGS中试厂。到2020年前后,能够在EGS工程设计和开发方面取得重大突破,实现干热岩地热能的示范应用。充分开发利用地热资源,部分替代煤、石油等化石能源,既可减轻环境污染,又能缓解煤、电等资源紧张局面。

## 2 当前世界进展

深层地热资源是绿色可再生能源,在未来能源供应与CO<sub>2</sub>减排上具有巨大潜力,受到世界各国高度重视。近几年,国际上对开发EGS的呼声日益高涨,不仅投入巨资开展研究,美、德、法、澳、日等国还建设了一批试验性EGS系统。

根据美国地质调查局的估计,美国可供开发的增强型地热资源潜在在100—500 GW之间。美国能源部在地热能领域的财政预算也在逐年增加。2013年4月,美国首个商业化增强型地热系

统项目Desert Peak实现并网发电,将之前的Desert Peak地热发电厂装机容量增加了1.7MW。能源部支持的EGS项目还有加利福尼亚州Middletown的Calpine示范项目及俄勒冈州Newberry Volcano附近的AltaRock示范项目<sup>[3]</sup>。美国在利用CO<sub>2</sub>作为工质流体,以及太阳能和地热联合发电等领域也开展示范项目<sup>[4]</sup>。

澳大利亚是开展EGS研究最积极的国家之一。澳大利亚政府对地热技术给予政策优惠,成立了全国地热能源组织和多个股份制地热公司,在全国重点地区开展用EGS技术开发深层地热资源的现场试验。澳大利亚地球动力学公司正在位于库帕盆地的世界最大的EGS项目开展试验开发工作。该公司于2013年5月宣布其1MWe的Habano示范厂成功实现EGS发电。澳大利亚十分重视CO<sub>2</sub>-EGS研发,在昆士兰大学投资1830万澳元成立了地热能中心,重点进行相关研发工作。

德国、法国、英国、瑞士等国家在20世纪七八十年代相继开展EGS研究工作,有代表性的是位于德法边界的苏茨项目,该项目已积累了完整的EGS开发经验,成为欧洲EGS示范项目和培训基地。欧盟第六框架(2002—2006)资助了10个EGS项目,欧盟第七框架计划(FP7)、欧盟战略能源技术行动计划(SET-Plan)和欧洲地热能源工业协会开展地热能源关键技术的研发创新的联合资助。

日本和欧美几乎同步开展了EGS研发工作。如1974年启动的阳光项目和1993年的新阳光计划开展了深部地热资源调查、勘探和水热动力学研究工作。近年来,日本政府加大了对EGS的支持力度,如开展全面的地热调查、勘探工作,资助或补贴地热研发和试验研究活动。

土耳其、肯尼亚和印度尼西亚等国家也是主要的地热资源开发利用国家<sup>[5]</sup>。但是,在发展中国国家和新兴经济体中,由于可利用的技术、经济等条件有限,地热资源尚未得到大规模的开发利用。

## 3 中国的优势

我国地热利用以中低温地热(<150℃)开发和

直接利用为主,热能利用总量持续20年世界第一。但是,地热发电发展滞后,目前居世界第18位。基本不具备EGS经验。我国在地热发电及EGS领域的前期投入不足,干热岩勘探、开发示范工程尚未开展,尚未形成国家层面的干热岩技术研发基地和装备条件。在利用二氧化碳作为工质流体的地热利用领域也处于基础研究阶段。

目前,中科院、高等院校、国土资源部门等纷纷展开相关研究,工作主要集中在地热资源勘探与评价、EGS流体与储热岩层的相互作用、换热机理及能量转换机理与技术等方面。中科院是地热资源勘查评价、地热能利用技术的相关研究与开发的单位,率先完成了全国干热岩基础资源评价,并且在EGS技术方面开展了基础研究。总之,中科院在深层地热能开发利用研发上具有综合优势。

#### 4 未来标志性目标或成果

地热是第三大可再生能源资源,目前占全球一次能源供应总量的比例为0.5%,占可再生能源供应的比例为3.9%。在资源禀赋良好地区,地热发电的成本非常具有竞争力。根据美国地热能源协会(GEA)统计<sup>[6]</sup>,全球已并网的地热发电装机容量约11 224

MW。2010年全球地热能发电量是太阳能的2倍。

根据IEA地热路线图报告<sup>[7]</sup>,2011—2050年期间,地热能供热和发电量至少有潜力增加10倍。如果通过一系列行动来鼓励开发未被利用的地热资源和发展新技术,到2050年地热能在全球电力生产和供热中将分别占到3.5%和3.9%(不包括地源热泵),而目前的水平约为0.3%和0.2%。

#### 参考文献

- 1 张越,孙洁,孙静.河南省浅层地热能的开发利用.河南科技,2011(5):73.
- 2 创新2050:科学技术与中国的未来.中国至2050年能源科技发展路线图.北京:科学出版社,2009.
- 3 <http://energy.gov/articles/nevada-deploys-first-us-commercial-grid-connected-enhanced-geothermal-system>.
- 4 <http://newscenter.lbl.gov/feature-stories/2011/08/08/geothermal-co2/>.
- 5 IEA. Tracking Clean Energy Progress. [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Tracking\\_Clean\\_Energy\\_Progress.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Tracking_Clean_Energy_Progress.pdf).
- 6 <http://www.geo-energy.org/pdf/reports/>. 2012. GEA\_International\_Overview.pdf.
- 7 International Energy Agency. 2011. [http://www.iea.org/papers/2011/Geothermal\\_Roadmap.pdf](http://www.iea.org/papers/2011/Geothermal_Roadmap.pdf).

## 石墨烯将成为“后硅时代”的新潜力材料

整理撰稿人:中科院国家科学图书馆武汉分馆先进制造与新材料团队

冯瑞华(E-mail:fengrh@mail.whlib.ac.cn)、万勇

审稿专家:中科院金属所谭若兵研究员

自2004年英国曼彻斯特大学利用“撕胶带法”从石墨中剥离发现石墨烯以来,引

发全球研究热潮,石墨烯被认为是形成纳米尺寸晶体管和电路的“后硅时代”的新潜力



中国科学院

材料。短短几年时间,一项项突破接踵而至,石墨烯产品已出现,产业化之路也露出曙光。

## 1 主要科技内涵及意义

石墨烯是一种由碳原子以  $sp^2$  杂化轨道组成六角型呈蜂巢晶格的单层片状结构新材料。单层薄膜的厚度只有 0.335 nm,把 20 万片薄膜叠加到一起,也只是一根头发丝的厚度<sup>[1]</sup>。正是由于石墨烯的独特结构,使其具有极强的机械强度、超高的导电性、导热性、弹性、气密性等优越性能。室温下石墨烯的强度是钢的 100 倍,电子迁移率是硅的 100 倍,电流密度是铜的 100 万倍<sup>[2]</sup>。

根据摩尔定律,集成电路上可容纳的晶体管数目约每隔 18 个月便会增加 1 倍,性能也将提升 1 倍,但传统硅芯片是有物理极限的。虽然先进工艺可使硅芯片的生命周期延长,但迟早会因为尺寸无法继续缩小而走向终结<sup>[3]</sup>。在硅芯片上蚀刻电路将变得越来越艰难,促使人们寻找替代材料来取代硅芯片的地位。以石墨烯为代表,包括有机分子、碳管纳米、辉钼、III-V 族化合物等在内的硅替代材料,将超越硅的物理极限,造出更小、更快、更强的芯片<sup>[4]</sup>。

## 2 当前世界进展

欧盟、美国、韩国、英国等投入大量资金用于

石墨烯的科研以及商业化研究。2013 年,由瑞典 Chalmers 大学领衔的石墨烯研究项目从欧盟迄今资助经费规模最大的未来新兴技术竞赛中脱颖而出,获得 10 年共 10 亿欧元的经费支持<sup>[5]</sup>。

石墨烯的研究进展如此之快,最重要的原因就是在实验室可以通过相对简单、廉价的途径制得高品质的石墨烯。当前,全球的科研团队在制备方法、性质研究以及应用等方面开展了大量的研究工作。其中,石墨烯低成本、大规模、可重复的制备技术是实现产业化应用的关键,它的突破将带动信息通信、新能源等领域的新技术革命。表 1 为当前主要的制备方法及其存在的局限。此外,分子束外延生长、激光消融等制备方法也有一定的应用<sup>[6]</sup>。

## 3 中国的优势

中国石墨烯 SCI 论文数量位居国际前列,研究水平也进入国际先进行列。石墨烯的制备方法与应用是我国研发和关注的焦点,但还面临较大的挑战。石墨烯相关专利的申请与受理主要集中在美国、日本、中国、韩国以及欧洲。中国与韩国是石墨烯技术领域的后起之秀,近年来专利申请数量增长迅速<sup>[7]</sup>。中科院有许多团队在从事石墨烯研究,在制备方法和应用研究方面陆续取得了一系列成果,有些工作具有国际水平。

表 1 石墨烯主要制备方法及其局限

	制备方法	应用方向	局限
1	机械剥离	研究、原型等	产量和效率低,只是满足实验室需要
2	液相剥离	涂层、复合物、墨水、储能、生物、透明导电层等	有机溶剂、表面活性剂难以完全除去,影响电学性能
3	化学气相沉积(CVD)	涂层、生物、透明导电层、电子、光子等	能耗较大,过程复杂;石墨烯存在缺陷、晶界、夹杂厚层等
4	SiC 外延生长	电子、射频晶体管等	SiC 晶片成本高,制备需高温环境 (> 1 000°C)
5	分子组装	纳米电子等	纯度不高、产率偏低

#### 4 未来的标志性成果

石墨烯在电子学(器件)、光子学(器件)等领域将得到广泛的应用研究。石墨烯材料最先走向市场的应用点可能是透明导电薄膜类产品,触摸屏就是最典型的一个。触摸显示屏、电子纸和有机发光二极管等电子器件需要较低的薄膜电阻和较高的透光率,石墨烯能满足电性能和光性能方面的需求,并且单层透光率达到了 97.7%,成为传统钢锡氧化物的一种良好替代选择。石墨烯还具有出色的柔韧性和化学稳定性,这对于柔性电子器件而言是相当重要的特质。触摸屏、电子纸以及可折叠 OLED 等的石墨烯产品预计在 2015 年前后问市。

利用石墨烯制造晶体管,晶体管的尺寸越小,其性能越好。硅材料在 10 nm 的尺寸上已开始不稳定,而石墨烯可以将晶体管尺寸极限向下拓展到几纳米大小。石墨烯在高频晶体管上的应用仍面临与更成熟的技术如化合物半导体的竞争,因此石墨烯在高频晶体管上的实际使用可能要到 2021 年以后。在逻辑晶体管中,硅技术仍具有一定发展潜力,石墨烯由于没有带隙,若要替代目前的硅技术,可能需到 2020 年。

石墨烯光探测器是研究最活跃的光器件之一。相比半导体光探测器,石墨烯的光谱范围相当广,从红外到紫外都可探测。由于石墨烯过薄,有效探测面积小,使其光吸

收能力较弱,最大响应度很低。考虑锗光探测器的最大工作带宽,石墨烯光探测器可能要到 2020 年左右才具有竞争力。

硅基光调制器的工作带宽很窄,大约仅 50 GHz,而石墨烯能够吸收很广的光谱范围,响应速度极高,能够有效提高光调制器的性能,可实现高于 50 GHz 的工作带宽,相关成果可能要到 2020 年以后<sup>[8]</sup>。

#### 参考文献

- 1 百度百科. Graphene. 2013-08-15. [http://baike.baidu.com/view/1604935.htm?tp=9\\_01](http://baike.baidu.com/view/1604935.htm?tp=9_01).
- 2 滕继濮. 石墨烯:完美材料与未来生活. 科技日报, 2011-12-23, 第 6 版.
- 3 新浪科技. 硅芯片尺寸极限将至:碳纳米管或成替代品. 2013-02-21. <http://tech.sina.com.cn/it/2013-02-21/14508078033.shtml>.
- 4 中科院国家科学图书馆武汉分馆. 替代硅的新型二维半导体材料. 2013-04.
- 5 Europa. Graphene and Human Brain Project win largest research excellence award in history, as battle for sustained science funding continues. 2013-01-28. [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-13-54\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-54_en.htm).
- 6 石墨烯制备与应用路线图. 先进制造与新材料科学研究动态监测快报, 2012, (21): 1-7.
- 7 中科院国家科学图书馆武汉分馆. 石墨烯专利深度分析报告. 2012-02.
- 8 Novoselov K S, Fal'ko V I, Colombo L et al. A roadmap for grapheme. Nature, 2012(490): 192-200.



