

# 中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 73 次

学部工作局学术与文化处 编报  
《中国科学》杂志社

2018 年 6 月 19 日

## “中国地下深部生物圈”论坛综述

### 一、背景

深部地下生物圈（Deep Subsurface Biosphere，以下简称“深地生物圈”）是指陆地及海底表面以下，不依赖阳光为能量来源的生物圈，主要由具有厌氧、耐高温、高压等特点的微生物组成，俗称黑暗世界生物圈。深地生物圈代表着地球最早期极端环境下的生命，对于生命起源及火星等外星体的生命探索有重大意义。它们生物量巨大，种类繁多，代谢途径多样，对油气及矿产资源的形成、元素地球化学循环与气候变化过程起着重要的调控作用，同时它们也是潜在的微生物资源，有望在地下空间开发、医学、环保、能源资源等领域发挥重要作用。因此对深地生物圈的研究将大大提高我们对地球生命-环境-资源相互作用的认识，是地球系统科学不可缺少的组成部分，也是实现“向地球深部进军”的“深地”科技战略的重要内容之一。

但是，目前人们对深地生物圈知之甚少。深地生物圈研究领域存在如下重大科学问题：地下深部有什么样的微生物？其多样性及延伸深度如何？它们在地下极端环境的生长和代谢速率有多快？它们是否

在地下起源？地下微生物如何适应极端环境条件的变化？适应的速率有多快？它们是否具有独特的适应方式来保证在极端条件下（例如低能量、高压、高温）生存？这些微生物如何调控温室气体的释放与吸收以及影响地下二氧化碳的长期储存？现有的微生物细胞结构模型对地下深部生物是否依然有效？正常生境常见的生物膜在地下生命活动中扮演什么样的角色？微生物群体行为的调控机制是否适用？在地下世界由岩石造成的孤立生态系统中是否存在另外一种能量传递方式？解决这些问题，不仅是深地生物圈研究的重要成果，而且对国