中国科学院

## 绿色智能制造技术将引发产业全面变革

整理撰稿人:中科院国家科学图书馆武汉分馆先进制造与新材料团队

黄健(E-mail:huangj@mail.whlib.ac.cn)、万勇

审稿专家:中国工程院院士,中科院沈阳自动化所王天然研究员

### 1 主要科技内涵及意义

制造业是国民经济的物质基础和产业主体,是经济高速增长的发动机和国家安全的重要保障,也是科学技术的基本载体,是国民经济和综合国力的重要体现。制造业在国民经济中占有重要地位,无论对发展中国家还是发达国家,它始终是国民经济重要的战略组成部分。

以“绿色”和“智能”为主要发展方向的先进制造技术,是由传统制造技术与信息技术等相关领域技术不断融合产生的,在其快速发展过程中,不断与材料技术、生物技术以及纳米技术等相结合。

以先进制造技术为基础的先进制造业处于产业价值链高端环节,具有高技术含量、高附加值和低能耗、低污染等特征,担负着为国民经济各部门和科学技术的各学科提供装备、工具和检测仪器的重要任务,成为国民经济和科学技术赖以生存和发展的“使能技术”<sup>[1]</sup>。

全面开展智能制造技术研究是发展高端装备制造制造业的核心内容和促进我国从制造大国向制造强国转变的必然。

制造技术信息化带动技术研发过程创新和产品设计方法与工具的创新、管理模式创新、制造模式的创新,实现产品的数字化设计、网络化制造和敏捷制造,快速响应市场变化和客户需求。

制造技术自动化构成高效、高可靠的自动化装备和柔性生产线,将实现自动、柔性和敏捷制造。

制造技术智能化使制造过程具有更完善的判断与适应能力,提高产品质量、生产效率,会显著减少制造过程物耗、能耗和排放<sup>[2]</sup>。

10年后,绝大多数产品将可回收、易拆卸,部件或整机可翻新和循环利用,绿色产品可能成为世界商品市场的主导<sup>[3]</sup>。

### 2 当前世界进展

从全球范围来看,虽然目前知识经济已初见端倪,但包括美国、日本、欧洲等发达国家/地区在内,其主要载体仍是制造业,其在各发达国家的国民经济中仍占有非常重要的地位。特别是在经历了金融海啸之后,西方各国纷纷提出“再工业化”,制造业有回流西方的趋势。美、日、欧等积极制定发展战略、发展规划以及相关配套政策,引导和推进本国先进制造技术及相关行业的健康、快速发展,奋力抢占全球制造业的高端价值链,引领全球制造业的技术进步,并通过生产模式变革和标准制定继续控制整个制造业产业链。

在技术方面,以当前全球范围内不断升温的3D打印为例。3D打印在制造自由度、原材料利用率等方面具有明显优势,尤其适于小批量、定制化、结构复杂的加工制造。3D打印在工业应用和个人消费两个市场均取得了长足发展。医疗器械的定制化需求是3D打印的优势所在,美国借助3D技术打印外骨骼,帮助残疾儿童提高行动能力,让一名两岁女童首次抬起手臂玩耍。航空航天则是最具前景的应用领域之一,如美国航空航天局正在与企业合作开展在微重力环境下的3D打印测试。在消费电子与汽车行业,3D打印技术主要用于设计原型制造及模具开发。通用、现代、宝马等汽车厂商已将3D打印技术应用于新车研发过程之中<sup>[4]</sup>。

### 3 中国的优势

2010 年我国制造业产出占世界的比重为 19.8%，成为全球制造业第一大国<sup>[5]</sup>。经过几个“五年计划”的实施，我国制造业得到飞速发展，取得了一大批相关的基础研究成果和长期制约我国产业发展的先进制造技术；攻克了一批长期严重依赖并影响我国产业安全的核心高端装备；针对绿色制造关键共性技术开展了研究及应用示范工作；建设了一批相关的国家级研发基地；培养了一大批长期从事相关技术研究开发工作的高技术人才。在培育形成战略性新兴产业群方面，我国与主要发达国家基本同步，有望在信息感知空间的建立技术、海量制造信息处理技术、泛在信息感知空间下制造业信息化和自动化技术、人-机行为认知及交互技术等领域率先取得突破<sup>[6]</sup>。

中科院在绿色智能制造领域具有一定的实力，在沈阳、北京、重庆、宁波、合肥等地设有相关研究机构。其中，沈阳自动化所是我国机器人事业的摇篮，是“机器人技术国家工程研究中心”、“机器人学国家重点实验室”等 9 个国家及省部级重点实验室和工程中心的依托单位<sup>[6]</sup>。过程工程所定位于大规模资源转化利用及替代的绿色过程的基础与应用研究<sup>[7]</sup>。重庆绿色智能技术研究院在电子信息、先进制造、生态环境 3 个领域进行了科技布局<sup>[8]</sup>。

### 4 未来的标志性目标或成果

在智能制造领域，人-机共融的智能制造模式将是智能制造技术发展的基本特征，云计算和海计算技术将引领制造信息处理

新模式，泛在信息感知将为智能制造提供新的信息支撑，平行管理与可视化制造技术将为制造提供新的数字化手段，制造服务创新将为制造业升级转型提供新途径。

在绿色制造领域，面向大规模矿产、油气、生物质资源转化利用的过程制造业绿色化技术升级，在物质转化的绿色过程与工程学方面取得创新突破，在新反应介质替代、高效催化、过程强化、二次资源循环等重点方向大幅提高资源利用率、降低能耗、削减废弃物排放。产品绿色设计和全生命周期评价体系广泛应用，增材制造(3D 打印技术)及再制造得以普及。

#### 参考文献

- 1 国家科技部. 智能制造科技发展“十二五”专项规划. 2012.
- 2 国家科技部. 绿色制造科技发展“十二五”专项规划. 2012.
- 3 电气自动化技术网. 3D 打印应用领域拓展消费需求爆发. 2013-07-10. <http://www.dqjsw.com.cn/xinwen/xingyeyanjiu/124212.html>.
- 4 人民网. 我国成为全球制造业第一大国. 2012-09-05. <http://cppcc.people.com.cn/n/2012/0905/c34948-18919429.html>.
- 5 中国科学院. 科技发展新常态与面向 2020 年的战略选择. 北京: 科学出版社, 2013.
- 6 中国科学院沈阳自动化研究所. 机构简介. 2013-08-15. <http://www.sia.cas.cn/gkjj/jgjj/>.
- 7 中国科学院过程工程研究所. 研究所简介. 2013-08-15. <http://www.ipe.ac.cn/gkjj/jgjj/>.
- 8 中国科学院重庆绿色智能技术研究院. 机构简介. 2013-08-15. <http://www.cigit.cas.cn/jgk/jgjj/>.



中国科学院

## 基于干细胞的新的生命繁衍方式将会出现

整理撰稿人:中科院上海生命科学信息中心人口健康与生物医药团队

王玥(E-mail:wangyue@sibs.ac.cn)、许丽、徐萍

审稿专家:中科院动物所周琪研究员

干细胞以其无限增殖和分化能力在疾病治疗与药物研发等领域展现出巨大的应用潜力,尤其是在目前无法治愈的疾病、组织器官构建以及修复机体损伤等方面的应用。

近年来,不孕不育的发病率逐年提升,且很多患者无法利用现有方法治愈。干细胞能否成为这种疾病的潜在疗法便成为科研人员关注的新课题。研究人员希望能够在体外诱导干细胞分化为生殖细胞,通过这种人工的方法帮助患者获得健康的精子或卵子,该领域的突破或可促进新的生命繁衍方式出现。

### 1 国际研究现状

在干细胞的选择上,成体干细胞大都只能分化为其所在组织的特定细胞类型,而研究人员近年来发现的生殖干细胞虽然能够向生殖细胞分化,但相关研究(尤其是雌性生殖干细胞)仍处于初期阶段,还无法在体外大量开展后续研究。胚胎干细胞理论上可以在体外分化为机体所有的组织细胞,包括原始生殖细胞(primordial germ cell, PGC),而PGC进一步分化便能够成熟为精子或卵子,因此胚胎干细胞成为开展相关研究最理想的干细胞类型。

诱导胚胎干细胞分化为生殖细胞在多年前已有科研人员开始尝试,并获得了一系列突破性的成果。2003年,美国宾夕法尼亚大学和日本三菱生命科学研究所的两个科研团队先后报道了利用小鼠胚胎干细胞构建出卵细胞<sup>[1]</sup>和精子细胞<sup>[2]</sup>,这是国际上首次报道利用多能干细胞构建出雌性和雄性生殖细胞。对体外分化生殖细胞受精能力的

首次验证是在2004年,美国哈佛大学医学院的研究团队证实了小鼠“人造精子”的受精能力<sup>[3]</sup>。2006年,德国哥廷根大学和英国纽卡斯尔大学的一个研究小组利用小鼠胚胎干细胞制造出“人造精子”,并最终成功培育出7只小鼠后代,这一研究证明利用人工构建的生殖细胞可以培育出后代,不过这些小鼠均在5天—5个月内(小鼠的正常寿命2年左右)出现健康问题而夭折<sup>[4]</sup>,因此培育出正常后代成为该领域研究的瓶颈问题。2011年,日本京都大学和日本科学技术振兴机构(JST)的一个研究团队终于打破了这一技术瓶颈,他们将小鼠的胚胎干细胞和诱导多能干细胞(iPSC)转化为原始生殖细胞,并利用由此得到的精子培育出正常的小鼠幼崽,且这些小鼠后代在存活1年后仍然保持良好的生长状态,并繁殖出了下一代<sup>[5]</sup>。

尽管上述研究证实了多能性干细胞可在生成功能性雄性生殖细胞,但功能性雌性生殖细胞的构建领域仍是空白。2012年,同样是日本京都大学和JST的研究团队再次获得突破,他们利用小鼠胚胎干细胞和iPSC同时构建出具有生育能力的卵细胞,将两种卵细胞在体外受精后移植入雌鼠的体内后,均孕育出健康的后代<sup>[6]</sup>,该成果入选了*Science*杂志当年十大科学突破。

经过十几年的科研工作,小鼠多能干细胞在体外生成功能性生殖细胞的潜力获得证实,对于生殖细胞发育机理的基本认识也取得了飞跃。如果相关技术能够应用于人类,通过人工构建精子和卵子,将为不孕不育患者带来福音,可能会成为新的生命繁衍方式。

## 2 中国的发展现状

我国尽管没有通过诱导干细胞分化构建生殖细胞的领域开展更多的研究,但在生殖相关干细胞领域已开展了大量的研究,且取得了一系列突破性的成果。2009年,上海交通大学的一个科研团队从成年小鼠卵巢中分离获得了雌性生殖干细胞<sup>[7]</sup>,驳斥了一直以来存在的“女性一生的卵子数量在胎儿期已确定”的理论,尽管关于该理论目前仍存在一些质疑,但这无疑也开创了人们对于生命奥秘探索的新思路。2012年,中科院的两个研究团队再次在该领域获得突破,通过核移植技术,构建出了孤雄单倍体胚胎干细胞系,并证实了这些细胞具有精子的特性,能够代替精子使卵细胞受孕,并孕育出健康的小鼠后代<sup>[8,9]</sup>。相比通过干细胞分化构建的生殖细胞,该“人造精子”具有能够在体外连续传代的优势,可以在体外对其进行一系列操作,从而具有更广泛的用途。

上述研究成果同样为生殖相关疾病的治疗奠定了基础。此外,我国在2013年还将生殖干细胞相关领域(精原细胞向生殖干细胞和生殖细胞转化的机制研究)作为国家重大科学研究计划进行立项,显示出国家对相关领域的重视,这也必将推动我国在该领域取得更大进步。

## 3 问题及展望

尽管该领域的研究具有巨大的应用前景,但目前完成的研究仅仅是一个开端。首先,在后续研究中,除了还需要开展大量的研究验证相关技术的稳定性和缺陷外,一个亟待解决的技术瓶颈是,如何在体外完成原始生殖细胞向生殖细胞转变中涉及的减数分裂过程。只有实现对干细胞分化全过程的体外操控,才能够确保最终获得的生殖细胞的质量。在目前开展的研究中,体外诱导

仍仅限于将胚胎干细胞诱导为原始生殖细胞,而接下来向生殖细胞的分化过程则需要通过将其移植入睾丸或卵巢中完成。

其次,在面对将相关技术应用于人类这一“终极目标”时,在小鼠体内研发成功的技术可能并不完全适用,很可能出现一系列新的问题有待科研人员解决。目前,针对人类的相关研究中获得的突破性成果较少,仅斯坦福大学的研究团队于2009年在*Nature*上发表了一项突破性成果,利用人类胚胎干细胞在体外培育出人工精子<sup>[10]</sup>。

最后,即使能够获得稳定成熟的技术,其中涉及的“超乎想象”的伦理问题将成为其向人类应用发展的最大障碍。例如,如果利用女性自身的细胞便可构建精子,那么意味着一个女性个体可以自行生育,而不需要男性的参与;此外,如果最终可以完全利用“人造精子”与“人造卵子”进行人工受精,那么意味着可以完全在实验室里构建出“人造婴儿”。这一切无疑都打乱了生命形成的正常过程。

因此,在科学合理的监管下,如果上述技术瓶颈获得突破,未来干细胞将在生殖领域发挥巨大作用。

### 参考文献

- 1 Karin Hübner, Guy Fuhrmann, Lane K Christenson et al. Derivation of Oocytes from Mouse Embryonic Stem Cells. *Science*, 2003, 300(5623): 1251-1256.
- 2 Yayoi Toyooka, Naoki Tsunekawa, Ryuko Akasu et al. Embryonic stem cells can form germ cells in vitro. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(20): 11457-11462.
- 3 Niels Geijsen, Melissa Horoschak, Kitai Kim et al. Derivation of embryonic germ cells and male gametes from embryonic stem cells. *Nature*, 2001, 427: 148-154.
- 4 Karim Nayernia, Jessica Nolte, Hans W Michelmann et al. In Vitro-Differentiated Embryonic Stem Cells Give



中国科学院

- Riseto Male Gametes that Can Generate Offspring Mice. *Developmental Cell*,2006,11(1): 125-132.
- 5 Katsuhiko Hayashi, Hiroshi Ohta, Kazuki Kurimoto et al. Reconstitution of the Mouse Germ Cell Specification Pathway in Culture by Pluripotent Stem Cells. *Cell*,2011, 146(4): 519-532.
- 6 Katsuhiko Hayashi,Sugako Ogushi1,Kazuki Kurimoto et al. Offspring from Oocytes Derived from in Vitro Primordial Germ Cell-like Cells in Mice. *Science*,2012, 338(6109): 971-975.
- 7 Kang Zou, Zhe Yuan, Zhaojuan Yang et al. Production of offspring from a germline stem cell line derived from neonatal ovaries. *Nature Cell Biology*,2009,11:631-636.
- 8 Hui Yang,Linyu Shi,Bang-An Wang et al. Generation of Genetically Modified Miceby Oocyte Injection of AndrogeneticHaploid Embryonic Stem Cells. *Cell*,2012, 149: 605-617.
- 9 Wei Li, Ling Shuai, Haifeng Wan et al. Androgenetic haploid embryonic stem cells produce live transgenic mice. *Nature*, 2012.9.30(online).
- 10 Kehkooi Kee, Vanessa T Angeles, Martha Flores et al. Human DAZL, DAZ and BOULE genes modulate primordial germ-cell and haploid gamete formation. *Nature*, 2009, 462(7270): 222-225.

## 个体化诊断和治疗技术将取得突破

整理撰稿人:中科院上海生命科学信息中心人口健康与医药领域团队

李贞祺(E-mail:lizhenqi@sibs.ac.cn)、徐萍、于建荣

审稿专家:中科院上海高研院吴家睿研究员

当前,基于系统生物学的个体化诊疗技术正在迅速发展,对肿瘤等重大慢性疾病的发生过程进行准确和及时的监测,能够对患者进行精确的疾病分子分型和个体化治疗,并推动医学模式由疾病治疗为主的临床医学向早期监测和干预为主的健康科学转变。

### 1 科学内涵及意义

个体化医疗的概念最早于20世纪70年代提出,90年代末期,针对肿瘤进行靶向治疗的个体化医疗正式出现。1997年,*Science*把个体化治疗定义为“根据患者的基因组成使用药物”。21世纪初,组学(omics)技术的发展极大地推动了个体化诊疗的进步。随着关键技术的突破与科学研究的深入,人们对疾病诊断和药物治疗有了更深刻的了解,由此诞生了利用基因组多态性分析、遗传药理学和药物基因组学研究成果进行个体化诊断和医疗的技术。

研究表明,癌症、糖尿病、神经退行性疾病等重大慢性疾病的发生是由多基因和外部环境因素影响相互作用造成的,以往“一刀切”的治疗方式导致药物有效性差、疾病治愈率低,而基于系统生物学发展起来的个体化医疗则以对疾病复杂性机理的深刻认识为基础,可通过鉴定和检测个体的遗传易感性,对疾病进行风险预测和诊断,进而选择最优的方案进行预防和治疗,这样就形成“量体裁衣”式的治疗方式,大大提高了治疗效果。个体化诊断与治疗技术在新药开发、医学诊断、临床研究方面具有重要的价值,有助于帮助研究人员提出更有效的诊疗手段,不仅能让医药界获得良好的社会 and 经济效益,也更有利于减轻公众疾病负担,提高公众的健康和 生活质量。

### 2 国际发展现状

(1)相关政策规划。个体化医疗已成为各国

生物医药研究的重点关注领域,美国NIH资助计划、英国生命科学战略、俄罗斯至2025年医学科技发展战略、加拿大“eHealth”计划等均将个性化医学作为重点发展领域之一;此外,欧洲科学基金会(ESF)在2012年12月发布了欧洲公民个性化医学的报告,对欧洲个性化医学发展进行了宏观规划<sup>[1]</sup>;英国医学研究理事会和加拿大政府也对个性化医学项目进行资助,分别投入1 060万英镑和1 370万美元<sup>[2]</sup>;英国的国家医疗服务系统还计划推广一项基因组测序计划,优先为癌症、罕见病和传染病患者进行基因组测序,从而为这些疾病的个性化治疗方案奠定基础。

(2)主要研究方向。①根据不同患者的特征调整治疗方案。近年来由于基因组测序技术的发展,使医生能够按照临床有效的方式对同一疾病的患者进行分类。通过一系列新的基因分子标志物,来确定对某些治疗方法和治疗药物敏感的特定疾病亚型。这些标志物,就是新出现的基因分子检测的基础,可用于评估患者的疾病风险,确定哪些患者适用某种药物,以及根据患者代谢反应来确定适合的用药剂量等等。例如,可以评价特定患者使用特定治疗药物的可能效果;确定哪些患者可能使用某种药物或某个药物的不同剂量时,将发生严重副作用;对治疗效果差异较大的药物,确定其最佳剂量;评估疾病程度和进展;探索临床效果的替代措施;确定哪些患者能够受益于某些预防性措施。②靶向性治疗药物。利用靶向性治疗药物作用于人体特定的生理机制,治疗基因变异的疾病。这些治疗药物,都是针对单一基因的变异,因此对单基因疾病最有效。由于基因组技术可以确定疾病的新标志物,新的靶向治疗方法得到蓬勃发展。尤其是靶向治疗药物,与可以确定合适患者的

基因诊断检测联合应用。而当前的疾病大多为多基因疾病,或称之为复杂疾病(例如癌症、神经退行性疾病和糖尿病等),这就需要靶向性治疗药物进一步改善针对复杂疾病的疗效。

(3)产品与市场。DNA测序技术的发展、政府的支持重视、学术研究的快速发展、投资力度的不断加大以及临床数据的积累驱动着个性化诊疗的商业化步伐,诞生了多项个性化诊疗产品。从第一个个性化药物——曲妥珠单抗(赫赛汀®)于1998年上市以来,美国食品药品监督管理局(FDA)已列出100多种个性化药物,在这些药物中癌症是关注的焦点,其中以乳腺癌药物为主;此外,心血管疾病、传染病和呼吸系统疾病近年来也获得了越来越多的关注。2013年6月,美国FDA又批准了雅培公司研发的首个丙型肝炎病毒的基因检测试剂,用于分辨丙型肝炎7种不同的基因型,从而帮助医疗人员确定最合适的治疗方法。

市场调研机构BCC Research的一份研究报告指出,全球个性化医疗的技术市场预计会从2009年的144亿美元增加到2014年的292亿美元,年增长率达15.2%<sup>[3]</sup>;根据PwC咨询公司预测,个性化医疗2015年仅在美国就可达到420亿美元,目前个性化医疗市场以10%的年复合速率增长,是制药公司和诊断技术公司关注的热门领域<sup>[4]</sup>。

### 3 中国研究进展

近年来我国在个性化医学领域也取得了重大进展:2012年末,多机构联合完成了肝脏疾病谱,涵盖了103种肝病,首次明确了我国各种肝病的临床病理特点,并对我国的肝病种类进行了逐级分层筛选,从而为肝病的个性化治疗奠定了基础;2012年,中山大学肿瘤防治中心马骏教授团队联合四川



中国科学院

大学华西医院,发现一组由5个microRNA构成的分子标签能较好预测治疗效果,为鼻咽癌的个体化治疗奠定了基础;2013年1月8日,高精度HBV-DNA检测技术能够最大程度地抑制或消除病毒复制,是目前我国乙肝个体化治疗的最新成果。中科院在个体化诊断与治疗领域开展了多项研究,取得了丰硕成果,主要体现在光控释药技术、微流控技术、单细胞测序技术、诱导多能干细胞转化技术等方面。2013年4月,中科院战略性先导科技专项“个体化药物——基于疾病分子分型的普惠新药研发”进入组织实施阶段,该项目将有助于推动我国个体化药物研究的发展。

#### 参考文献

1 Personalised Medicine for the European Citizen-Towards more

precise medicine for the diagnosis, treatment and prevention of disease. European Science Foundation.

2 MRC invests over£10m in stratified medicine research. Medical Research Council.

3 <http://www.bccresearch.com/market-research/pharmaceuticals/personalized-medicine-phm044b.html>

4 PwC analysis. Based on information aggregated from Kalorama Information, Datamonitor, Frost & Sullivan, Roche, Roth Capital Partners, Natural Marketing Institute, Nutrition Business Journal, Packaged Facts, National Health Statistics Report, Mintel, Feedback Research Services, International Spa Association, IDC, Deloitte, American Telemedicine Association, Visiongain, RNCOS. Ranges or mid-points were used for those markets where estimates have varied particularly widely.

## 对肿瘤等重大慢性病的早期干预与治疗有望实现

整理撰稿人:中科院上海生命科学信息中心人口健康与生物医药团队

王玥(E-mail:wangyue@sibs.ac.cn)、许丽、于建荣

审稿专家:中科院上海高研院吴家睿研究员

干细胞在疾病治疗领域潜力巨大,目前开展的临床试验涵盖了多种疾病,包括细菌与真菌疾病,行为与精神疾病,血液与淋巴疾病,癌症和其他肿瘤,消化系统疾病,心脏与血液疾病,免疫系统疾病,口腔、牙齿疾病,肌肉、骨骼和软骨疾病,神经系统疾病,生殖相关疾病等。

### 1 干细胞有助肿瘤疾病的诊断与治疗

肿瘤是威胁人类生命的主要疾病之一,由于其发生、发展机理缺乏系统的认识,因此,尚无彻底根治的有效方法。随着干细胞研究的不断深入,研究人员发现一些肿瘤细胞与干细胞的特征非常相似,美国斯坦福大学 Weissman 教授于2001年首次明确提出了肿瘤干细胞(或称为癌症干细胞, cancer stem cell)的概念<sup>[1]</sup>。

近几年肿瘤干细胞研究得到了更多的关注,各国在干细胞研究规划中均对该领域进行了布局。美国NIH持续资助肿瘤干细胞研究,2010—2012财年,每个财年的资助经费均维持在3000万美元以上。加拿大在2007年还特别建立了癌症干细胞协会(Cancer Stem Cell Consortium, CSCC),2012年,该协会资助开展了一项大规模肿瘤干细胞项目,旨在开发基于肿瘤干细胞的肿瘤治疗方法。

在各国政策规划的大力支持下,相关研究得以大量开展,主要集中在基础研究领域,包括识别肿瘤干细胞特异性标志物,实现对肿瘤干细胞的识别、分离及建系;研究肿瘤干细胞参与肿瘤发生、复发和转移的作用机制。此外,在利用肿瘤干

细胞相关靶点,开发新型抗肿瘤药物及诊断技术方面,也已经开展了少量研究。

(1)肿瘤干细胞研究有助于了解肿瘤疾病发生、发展的机理。已在多种实体瘤中发现了肿瘤干细胞,并证实了肿瘤干细胞与肿瘤疾病发生、复发和转移之间存在着密切的关系。因此,对肿瘤干细胞进行深入探索,将有助于获得对肿瘤疾病的系统了解,肿瘤干细胞的标志物和调控通路中的关键靶点将可用于新型抗癌药物的研发。

目前已陆续确认或发现一些类型的肿瘤中存在肿瘤干细胞,且证实其在相关肿瘤的发生发展中发挥作用。2012年8月,同时在 *Nature* 和 *Science* 上发表的3篇文章确认了皮肤癌<sup>[2]</sup>、肠癌<sup>[3]</sup>和脑癌<sup>[4]</sup>中肿瘤干细胞的存在;此后,德国科学家确认了乳腺癌中存在一类能够启动肿瘤细胞转移的肿瘤干细胞<sup>[5]</sup>;美国科学家首次发现了骨癌干细胞<sup>[6]</sup>。日本的一个研究团队还首次建立了结肠癌干细胞的稳定细胞系,为结肠癌的治疗开发奠定了基础<sup>[7]</sup>。

在确认了肿瘤干细胞在多种肿瘤疾病中发挥作用的基础上,科研人员进一步对相关作用机制进行了探索。2012年,瑞士科学家发现肿瘤在转移中需要肿瘤干细胞的参与,而能否成功转移则与其所处的微环境有关<sup>[8]</sup>;荷兰科研人员还发现了能够通过抑制肠干细胞生长从而抑制肠腺瘤的基因<sup>[9]</sup>。

(2)开发基于肿瘤干细胞的肿瘤治疗技术。基于肿瘤干细胞基础研究取得的成果,科研人员已开始开发基于肿瘤干细胞的肿瘤治疗技术,并获得了初步成果。2012年,美国科研人员将小鼠肿瘤干细胞制成肿瘤疫苗,并确认了肿瘤干细胞的免疫原性,能够刺激小鼠体内产生肿瘤抗体<sup>[10]</sup>。来自加

拿大的科研人员还筛选出一种针对肿瘤干细胞的癌症治疗药物,通过促进肿瘤干细胞的分化,削弱其自我更新能力,从而抑制肿瘤的进一步生长和转移<sup>[11]</sup>。此外,一系列靶向肿瘤干细胞的疗法也已进入临床试验。粗略统计,相关临床试验约有200项,其中以针对白血病干细胞(leukemia stem cell)的疗法居多,占到半数以上<sup>①</sup>。

## 2 干细胞在退行性及代谢性疾病治疗中的应用

帕金森病等神经退行性疾病和糖尿病等代谢性疾病已成为危害人类健康的主要疾病。目前,这类疾病尚无有效的治愈方法,而只能采取一些控制措施延缓病情的发展。

这些疾病的病因多为某些功能细胞发生病变,无法发挥正常功能,如帕金森病为神经系统中的某些神经细胞受损而造成,糖尿病则为胰岛中的 $\beta$ 细胞发生功能障碍,无法正常分泌胰岛素所致。理想情况下,替换这些受损的细胞,使其恢复正常功能就能够治愈这些疾病,而干细胞向组织细胞分化的潜能恰好能够满足这一需求,从而为这些疾病的治疗带来希望。

除了通过干细胞移植直接用于治疗上述疾病外,利用多能干细胞,尤其是iPSC构建疾病模型,用于疾病相关机理研究及药物筛选也是重要的应用领域之一,相关研究有助于解决无法从患者体内获得足够细胞开展病理研究的弊端,尤其是涉及脑部疾病的研究与治疗。

(1)通过干细胞移植治疗退行性疾病和代谢性疾病。围绕干细胞移植治疗神经退行性疾病和代谢性疾病,科研人员已开展了

① 数据来源:美国ChinicalTrials.gov数据库



一系列尝试,并在实验室研究和临床试验中均获得了积极的成果。

2011年,美国科研人员将人类胚胎干细胞转化为能够产生多巴胺的神经元,将其移植到大鼠和小鼠的大脑中后,消除了大鼠和小鼠的帕金森病的症状<sup>[12]</sup>;2012、2013年,日本<sup>[13]</sup>和美国<sup>[14]</sup>的两个研究团队同样利用人类胚胎干细胞制造出能产生多巴胺的神经元,并证实在患帕金森病的猴子体内能够发挥正常功能。在利用干细胞治疗糖尿病方面,2012年,加拿大和美国的科研人员通过移植人类胚胎干细胞使小鼠恢复胰岛素的分泌功能<sup>[15]</sup>;2013年,美国科学家利用药物结合干细胞移植实现了对小鼠I型糖尿病的治疗<sup>[16]</sup>。

(2)利用iPSC建立疾病模型,研究疾病机理。在利用iPSC构建疾病模型方面,以神经退行性疾病的研究最受关注。2012年,美国科研人员利用iPSC构建出帕金森患者的神经元,并发现不同帕金森患者的基因变异位点存在差异<sup>[17]</sup>;另一个研究团队则利用iPSC构建出阿尔默兹海默氏症(AD)的疾病模型,并对AD的发病机理进行了观察<sup>[18]</sup>。

### 3 中国的发展现状及未来趋势

2013年,我国“973”计划和重大科学研究计划中对肿瘤干细胞进行了专项规划,重点关注肿瘤干细胞的基础生物学研究。中科院干细胞与再生医学战略性先导专项中也对相关领域进行了布局,显示出我国对该领域的重视。

据不完全统计,我国2012年发表肿瘤干细胞相关论文近300篇<sup>②</sup>,仅次于美国位居国际第2位,显示出我国已在该领域具备一定的实力。2013年,来自中科院动物所和北京大学的科研人员共同揭示了大肠癌转移中癌症干细胞的作用机制,并提供了治疗转移性大肠癌的潜在治疗靶点<sup>[19]</sup>;第三军医大学的科研人员揭示了肺癌干细胞自我更新和致瘤潜能维持的信号机制<sup>[20]</sup>。

在肿瘤干细胞的应用研究方面,我国仅开展

了少量肿瘤干细胞临床试验,Clinical Trials数据库收录了由华山医院开展临床试验,利用胶质瘤干细胞制备针对恶性胶质瘤的疫苗,目前该试验已经进入临床II期。

在神经退行性疾病的干细胞研究方面,我国也取得了一系列突破性成果。2012年,中科院生物物理所的科研人员首次结合iPSC和基因靶向修饰技术,揭示了帕金森病神经干细胞随着衰老过程而发生的退行性病变,为预防和治疗帕金森病提供了新的潜在靶点<sup>[21]</sup>。

#### 参考文献

- 1 TannishthaReya, Morrison Sean J, Clarke Michael F et al. Stem cells, cancer, and cancer stem cells. *Nature*,2001,414:105-111.
- 2 Gregory Driessens, Benjamin Beck, AmélieCaauwe et al. refining the mode of tumour growth by clonal analysis. *Nature*,2012.8.1 online.
- 3 Arnout G Schepers, Hugo J Snippert, Daniel E Stange et al. Lineage Tracing Reveals Lgr5+ Stem Cell Activity in Mouse Intestinal Adenomas. *Science*,2012,337,6095:730-735.
- 4 Jian Chen, Yanjiao Li, Tzong-Shiue Yu et al. A restricted cell population propagates glioblastoma growth after chemotherapy. *Nature*,2012.8.1 online.
- 5 IrèneBaccelli, Andreas Schneeweiss, Sabine Riethdorf et al. Identification of a population of blood circulating tumor cells from breast cancer patients that initiates metastasis in a xenograft assay. *Nature Biotechnology*, 2013,31:539-544.
- 6 Wentian Yang, Jianguo Wang, Douglas C. Moore et al. Ptpn11 deletion in a novel progenitor causes metachondromatosis by inducing hedgehog signaling. *Nature*,2013.7.17 online.
- 7 ShintaKobayash,Hisafumi Yamada-Okabe, Masami Suzuki et al. LGR5-Positive Colon Cancer Stem Cells Interconvert with Drug-Resistant LGR5-Negative cells and are Capable of Tumor Reconstitution. *Stem Cells*, 2012,30(12):2631-2644.
- 8 IlariaMalanchi,Albert Santamaria-Martinez,Evelyn Susanto et al. Interactions between cancer stem cells and their niche govern metastatic colonization. *Nature*,481: 85-89.

② 数据来源:SCI数据库

- 9 Bon-Kyoung Koo, Maureen Spit, Ingrid Jordens et al. Tumour suppressor RNF43 is a stem-cell E3 ligase that induces endocytosis of Wnt receptors. *Nature*,2012,488: 665-669.
- 10 NingNing, Qin Pan, Fang Zheng et al. Cancer Stem Cell Vaccination Confers Significant Antitumor Immunity. *Cancer Research*, 2012,72:1853.
- 11 EleftheriosSachlos, Ruth M. Risueño, Sarah Laronde et al. Identification of Drugs Including a Dopamine Receptor Antagonist that Selectively Target Cancer Stem Cells. *Cell*,2012, 149(6) : 1284-1297.
- 12 Sonja Kriks, Jae-Won Shim, JinghuaPiao et al. Dopamine neurons derived from human ES cells efficiently engraft in animal models of Parkinson's disease. *Nature*,2011, 480:547-551.
- 13 Daisuke Doi,AsukaMorizane,Tetsuhiro Kikuchi et al. Prolonged Maturation Culture Favors a Reduction in the Tumorigenicity and the Dopaminergic Function of Human ESC-Derived Neural Cells in a Primate Model of Parkinson's Disease. *Stem Cells*,2012,30(5) :935-945.
- 14 Dustin R. Wakeman, Stephanie Weiss, John R. Sladek et al. Free Content Survival and Integration of Neurons Derived from Human Embryonic Stem Cells in MPTP Lesioned Primates. *Cell Transplantation*,2013,4.2 online.
- 15 AlirezaRezania,Jennifer E. Bruin,Michael J. Riedel et al. Maturation of Human Embryonic Stem Cell-Derived Pancreatic Progenitors Into Functional Islets Capable of Treating Pre-existing Diabetes in Mice. *Diabetes*, 2012, 61:2016-2029.
- 16 Xiaoxiao Wan,F. BetulGuloglu,Amie M. VanMorlan et al. Recovery From Overt Type 1 Diabetes Ensues When Immune Tolerance and  $\beta$ -Cell Formation Are Coupled With Regeneration of Endothelial Cells in the Pancreatic Islets. *Diabetes*,2013,62(8) : 2879-2889.
- 17 Oliver Cooper,HyemyungSeo,ShaidaAndrabi et al. Pharmacological Rescue of Mitochondrial Deficits in iPSC-Derived Neural Cells from Patients with Familial Parkinson's Disease. *Science Translational Medicine*, 2012,4(141) : 141ra90.
- 18 HouboJiang, Yong Ren, Eunice Y. Yuen et al. Parkinson controls dopamine utilization in human midbrain dopaminergic neurons derived from induced pluripotent stem cells. *Nature Communications*,2012,3:668.
- 19 Lei Du,GuanhuaRao,Hongyi Wang et al. CD44-Positive Cancer Stem Cells Expressing Cellular Prion Protein Contribute to Metastatic Capacity in Colorectal Cancer. *Cancer Research*,2013, 73: 2682.
- 20 ChuanXu, Dan Xie, Shi-Cang Yu et al.  $\beta$ -Catenin/POU5F1/SOX2 Transcription Factor Complex Mediates IGF-I Receptor Signaling and Predicts Poor Prognosis in Lung Adenocarcinoma. *Cancer Research*, 2013,73:3181.
- 21 Guang-Hui Liu,Jing Qu,Keiichiro Suzuki et al. Progressive degeneration of human neural stem cells caused by pathogenic LRRK2. *Nature*,2012,491:603-607.

## 分子模块设计育种科技将创造新一代农业生物品种

整理撰稿人:中科院国家科学图书馆总馆现代农业科技情报研究团队

杨艳萍(E-mail: yangyp@mail.las.ac.cn)、袁建霞、董瑜

审稿专家:中科院遗传与发育生物学所薛勇彪研究员

近年来,随着生命科学、信息技术在农业领域的渗入和迅猛发展,世界各国都非常重视利用分子标记辅助选择和转基因等育种技术来提高农产品产量,确保粮食安全和



中国科学院

抢占现代农业科技前沿制高点。然而,由于动植物的重要农艺(经济)性状都是由多个DNA为基因控制的复杂性状,其基因调控网络常呈现“模块化”的特征,现有的分子育种技术对性状改良的范围和空间有限,不能满足复杂性状分子设计育种目标的需求,因此未来的发展方向是多基因控制、多目标嵌入的分子模块育种<sup>[1]</sup>。基于上述认识,中科院科学家于2008年提出了“分子模块设计育种”的新型育种理念,以期建立面向未来的新一代生物育种技术。

## 1 科学内涵及意义

分子模块设计育种是一种以组学、分子生物学、系统生物学、合成生物学、计算生物学的发展为基础,以培育动植物新品种为目标导向的新型育种理论和技术体系,主要包括3个步骤:(1)发掘和解析分子模块,即运用分子生物学、基因组学和系统生物学等前沿生物学研究的最新成果,对控制农业生物复杂性状的重要基因或QTLs及其等位变异进行功能研究,解析功能基因及其调控网络的可遗传操作的功能单元;(2)阐明分子模块耦合机理,采用计算生物学和合成生物学等手段将上述模块有机耦合,系统发掘分子模块互作对复杂性状的综合调控潜力,并开展理论模拟和功能预测,实现分子模块群与遗传背景及区域环境三者的有机协调统一,发挥分子模块群对复杂性状最佳的非线性叠加效应;(3)在全基因组水平上进行多模块优化组装,实现复杂性状的定向改良。在此基础上,建立新一代超级品种培育的系统解决方案和育种新技术,培育新的“设计型”动植物品种<sup>[2-4]</sup>。

分子模块设计育种是生命科学前沿科学问题与育种实践的有机结合,将推动分子设计育种的重大理论和技术突破,引领育种技术革命的新方向。分子模块育种创新体系的建立,将有助于提升我国动植物育种的技术水平,培育出一批高产、优质、稳产和高效的动植物新品种,推动我国生物

育种战略性新兴产业的发展。这对提高我国农业综合生产力、增强农产品国际竞争力以及保障我国粮食安全有着非常重要的战略意义。

## 2 国内外研究进展

分子模块设计育种尚处于起步阶段,大量研究主要集中在重要基因或QTL及其等位变异的挖掘等前期基础工作上。国内外研究人员已在多种重要动植物中定位和克隆多个控制高产、优质、抗逆、营养、高效等重要性状的基因或QTL<sup>[3,5,6]</sup>。相关的育种模拟工具也日益成熟并在育种中应用,可模拟复杂遗传模型和育种的计算机软件QuLine、QuHybrid和QuMARS相继问世,并已用于不同育种方法的比较研究中<sup>[5]</sup>。

虽然现阶段尚未实现真正通过预先设计进行复杂性状改良的品种培育,但近年来很多重要成果与重大技术发明均表现出了模块化功能的特征,如在小麦中导入黑麦1BL/1RS染色体置换片段,该天然育种模块的应用已经培育出了大量高产抗病新品种;水稻理想株型基因IPA1、水稻粒宽基因GW8及其miRNA156关系的阐明,为水稻产量的大幅度(>10%)提升奠定了基础;利用银鲫雌核生殖和两性生殖双重生殖方式培育出的异育银鲫“中科3号”,即是一个新的核质杂种克隆品种,其平均增产达20%以上<sup>[7]</sup>。

## 3 中国的优势

我国已在分子模块设计育种领域进行了前期部署,“973”计划和“863”计划均设立了分子设计育种项目,并开展了相关工作<sup>[8,9]</sup>。中科院也先后组织实施了“小麦、水稻重要农艺性状的分子设计及新品种培育推广”重大项目和“分子模块设计育种创新体系”战略先导专项。这些项目的实施为我国凝聚了一大批国际知名科研力量,完善了相关学科布局,为进一步的研究工作奠定了坚实的基础。

我国在基因组学研究方面处于国际领先地位

位,先后完成了水稻、小麦、棉花、鲤鱼、草鱼、山羊等多种动植物品种的全基因组测序;蛋白质组、代谢组、表型组等系列“组学”平台建设日趋完善。功能基因组研究具有世界先进水平,完成了一大批有重要应用前景的动植物基因的克隆与功能解析,已建成包括水稻大型突变体库、全长 cDNA 文库、全基因组表达谱芯片等大型功能基因组研究平台。目前已建立了多个可用于分子模块设计育种的遗传群体,如 NAM 群体、MAGIC 群体和染色体置换系等。

#### 4 标志性目标和成果

分子模块设计育种技术的突破将会解析和阐明动植物高产、稳产、优质、高效等重要农艺(经济)性状的遗传网络及其分子模块控制理论,获得具有重要育种价值的分子模块,并建立起多模块耦合的遗传操作技术,解决现有育种技术的瓶颈问题。最终将建立起从“分子模块”到“设计型品种”的现代生物育种创新体系,实现动植物多个复杂性状的协同改良,培育出一批高产、优质、稳

产和高效的分子设计型动植物新品种。

#### 参考文献

- 1 白春礼. 世界正处在新科技革命前夜. 光明日报, 2012年12月30日.
- 2 路甬祥. 迎接新科技革命挑战, 引领和支撑中国可持续发展. 2010年2月26日在全国人大常委会第十四次专题学习会上的讲话.
- 3 王健康, 李慧慧, 张学才等. 中国作物分子设计育种. 作物学报, 2011, 37(2): 191-201.
- 4 储成才. 转基因生物技术育种: 机遇还是挑战? 植物学报, 2013, 48(1): 10-22.
- 5 薛勇彪, 段子渊, 种康等. 面向未来的新一代生物育种技术——分子模块设计育种. 中国科学院院刊, 2013, 28(3): 308-314.
- 6 孙效文, 梁利群, 闫学春. 水产养殖动物基因组研究的现状及其应用前景. 水产学报, 2004, 28(6): 716-722.
- 7 <http://www.973.gov.cn/ReadCont.aspx?aid=352>.
- 8 <http://www.39kf.com/yyjj/biotechnology/01/2009-01-06-554838.shtml>.
- 9 [http://www.genetics.ac.cn/xwzx/zhxw/201207/t20120723\\_3620168.html](http://www.genetics.ac.cn/xwzx/zhxw/201207/t20120723_3620168.html).

## 合成生物体将革新工业生物制造

整理撰稿人: 中科院国家科学图书馆成都分馆生物资源与生物技术团队

丁陈君(E-mail:dingcj@clas.ac.cn)、陈云伟、陈方

审稿专家: 中科院院士, 中科院上海生命科学院赵国屏研究员

全球经济快速发展与粮食、能源、资源的供给和环境保护、生态平衡之间的矛盾日趋尖锐, 经过近 30 年超高速经济发展的中国更必须直面这一困境。目前, 我国正在努力向着可持续发展的低碳、循环、生态经济模式转型, 对于传统制造业的革新, 是这一

转型的基础之一。

合成生物学是在现代生物学和系统科学基础上发展起来的崭新的多学科交叉领域。它引入工程学的模块化、标准化概念和系统设计理念, 综合物理、化学、信息等各学科知识和技术, 以人工合成或改造重组



中国科学院

DNA为基础,设计创建生物元件、模块、器件和装置,并通过这些元器件改造现有自然生物体系<sup>[1,2]</sup>或创建自然界中尚不存在的生物学组分和系统等“人造生命”<sup>[3]</sup>。合成生物学理论与技术在生物工程和生物制造技术中的广泛应用,不仅能突破生物体天然代谢合成功能与范围的局限,生产传统制造业难以高效制造的、产量极低的甚至自然界稀有的或不存在的特殊产品,为生物经济的发展注入强劲动力<sup>[4]</sup>;而且有望克服传统制造业高耗能、高污染的特性,以先进、高效、环境友好的方式生产人类所需的能源、化学品和材料,促使能源与化学品脱离石油化学工业路线,打造“高效、清洁、节约、可持续”的社会经济发展新模式。总之,合成生物学技术通过理性设计,构建“人造生物体系”来获得人类需求产品的绿色制造,有望改写人们对先进制造技术的传统认识<sup>[5]</sup>。

## 1 合成生物学技术成为生物制造领域革新的核心推动力

当前合成生物学研究的重点是构建和组装新的合成生物体,进而按照人类意愿和需求设计新的高效生命系统,生产性能理想的产品与材料。2010年5月,美国克雷格·文特尔研究所创造了世界首例由人造基因组控制的细胞,在人工设计构建功能性合成生物体方面跨出了重要一步<sup>[6]</sup>。

合成生物学在医药制造领域应用最具代表性的例子是美国加州大学伯克利分校杰伊·基斯林研究组在2006年通过改造酵母代谢途径,实现抗疟疾药物青蒿素前体的生产。2013年4月10日*Nature*杂志又报道了该研究组成功实现了青蒿素的半合成,成为青蒿素合成研究过程中的一个里程碑式的突破。基于该研究成果,法国赛诺菲制药公司已启动了半合成青蒿素的大规模生产<sup>[7]</sup>。与青蒿素同为萜类化合物的紫杉醇是植物来源的抗癌药物。美国麻省理工学院和塔夫茨大学的科学家利用合成生物学技术构建大肠杆菌工程菌生产紫杉醇重要前体紫杉烯,且产量比已有文献有

了显著提高,将人工合成紫杉醇向前推进了一大步<sup>[8]</sup>。此外,国内外学者通过合成生物学途径对人参皂苷的生物合成进行了探索,对控制该途径的关键酶有了一定的认识,为人工合成人参皂苷提供了重要的元器件<sup>[9-11]</sup>。

在能源和生物基化学品生物制造领域,美国加州大学洛杉矶分校的研究人员通过改变大肠杆菌的氨基酸生物合成途径,使其更加适于长链醇燃料的生产,这是研究者首次成功合成长链醇<sup>[12]</sup>。与乙醇相比,长链醇含有更多碳原子,能量密度更大,更易从水中分离,有望成为理想的替代生物燃料。基斯林研究组利用合成生物学技术赋予大肠杆菌进行新的生化反应的能力,开发了一种能从生物质直接生产先进生物燃料的大肠杆菌工程菌株,利用其产生的脂肪酸生产生物柴油和其他重要的化学制品<sup>[13]</sup>。

合成生物技术的迅速发展及其向能源、医药、材料及环保领域产业的转化,将推进生物炼制与生物质转化、生物催化与生物加工、现代发酵等工业生物制造的重大创新和产业应用;对化石资源替代、工业加工方式替代以及传统生物产业升级产生巨大的推动作用<sup>[14]</sup>。美国预期到2020年实现以生物催化方法生产的产品增加20%—30%的精细化学品由生物催化方法生产,以生物催化工艺替代30%的传统工艺<sup>[15]</sup>;欧洲计划于2025年取得向基于生物技术型社会转变的实质进展<sup>[16]</sup>;我国计划到2015年生物制造产业年产值达7500亿元,生物基产品和生物工艺对石油化工原料及传统化学工艺的替代取得重大进展<sup>[17]</sup>。

## 2 中国相关研究具有较好基础与前景

近年来,我国在微生物学、代谢工程学、基因工程学、基因组学、纳米科学、生物电子学、先进制造等方面已有多年的研究积累,创建了一系列关键的研发平台。通过举办或参与香山会议、中德前沿探索圆桌会议、三国六院会议等合成生物学领域重要会议,形成了很好的交流与合作基础。

目前,科技部正在拟定合成生物学发展路线图,积极部署相关研究。

知识创新工程三期以来,中科院在代谢工程、生物燃料、生物基化学品、工业酶与大宗发酵产品开发等方面形成了一批关键核心技术;初步形成一支结构合理、学科互补的生物制造研究队伍;在生物制造领域已建有国家科学基础设施以及多个重点实验室;成立了中科院生物产业科技创新联盟,吸引大量意向性的企业成立科技创新基金。

当前,我国在利用底盘细胞快速高效合成青蒿素<sup>[18,19]</sup>、紫杉醇<sup>[20,21]</sup>和丹参酮二烯<sup>[22,23]</sup>等植物稀有活性成分,以及合成丁二酸<sup>[24,25]</sup>和异丙醇<sup>[26]</sup>等化工产品的生物制造技术方面取得了实质性进展。但在合成生物学技术及其在生物制造应用方面的国际竞争力仍有待进一步提高,因此,需要加强战略规划、持续开展科研攻关、加强系统集成和资源整合,从而为可持续生物经济的发展做出基础性、战略性和前瞻性的贡献。

#### 参考文献

- 1 Canton B, Alabno A, Endy D. Refinement and standardization of synthetic biological parts and devices. *Nature Biotechnology*, 2008, 26(7): 787-793.
- 2 雍晓雨, 陈怡露. 合成生物学应用于生物制造产业的研究现状与发展. 见: 中国科学院生命科学与生物技术局编著. 2012 工业生物技术发展报告. 北京: 科学出版社. 2012. 67.
- 3 Kent H Redford, Bill Adams, Georgina Mace. Framing paper prepared for "How will synthetic biology and conservation shape the future of nature?". Cambridge: University of Cambridge Press, 2013.
- 4 Institute for Ethics and Emerging Technologies. *Synthetic Biology: Key Field of the Future*, 2012. <http://ieet.org/index.php/IEET/more/5061>.
- 5 Stephanie S Shipp, Project Leader, Nayanee Gupta et al. *Emerging Global Trends in Advanced Manufacturing*. Institute for defense analyses alexandria. 2012. <http://amcrc.com.au/wpcontent/uploads/2013/03/Emerging-Global-Trends-in-Advanced-Manufacturing.pdf>.
- 6 Pennisi E Synthetic genome brings new life to bacterium. *Science*, 2010, 328: 958-959.
- 7 Paddon C J, Westfall P J, Pitera D J et al. High-level semi-synthetic production of the potent antimalarial artemisinin. *Nature*, 2013; DOI: 10.1038/nature12051.
- 8 Ajikumar PK, Xiao WH, Tyo KEJ et al. Isoprenoid pathway optimization for taxol precursor overproduction in *Escherichia coli*. *Science*, 2010, 330(6000): 70-74.
- 9 Han J Y, Hwang H S, Choi S W et al. Cytochrome P450 CYP716A53v2 Catalyzes the formation of protopanaxatriol from protopanaxadiol during ginsenoside biosynthesis in *Panax ginseng*. *Plant Cell Physiol*, 2012, 53(9): 1535-1545.
- 10 Chen S L, Luo H M, Li Y et al. 454 EST analysis detects genes putatively involved in ginsenoside biosynthesis in *Panax ginseng*. *Plant Cell Rep*, 2011, 30: 1593-1601.
- 11 Chen X, Xue Y, Liu J H et al. Purification and characterization of glucosyltransferase from *Panax Ginseng* hairy root cultures. *Pharm Biotechnol*, 2009, 16: 50-54.
- 12 Atsumi S, Hanai T, Liao J C. Non-Fermentative Pathways for Synthesis of Branched-Chain Higher Alcohols as Biofuels. *Nature*, 2008, 451: 86-89.
- 13 Steen E J, Kang Y S, Bokinsky G et al. Microbial production of fatty-acid-derived fuels and chemicals from plant biomass. *Nature*, 2010, 463: 559-562.
- 14 中国科学院. 科技发展新态势与面向 2020 年的战略选择. 北京: 科学出版社, 2013, 12.
- 15 Council for Chemical Research(US). *New Biocatalysts: Essential Tools for a Sustainable 21st Century Chemical Industry*. 1999. [http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/resources/chemicals/pdfs/biocatalysis\\_roadmap.pdf](http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/resources/chemicals/pdfs/biocatalysis_roadmap.pdf).
- 16 EuropBio. *Industrial or White Biotechnology - A driver of sustainable growth in Europe*. <http://www.europabio>.



中国科学院

- org/industrial-or-white-biotechnology-driver-sustainablegrowth-europe.
- 17 国务院. “十二五”生物产业发展规划, 2012. [http://www.gov.cn/zwjk/2013-01/06/content\\_2305639.htm](http://www.gov.cn/zwjk/2013-01/06/content_2305639.htm)
- 18 张万斌, 刘德龙, 袁乾家. 一种由青蒿酸制备青蒿素的方法: CN102718773A.
- 19 Kong J Q, Wang W, Wang L N et al. The improvement of amorpho-4,11-diene production by a yeast-conform variant. *J Appl Microb*, 2009, 106: 941-951.
- 20 Wang W, Meng C, Zhu P et al. Preliminary study on metabolic engineering of yeast for producing taxadiene. *China Biotechnol*, 2005, 25: 103-108.
- 21 王勇, 熊智强, 李诗渊. 高效合成萜类化合物的重组大肠杆菌底盘细胞及其制法和应用: CN201210405951.8.
- 22 Zhubo Dai, Yi Liu, Luqi Huang et al. Production of miltiradiene by metabolically engineered *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotechnology and Bioengineering*, 2012, 109(11): 2845-2853.
- 23 Yongjin J, Zhou, Wei Gao, Qixian Rong et al. Modular Pathway Engineering of Diterpenoid Synthases and the Mevalonic Acid Pathway for Miltiradiene Production. *J. Am. Chem. Soc.*, 2012, 134(6): 3234-3241.
- 24 Lu X, Shen J, Jin X et al. Bactericidal activity of *Musca domestica* cecropin (Mdc) on multidrug-resistant clinical isolate of *Escherichia coli*. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2012, 95(4): 939-945.
- 25 张学礼, 徐洪涛, 李清艳. 生产丁二酸的大肠杆菌基因工程菌及其构建方法与应用: CN 201110031624.6.
- 26 Zongjie Dai, Hongjun Dong, Yan Zhu et al. Introducing a single secondary alcohol dehydrogenase into butanol-tolerant *Clostridium acetobutylicum* Rh8 switches ABE fermentation to high level IBE fermentation. *Biotechnology for Biofuels*, 2012, 5(1): 44.

## 青藏高原未来地球系统研究将成为 地球科学研究突破点

整理撰稿人: 中科院国家科学图书馆兰州分馆生态与环境团队

曲建升(E-mail:jsqu@lzb.ac.cn)、刘学

审稿专家: 中科院院士, 中科院青藏高原所姚檀栋研究员

地球系统科学是人类从地球系统的角度全面认识地球及解决复杂的资源、环境和人地关系问题的一种全新的研究理念和研究途径,也是地球科学未来的发展趋势<sup>[1,2]</sup>。自20世纪90年代以来,国际社会先后启动了陆海(LOICZ)、海气(SO-LAS)、陆气(iLEAPS)等跨圈层相互作用研究计划,并大大推进了对地球系统的认识。青藏高原是一个岩石圈、水圈、冰冻圈、生物圈、大气圈、人类圈地球6大圈层相互作用强烈的地区<sup>[3]</sup>,也是对外部扰动极为敏感的地区和国际地球系统科学研究的关键地区之一。

### 1 青藏高原是地球系统科学实现创新突破的关键研究区域

青藏高原地区具有多圈层复杂作用的敏感性、人文社会的原生态性、自然生态系统的脆弱性,这使其成为国际地球系统科学研究的绝佳天然实验室,也因此成为全球地球科学家向往的研究区域。以我国科学家为主的青藏高原研究的阶段成果已表明,在该地区的深入研究将揭示青藏高原隆升过程、环境变化规律及其对全球特别是东亚环境变化的影响和响应机理,增进对人类面临的气候变化问题中诸多不确定性的理解,建立

青藏高原隆升、成矿机制及其对环境响应的新理论,有助于确立中国在青藏高原研究中的引领地位,带动国际地球系统科学相关研究,并对青藏高原地区资源与社会可持续发展发挥重要的科学支撑作用。

## 2 青藏高原地球系统研究将着力在圈层间相互作用机理上实现突破

青藏高原地球系统研究将聚焦于高原地球深部过程及深部岩石圈构造变动对浅表层的影响、地表系统各圈层相互作用的规律及其与人类活动的关系、青藏高原隆升机制及其对环境的响应等方面。具体包括:地表系统圈层相互作用中季风和西风的驱动机制是未来重大科学突破点,在该科学突破点上可以产生引领国际青藏高原研究的重要科学成果;从深部地球系统来讲,尚存与青藏高原隆升过程密切相关的若干热点问题,包括长江黄河的起源、印度大陆与青藏高原首先发生碰撞的部位及其演进轨迹、众多关于青藏高原隆升机制中能否有一种被最终全面证实或者是否有一种新的理论能够全面解释目前困惑科学界的众多地质过程和现象等<sup>[4]</sup>;从地球表层系统来看,青藏高原地区土壤圈-生物圈-水圈-大气圈-人类社会间的复杂作用机理的研究亦有待进一步突破。这些研究工作可为其他地区的类似研究工作提供类似“本底”的研究参考,也可支持制定协调资源开发、生态保护与社会发展多重目标的科学决策。

## 3 青藏高原地球系统研究将推进从科学到发展等若干重大问题的科学认识

青藏高原地球系统科学研究,一方面将实现我国地球系统科学研究的科学突破,为占据国际地球科学研究制高点提供重要契

机;另一方面将全面增进青藏高原地区及其对全国乃至整个东亚地区环境效应的认识,从全新的角度诠释人类面临的气候变化问题的诸多不确定性,并对青藏地区资源与社会可持续发展提供科学支撑。

(1)开展青藏高原深部过程和深部岩石圈构造变动研究,将实现板块运动科学理论的创新性突破,并支持地震等地质灾害的科学预报、预警与监测。青藏高原是开展地球深部过程研究的天然实验室,在该区域的研究被寄予厚望。通过在青藏高原开展地球系统科学研究,可以查明青藏高原特提斯俯冲造山过程和印度-欧亚大陆碰撞造山过程,揭示俯冲、碰撞过程中壳幔相互作用及其对高原隆升的制约,进而为国际板块运动理论提供全新的发展机遇。地震等地质灾害是青藏高原周边地区不容回避的重要灾害类型,近年发生的汶川、玉树、芦山以及定西地震都与青藏高原隆升过程存在密切联系<sup>[4-6]</sup>。对青藏高原深部构造运动的研究有助于确定该区域及其周边的地震等地质灾害的发生与发展机理,进而支持地震等自然灾害的预测、预防、预警和救助等规划和科学决策工作。

(2)通过研究青藏高原碰撞造山带成矿作用,建立成矿模型和找矿模型指导找矿方向,提高成矿预测能力。大陆成矿作用是当代区域成矿学研究的重大前缘课题,大陆碰撞造山成矿作用则是研究和建立大陆成矿理论体系的关键所在。青藏高原是印度大陆与亚洲大陆自6500万年以来强烈碰撞而形成的活动大陆碰撞造山带。伴随大陆碰撞造山发生的成矿作用,规模大、时代新、矿床类型多、保存条件好,因此说青藏高原是矿床学家研究大陆碰撞成矿的关键地区<sup>[7]</sup>。通过精细刻画俯冲与碰撞成矿系统的时空结构与矿化特征,实现青藏高原形成演化、



中国科学院

圈层相互作用理论的原创性突破,可为快速取得找矿重大突破提供理论依据。

(3)青藏高原各圈层相互作用的研究将系统地揭示该区域地表系统演化的基本规律,更好地认识、保护并发挥青藏高原的环境与生态安全屏障作用,实现环境与社会的协调发展。青藏高原的隆起改变了大气的动力和热力条件,形成了独特的水热分配格局,对我国和东亚气候系统具有重要的影响。青藏高原也是亚洲重要江河的源头地区和我国重要的生态安全屏障,在全球变暖的大背景下,青藏高原的地表过程(冰川、冻土、湖泊、湿地、生态系统、人类活动)的任何变化都直接影响着其生态安全屏障效用的发挥和区域经济社会的发展,青藏高原的未来变化与区域发展联系密切<sup>[8,9]</sup>。因此,要深入揭示青藏高原地表过程变化,就要进行圈层相互作用研究。研究青藏高原末次冰盛期以来特征时段的地表环境格局、水体相态转换、生态系统的时空变化、人类活动的驱动和适应选择,将从机理上认识冰川变化、水分循环、生态环境变化之间的相互联系,并为实现若干生态敏感区环境与社会协调发展提供坚实的科学知识基础,为保护青藏高原生态屏障功能、实现青藏高原地区的协调可持续发展提供科学支持。该方面的研究已通过国家重大项目的支持取得了重要进展,如最新研究揭示,青藏高原季风与西风环流的变化可影响冰川动态的区域性差异变化<sup>[10]</sup>,就是大气圈和冰冻圈相互作用的典型过程。

#### 4 国内外进展与中国优势

早在19世纪下半叶,一些外国探险家和科学家就在青藏高原进行过各种考察和调查,20世纪80年代起,由于板块理论的兴起,国际地学界掀起“青藏高原热”,先后开展了中法喜马拉雅联合考察、中日西昆仑山冰川联合考察、中德青藏高原冰川考察、中英青藏高原综合地质考察、中美青藏高原热量平衡科学考察等数十项国际合作研究。20世纪90年代开始,一系列与青藏高原有关的国际

研究计划陆续展开,包括:“全球能量水循环之亚洲季风青藏高原试验”(GAME/Tibet, 1996—2000)<sup>[11]</sup>、“全球协调加强试验计划之亚澳季风青藏高原试验”(CAMP/Tibet, 2001—2005)<sup>[12]</sup>、欧盟第七框架项目“长期观测结合卫星遥感与数值模拟研究青藏高原水文气象过程及亚洲季风系”(CEOP-AEGIS, 2008—2012)<sup>[13]</sup>。最近由中国科学家联合具有知识和技术优势的欧美科学家及具有地缘优势的青藏高原周边地区国家的科学家发起的“第三极环境计划(TPE)”<sup>[14]</sup>不仅使得中国科学家在青藏高原研究领域站在了国际引领的位置,也使得青藏高原研究向多圈层相互作用的方向深入了一步。

中国对青藏高原的研究是一个持续发展的过程。20世纪30年代我国科学家刘慎谔、徐近之、孙健初等分别在高原对植物、地理和地质进行了考察。新中国成立以后,中国科学家多次对青藏高原进行了综合性考察评价,以适应青藏高原社会经济建设的需要,并先后开展了“八五”攀登计划“青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统”,“九五”攀登计划“青藏高原地-气系统物理过程及其对全球气候和中国灾害性天气影响的观测和理论研究”,以及“青藏高原演变与资源形成和环境变化关系”(1998年)、“青藏高原环境演变及其对全球变化的响应与影响”(2005年)、“青藏高原南部大陆聚合与成矿作用”(2010年)、“青藏高原重大冻土工程的基础研究”(2012年)等多项“973”计划。不久前,启动了“第三极水体多相态转换”基金委重大项目,最近中科院又启动了“战略先导专项(B)类——青藏高原多圈层相互作用以及资源环境效应”项目。尽管以青藏高原为舞台多国合作与竞争的局面已形成,但高原的主体在我国境内,因此我国开展青藏高原研究具有地缘优势。根据国际青藏高原研究文献统计结果<sup>[15]</sup>,中国、美国、印度是国际青藏高原研究的核心国家,而中国的发文量以较明显的优势位居第一位,从机构层面来看中科院居于全球青藏高原研究的首位,已

具备全面展开地球系统科学研究的优势积累。

参考文献

- 1 NASA Advisory Council. Earth System Science: A Closer Review. Washinton DC: National Aeronautics and Space Administration,1988.
- 2 毕思文. 地球系统科学——21 世纪地球科学前沿与可持续发展战略科学基础. 地质通报, 2003, 22(8): 601-612.
- 3 马耀明. 青藏高原多圈层相互作用观测工程及其应用. 中国工程科学, 2012, 14(9): 28-34.
- 4 姚檀栋. “世界屋脊”拿什么破解气候密码?(访谈观点). 科技日报, 2013-7-5.
- 5 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青等. 汶川 Ms 8.0 地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, 2008, 30(3).
- 6 单斌, 熊熊, 郑勇等. 2013 年芦山地震导致的周边断层应力变化及其与 2008 年汶川地震的关系. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(6): 1002-1009.
- 7 侯增谦, 莫宣学, 杨志明等. 青藏高原碰撞造山带成矿

作用: 构造背景、时空分布和主要类型. 中国地质, 2006, 33(2).

- 8 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 地理学报, 2012, 67(1): 3-12.
- 9 香山科学会议. 气候变化与青藏高原生态安全屏障——香山科学会议第 450 次学术讨论会综述. <http://www.xssc.ac.cn/Read-Brief.aspx?ItemID=992>. 2013 年 1 月.
- 10 Yao Tandong, Lonnie Thompson, Yang Wei et al. Different glacier status with atmospheric circulation in Tibetan Plateau and surroundings. Nature-Climate Change, 2012, 2: 663-667.
- 11 GAME-Tibet. <http://monsoon.t.u-tokyo.ac.jp/tibet/>.
- 12 <http://data.eol.ucar.edu/codiac/dss/id=76.129>.
- 13 <http://www.ceop-aegis.org/>.
- 14 Third Pole Environment(TPE). <http://www.tpe.ac.cn/>.
- 15 张燕, 王婷, 孙成权等. 国际青藏高原及其周边地区研究文献计量分析报告(2003-2008 年). 地理科学进展, 2011, 30(3).



中国科学院

## 在地球系统以外可能发现生命或生命存在的证据

整理撰稿人: 中科院国家科学图书馆总馆空间科技团队

王海名(E-mail:wanghaiming@mail.las.ac.cn)、杨帆

审稿专家: 中科院空间研究中心吴季研究员

### 1 地外生命存在的可能性

生命是自然界最迷人的奥秘之一。随着空间科学与技术的发展, 生命科学的研究已扩展到对地球系统以外可能存在生命的探索, 即通过对地外生命存在的可能性进行评估, 大致确定地外生命可能的存在形式及区域, 建立起相关理论与模型, 并发展和运用相关的探测方法, 进行有的放矢地寻找地

外生命及其存在的各种线索和证据<sup>[1,2]</sup>。

认为地球之外存在生命有着很简单的事实支持——与地球性质相似的类地行星数量众多, 甚至“超级地球”在宇宙中也普遍存在。因此, 地外生命存在的可能性正逐渐被人们所接受<sup>[3]</sup>。目前对于地外生命的所有的认知都基于地球生命, 多以液态水和有机物的存在作为地外生命存在的前提条件。

但一些科学家批评这种先入为主的观点可能会阻碍对地外生命的探索。很多低等生命顽强地生活在极其恶劣的环境中。除了碳基生命外,地外生命甚至可能以硅基、氨基、氮基等生命形态存在<sup>[4]</sup>。

## 2 地外生命可能存在的区域

(1) 太阳系内有可能存在生命的星球。

火星。目前对火星的研究已发现其存在大量地下水的证据和其他支持生命存在的迹象。“奥德赛”号、“凤凰”号、“好奇”号等任务发现,火星地下存在大量水冰。越来越多的证据表明,火星上曾经存在活动的水系。地面望远镜和“火星快车”任务均探测到火星大气内存在甲烷。甲烷是否由火星地下微生物产生的仍有待于进一步探索。“凤凰”号在着陆地点发现了微生物用以新陈代谢的重要化合物——高氯酸盐,科学家推断着陆点可能适宜生命生存。

木卫二。“伽利略”号的观测数据证实,在木卫二表面冰层下埋藏着大量相对温暖的含盐液态水,冰水之间的交换使天体表面和水之间能量和营养物质的传递成为可能。木卫二表面和海洋存在大量的过氧化氢,很可能成为简单生命的能量来源。新证据还表明,木卫二表面下存在着大型浅水湖,这也使得这颗卫星很可能适宜生命存在。

土卫二和土卫六。“卡西尼”号探测到土卫二的冰面下存在由液态水构成的海洋,土卫六上现存的液态碳氢化合物湖泊和海洋的表面有冰,将为固液界面上的化学反应提供可能。土卫六底层大气和地表的二氧化乙炔可以发生光化学反应,最终有可能产生构成生命的模块分子。

(2) 太阳系外可能存在生命的区域。在太阳系外行星探测方面,自从第一颗系外行星发现以来的近20年中,人们已发现了超过800颗系外行星和3000颗左右候选系外行星。系外行星的普遍存在性和多样性已是毋庸置疑的事实。

“宜居带”是指围绕在恒星周围,水可以以液态形式存在的范围。因此如果行星恰好落在这一

范围内,那么它就被认为有更大的机会拥有生命或生命可以生存的环境<sup>[5]</sup>。目前,基于“开普勒”(Kepler)和“高精度径向速度行星搜索器”等设备的观测结果已确认了多颗位于宜居带内的行星,其中Kepler-62e被视为“迄今为止发现的最适合居住的行星”;恒星Gliese 667C拥有至少6颗卫星,其中有3颗超级地球位于宜居带内。

合成光谱技术、诱导相位振幅切趾等近期开发的一系列新技术可以直接探测地外行星大气中的“生命标记”分子,未来有望更为快捷地回答行星能否支撑生命的问题<sup>[6]</sup>。

## 3 国际地外生命探测计划如火如荼,未来或可取得重大发现

基于目前的探测能力,未来寻找地外生命或生命存在证据的努力将集中在3个方向:一是在太阳系内寻找可能存在的生命;二是开发地基和天基望远镜技术,以期在太阳系外找到地外生命可能存在的环境;三是发射带有地球信息的探测器,让地外智慧生命借此找到我们。

(1) 太阳系内地外生命探索计划。截至目前,人们对太阳系内地外生命的探索主要集中在火星、木星系统和土星系统<sup>[7,8]</sup>。

早在1976年,“海盗”号任务就曾试图回答火星究竟有无生命的问题。随后的一系列火星探测任务先后对火星的大气、土壤以及岩石样本进行了研究,包括“火星探路者”、“火星全球探勘者”、“勇气”号、“机遇”号、“火星快车”、“凤凰”号和“火星科学实验室”及其搭载的“好奇”号火星车等。未来还将开展“火星生命探测计划”、“火星采样返回”、“火星大气和挥发物演化”等任务,对火星进行更为深入的生命探索。

1989年,“伽利略”号对木卫二进行了研究。2012年,欧空局(ESA)宣布“宇宙愿景”计划的第一个大型任务——“木星冰月探测器”任务将揭示木卫二、木卫三以及木卫四是否具有潜在的宜居环境。

“先驱者 11”号、“旅行者 1”号、“伽利略”号和“惠更斯”号均曾对土卫六进行过观测。土卫六的地质特征和大气与早期的地球十分相似,存在生命的可能性极大。

近年的研究表明彗星可能为早期地球带来了水甚至生命。“深度撞击”、“星尘”号等任务证实彗星含有生命起源的基础物质,可能满足生命起源的原始条件。

(2) 太阳系外地外生命天文观测计划。2006 年发射的“对流、自转和凌星”(CoRoT)任务是首个可以观测到系外类地行星的探测器;美国国家航空航天局(NASA)于 2009 年发射 Kepler 探测器,致力于发现银河系内的类地行星。

未来还将实施 ESA 的“地外行星表征卫星”、“柏拉图”(PLATO)和“地外行星表征天文台”任务以及 NASA 的“空间干涉仪”和“天体生物学实验室”任务等。目前,中国正在海拔 4 087 米的南极冰穹 A 建设性能极为优越的天文台,建成后将为搜寻地外生命服务。

(3) 地外智慧生命探索计划。地外的智慧生命可能像地球人类一样,也在努力寻找外部生命。基于这一点,除了向宇宙特定区域发送包含地球信息的射电信号之外,NASA 还先后发射了先驱者号和旅行者号飞船,以期被地外智慧生命发现。“搜寻地外智慧生命”计划致力于通过分析射电望远镜采集到的电磁波中的规律的信号来发现地外智慧生命<sup>[9]</sup>。

探索地外生命,有助于人类更深刻地认识自己在宇宙中的“地位”。正在开展和即将实施的若干国际探测计划,有可能在不久

的将来在地球系统以外发现生命或生命存在的证据,这将是人类对客观世界和自身认识的重大突破,极大拓展人类对生命现象及其规律的认识,也必然会为揭示包括人类在内的所有地球生命的演化奥秘和未来走向带来重要启示。

#### 参考文献

- 1 中国科学院. 科技发展新常态与面向 2020 年的战略选择. 北京: 科学出版社, 2013, 167-168.
- 2 Chyba C F, Hand K P. Astrobiology: The study of the living universe. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2005, 43, 31-74.
- 3 Mix L J, Armstrong J C, Mandell A M et al. The astrobiology primer: An outline of general knowledge - Version 1, 2006. *Astrobiology*, 2006, 6(5): 735-813.
- 4 Des Marais D J, Walter M R. Astrobiology: Exploring the origins, evolution, and distribution of life in the Universe. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1999, 30, 397-420.
- 5 Kopparapu R K, Ramirez R, Kasting J F et al. Habitable Zones around Main-sequence Stars: New Estimates. *The Astrophysical Journal*, 2013, 765(2): 131.
- 6 Snellen I A G, Kok R J d, Poole R l et al. Finding Extraterrestrial Life Using Ground-based High-dispersion Spectroscopy. *The Astrophysical Journal*, 2013, 764(2): 182.
- 7 刘承宪. 21 世纪空间生命科学和空间生物技术发展机遇与挑战. *空间科学学报*, 2000, S1: 37-47.
- 8 任维, 魏金河. 空间生命科学发展的回顾、动态和展望. *空间科学学报*, 2000, S1: 48-55.
- 9 向世民, 黄定华, 高举等. 寻找地外生命的进展与前景. *地质科技情报*, 2009, 06: 128-135.



中国科学院

## 国际空间计划加速基本科学问题和空间技术的重大突破

整理撰稿人:中科院国家科学图书馆总馆空间科技团队

杨帆(E-mail:yangf@mail.las.ac.cn)、王海霞、韩淋

审稿专家:中科院空间中心吴季研究员

外层空间是人类继陆地、海洋和领空之外的第四疆域。爱因斯坦曾断言,“未来科学的发展无非是继续向宏观世界和微观世界进军”。空间科学的研究对象大到宇宙天体、小到极端条件下原子与分子的运动规律,一直处于自然科学的宏观和微观前沿,被视为最有希望取得重大发现的领域。进入21世纪,世界范围内再度掀起新一轮的空间探索浪潮,越来越多的国家提出中长期空间发展计划,将人类的活动不断向深空延伸。2012年,世界主要空间国家在空间领域的预算总额高达729亿美元(其中民用航天占415亿美元)<sup>[1]</sup>,较2006年增长了44%,较2000年翻了一番。随着国际空间计划获得高额投入、进入积极实施的新阶段,以航天器为主要工作平台开展的空间科学研究不断以惊人的成果加深和改变着人类对基本科学问题的认识,并牵引和推动了相关技术的迅速发展。

### 1 国际空间站建成,将源源不断产生新的科学认知和效益

国际空间站已于2011年完成主体建造,进入全面应用时代。舱内29个实验机柜为人体科学、生命科学、流体物理科学、燃烧科学、空间材料科学、对地观测等研究提供了高度集成的实验室;舱外桁架支持了天文学、空间物理、空间技术试验载荷。国际空间站的多学科科学研究与应用工作产生了许多重要成果,并有力促进了空间和地面上的创新技术和应用的发展。例如,由诺贝尔奖获得者丁肇中主持、历时17年建造完成、于2011年安装在国际空间站上的“阿尔法磁谱仪”(AMS-02)项目组近期公布了首批研究成果,确定

宇宙射线流中正电子的比率与理论预期有所超出<sup>[2]</sup>,预示着可能存在新的科学发现;植物学实验发现重力并不是决定植物生长模式的关键因素<sup>[3]</sup>;系列材料实验验证的一种航天器外表面涂层材料已用于“朱诺”(JUNO)号、“重力勘测和内部研究实验室”(GRAIL)、“龙”(Dragon)飞船任务中<sup>[4]</sup>。据统计,自1998年12月—2012年9月,国际空间站的研究成果先后发表在588篇期刊文章和159篇会议文章中,其中一些文章刊登在*Nature*、*PANS*、*PRL*等顶级期刊上<sup>[5]</sup>,受到全世界的极大关注。

目前,国际空间站的主要参与国都在紧密部署更多科学和应用研究,并研制更高水平的科学应用载荷运往国际空间站。欧空局正在研制无容器加工实验柜、等离子体物理实验柜,并计划2015年将“空间原子钟组”(ACES)送往国际空间站,此外还部署了气候变化监测平台和探测大气放电的“大气空间交互监测仪”(ASIM)的研制。日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)的静电悬浮熔炉实验柜已接近研制完成,旨在探测暗物质的“量能器型电子望远镜”(CALET)计划于2013年送往国际空间站,此外还正在推动衍射型地球大气契伦科夫光探测极高能宇宙线计划。国际空间站将至少维持运营至2020年,预期将开展数千项科学实验与观测、空间应用及技术实验,将是人类有史以来规模最大的空间研究活动,可能取得一系列重大研究成果。

### 2 空间科学研究蕴含着重大突破

近年来,空间科学研究重大成果不断涌现,例如,成功探测到中微子、发现宇宙X射线源、发现宇宙微波背景辐射的黑体形式和各向异性以及发

现宇宙加速膨胀而揭示暗能量存在的空间科学观测研究成果分别获得2002、2006、2011年诺贝尔物理学奖；“威尔金森微波各向异性探测器”(WMAP)发现宇宙微波背景辐射图中出现不规则分布的状况,其可能原因之一是由其他宇宙施加的引力所致,为颇富争议的“多重宇宙”理论提供了第一个证据<sup>[6]</sup>;尽管“旅行者1号”是否已飞出太阳系仍存争议,但毫无疑问,人类正在迎来人造天体飞越日球层边界的历史性时刻<sup>[7]</sup>;火星上曾经存在古老水系、木卫二和土卫二表面冰层之下蕴藏着大量液态水等均获得确切证据;系外行星的发现数量不断刷新。

未来5—10年,人类将对太阳开展多波段、全时域、高分辨率和高精度的观测,特别是无人飞行器将克服高温的考验,首次实施对太阳的近距离观测,揭示太阳活动的机理。太阳活动—行星际空间扰动—地球空间暴—地球全球变化—人类活动的链锁变化过程研究所蕴含的发现和突破将为人类的长期可持续发展提供科学支持。

大量天文观测表明,宇宙中存在着遍布星系的几倍于太阳质量的黑洞和存在于几乎每个星系中心的超大质量黑洞,关于黑洞的研究将在黑洞的形成和演化、黑洞附近的时空结构和物质运动规律以及对广义相对论的终极检验等方面产生重大突破。暗物质和暗能量在宇宙演化的历史中起着决定性的作用,也决定着宇宙的未来和命运,对它们的研究很可能会带来系列科学突破。宇宙的大爆炸起源、宇宙中各种天体和结构的起源以及生命的起源是至今困扰人类的重要问题,围绕这些科学问题的探索孕育着大量科学发现并可能引发新的物理学革命。

随着“好奇”号火星车、“朱诺”(Juno)卫星、“宝瓶座”(Aquarius)卫星等任务持续运行,以及“詹姆斯·韦伯空间望远镜”

(JWST)、“火星生命探测计划”(ExoMars)、“丽莎探路者”(LISA-Pathfinder)、“太阳轨道器”、“木星冰卫星探测器”(JUICE)等新任务成功发射,人类将在宇宙形成演化、相对论理论检验、生命现象本质、太阳内部结构和动力学,以及地球系统变化等方面获得更多新的科学认知。宇宙学进入精细描述时代,暗物质的发现极有可能在空间实现突破;广义相对论、量子力学完备性等将在空间得以实验验证;在地球系统以外发现生命或生命存在的证据将使人类对生命现象及其规律的认识得以拓展;对地观测将在解决人口、自然和人为灾害以及温室气体减排等“地球最紧迫的问题”方面发挥至关重要的支撑作用。

### 3 空间科学对空间技术的牵引和推动效应日渐突出,空间技术将进一步实现商业化、市场化

随着空间计划科学目标越来越宏大,空间科学对空间技术的牵引和推动作用也日渐突出,牵引出包括太阳帆推进技术、超高精度时空基准技术等。各国不断加强对完成特定任务所需的关键技术以及开创性和交叉技术领域的规划和投资,NASA还特别强调在不同技术领域、所有技术成熟度级别之间保持平衡<sup>[8]</sup>。同时,空间技术将进一步实现商业化、市场化。美国Space-X公司的发展已表明,商业企业同样可以完成诸如载人航天一类的高精尖任务,并且成本更低。

总而言之,人类对宇宙的起源和物质的认识正处在重大突破的关键阶段,包括中国空间站和空间科学卫星系列在内的国际空间计划的先导部署和顺利实施无疑将加速这一进程。

#### 参考文献

1 Euroconsult. Government space markets world prospects



中国科学院

- to 2022. <http://www.euroconsult-ec.com/research-reports/space-industry-reports/government-space-markets-38-24.html>.
- 2 Cern. AMS experiment measures antimatter excess in space. <http://press.web.cern.ch/press-releases/2013/04/ams-experiment-measures-antimatter-excess-space>.
- 3 Discover. Plants in Space Prove Gravity Unnecessary For Normal Growth. <https://blogs.discovermagazine.com/80beats/2012/12/12/plants-in-space-prove-gravity-unnecessary-for-normal-growth/>.
- 4 NASA. 'Snow White' Coating Protects SpaceX Dragon's Trunk Against Rigors of Space. [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/news/dragon\\_coating.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/dragon_coating.html).
- 5 NASA. International Space Station Utilization Statistics (Expeditions 0-32, December 1998-September 2012). [http://www.nasa.gov/pdf/745992main\\_Current\\_ISS\\_Utilization\\_Statistics.pdf](http://www.nasa.gov/pdf/745992main_Current_ISS_Utilization_Statistics.pdf).
- 6 ESA. Simple but challenging the universe according to Planck. <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=51551>.
- 7 Science. ScienceShot: Has Voyager 1 Left the Solar System? <http://news.sciencemag.org/sciencenow/2013/03/scienceshot-has-voyager-1-left-t.html>.
- 8 NASA. NASA Strategic Space Technology Investment Plan. [http://www.nasa.gov/pdf/726166main\\_SSTIP\\_02\\_06\\_13\\_FINAL\\_hires=TAGGED.pdf](http://www.nasa.gov/pdf/726166main_SSTIP_02_06_13_FINAL_hires=TAGGED.pdf).

## 深海探测的新纪元即将到来

整理撰稿人:中科院国家科学图书馆兰州分馆资源与海洋团队

郑军卫(E-mail:zhengjw@llas.ac.cn)、王立伟

审稿专家:中科院海洋所孙松研究员

海洋占地球表面积的71%,具有储存及交换热量、CO<sub>2</sub>和其他活性气体的巨大能力,对包括气候在内的全球环境变化有着至关重要的调节作用;海洋蕴藏着丰富的资源和具备特殊的战略地位,已引起国际的高度关注。随着人类对海洋及其价值的认识不断得到深化,海洋已成为国家利益拓展的重要空间,海洋科技已成为各国综合实力的重要体现。

伴随科技的不断发展,人类对海洋的探测从近岸走向远洋,从浅水走向深海。目前,深海探测与地球深部探测、深空探测(简称“三深”探测)已成为未来地球科学领域人类科技的重要发展方向和可能取得重大突破的领域。

### 1 深海探测的科技内涵及意义

深海探测技术是针对有关深海资源、构成物、

现象与特征等资料和数据的采集、分析及显示的技术,是深海开发前期工作的重要技术手段,包括深海浮标技术、海洋遥感技术、水声探测技术以及深海观测仪器技术等。与深海资源探测相关的深海资源开发技术是针对深海大洋中资源和能源的开发技术,包括油气资源开发技术、矿产资源开发技术、生物资源开发技术、海洋可再生能源开发技术等。深海资源探测与技术开发已成为满足国家和地区长期发展的战略需求。

从20世纪60年代至今,发达国家率先向深海大洋进军,深海探测技术迅速发展。调查船、钻探船/平台、各类探测仪器和装备、无人/载人/遥控深潜器、水下机器人取样设备、海底监测网等相继问世,探测广度和深度不断刷新。在深海极端环境、地震机理、深海生物和矿产资源,以及海底深部物质与结构等领域取得了一系列重大进展<sup>[1]</sup>。

随着海洋调查探测技术的不断发展,海底勘探将逐渐向深水区发展,深海区石油天然气的储量还会增加。深海生物基因资源是近年来引起国际关注的新型资源,目前国际上深海生物基因资源的应用已带来数十亿美元的产业价值。深海海洋生物处于独特的物理、化学和生态环境中,在高压剧变的温度梯度、极微弱的光照条件和高浓度的有毒物质包围下形成了极为独特的生物结构代谢机制,其体内的各种活性物质,如极端酶,在医药、环保等领域都将有广泛的应用前景。

## 2 国际深海探测发展新趋势

(1)深海探测日益上升到国家战略层面。随着海洋勘探和开发技术的快速发展以及从战略资源储备的高度出发,开发深海已经日益上升到国家战略层面。美国对深海的重视程度尤为突出,于1986年就率先制定了《全球海洋科学规划》,强调海洋是地球上最后开辟的疆域;2004年12月,美国总统布什发布行政命令,发布了《美国海洋行动计划》,成为21世纪美国海洋科学技术发展的指南,明确提出优先开发深海和公海资源的思路<sup>[2]</sup>。英国和日本也积极地将深海技术的发展作为重要突破技术之一,投入巨资发展深海勘探和资源开发技术,如日本的“地球号”勘探船处于当今国际领先水平;英国于2010年2月发布的《2010—2025海洋发展战略》<sup>[3]</sup>,将深海技术发展作为优先发展领域。

(2)国际深海科学研究计划密集发布。除一些具有重大影响的国际计划,如《国际综合大洋钻探计划(2013—2023年)》、《国际大洋中脊行动》、《国际大陆边缘计划》等外,围绕海底观测网络建设的计划或项目呈现密集增长趋势,如美国“海王星”海底观测

网络、欧洲海底观测网、日本新型实时海底监测网(ARENA)、美国新泽西大陆架观测网等。这些深海研究和观测计划的特点是:以在深海研究居于领先水平的美国、日本、部分欧洲国家为主发起国<sup>[4]</sup>;随着技术的发展,针对涉及多项技术集成的海底观测网络建设的计划逐渐增多,反映了深海技术的整体进步;针对深海研究热点领域(如海底热液)的专门观测站建设开始兴起。

(3)深海探测技术成为未来科学技术实现重大突破的关键。海洋观测技术特别是深海观测技术,如《国际综合大洋钻探计划》提出的立管和非立管技术、《国际大洋中脊计划》提到的海底连续观测和观察技术等<sup>[5,6]</sup>的发展成为推动重大科学研究突破的关键。2009年5月31日,美国“海神”号潜艇下潜到世界大洋的最深处——约10902m的西太平洋马里亚纳海沟的挑战者深渊,标志人类在深海探测方面取得重大突破。随着这些深潜器的探索深度和良好观测性能的不断推进,人类认识深海的能力也不断提升,将不断推进人类对未知海洋的了解和认知。

(4)深海探测技术成为集成各种高新技术的综合技术领域。当前的深海技术是集成了几乎当代所有科学技术领域的一项复杂的综合高技术系统。从应用的角度可以分为深海探(观)测技术、深海采样技术、深海资源勘探开发技术、深海空间利用技术、深海环境保护技术以及深海装备技术。从技术看,涉及到微电子技术、信息技术、遥感技术、水声技术、可视化技术和计算机网络技术以及材料、能源等众多学科和技术领域,可以说深海技术是当代各种通用技术和最新技术在深海大洋这个特殊环境中的应用和发展。

(5)深海探测国际合作日益紧密。国家



中国科学院

之间、区域之间、科研机构与企业之间、企业与企业之间的合作成为未来国际合作的趋势。文献计量分析表明,目前在深海科学技术领域形成了以美国、日本和欧洲为核心的合作伙伴群。美、英、法、德、日本等国通过政府支持、科学界与企业界联合、国际合作等方式加快深海技术的发展,总体上在深海技术领域处于领先地位。

### 3 中国在深海探测技术领域优势

我国将在国际海底圈定一块满足商业开发所需资源量要求的海底富钴结壳区域,并兼顾该区域其他资源的前期调查,开展海底热液硫化物的调查。同时,全面启动深海生物基因研究开发。我国还将积极发展海底探测与大洋资源勘查评价关键技术,突破深海作业技术、海底多参数探测技术、深海海底原位探测技术、深海工作站、矿产和生物基因直视取样技术,形成深海探测与取样技术体系。

(1)深水油气勘探。在深水油气勘探方面拥有首座深水半潜式钻井平台 COSLPIONEER(中海油服先锋),作业水深750m,钻井深度7500m,钻井设备具有全自动钻进功能。2010年中海油又建成了第6代深水3000m半潜式钻井平台“海洋石油981”号,最大作业水深3050m,钻井深度可以达到10000m,几乎可以在全球所有深水区作业,最近在南海首次独立进行了深水油气勘探。自主研发的单船长电缆大容量震源地震和相应配套技术以及OBS海底地震探测技术,形成一套深水海域油气地震勘探系列<sup>[7,8]</sup>。“863”计划“天然气水合物勘探开发关键技术”的科技攻关,取得了一批具有自主知识产权的创新性成果<sup>[9]</sup>。

(2)大洋科学考察。目前,中国拥有大洋综合科考船“大洋一号”、“海洋六号”和极地科考船“雪龙号”以及中科院海洋所新建成的“科学号”综合科学考察船,并配有各种先进的探测仪器、设备和

装置。从20世纪90年初开始了深海大洋和南、北极综合科学考察及大洋矿产资源、深海生物基因资源调查研究。

中科院新建成的“科学号”综合科学考察船配备国际先进的探测与考察设备和现代化实验室,能够满足现代深海和大洋探测与研究的需求,为深海探测与研究提供了海上综合平台。正在筹建的深海研究中心正是应对深海研究的现状而进行的战略布局,其将瞄准深海科学研究前沿热点问题,集中国内涉海研究单位的优势力量,围绕深海科学和资源勘探规模开发等目标,组建具有国际竞争力的中国深海科学技术研发机构,成为有效支撑深海资源勘探开发和深海科学研究的关键技术力量。

#### 参考文献

- 1 莫杰,肖非.深海探测技术的发展.科学,2012,64(5):11-15.
- 2 刘淮.国外深海技术发展研究.船艇,2006,258:6-18.
- 3 UK marine science strategy.<http://www.defra.gov.uk/mscc/files/uk-marine-science-strategy-.pdf>
- 4 European SeaFloor Observatory Network. [http://www.oceanlab.abdn.ac.uk/esonet/ESONET\\_fullrep.pdf](http://www.oceanlab.abdn.ac.uk/esonet/ESONET_fullrep.pdf).
- 5 Fisher A T, Urabe T, Klaus A et al. IODP expedition 301 installs three borehole crustal observatories, prepares for three-dimensional, cross-hole experiments in the Northeastern Pacific Ocean. Scientific Drilling, 2005,(1):6-11.
- 6 Annual Program Plan FY13. <http://www.iodp.org/program-document>.
- 7 莫杰,高平.海洋油气勘探现代技术方法综合应用现状及发展趋势(下).中国海上油气(地质),2002,16(3):215-220.
- 8 陈楠.当今国外深海石油勘探难点技术及发展趋势.中国石油勘探,2010,(4):71-75.
- 9 杨胜雄,张光学.海洋天然气水合物综合勘测技术.《科技兴海丛书》编辑委员会.海洋探查与资源开发技术.北京:海洋出版社,2001,179-183.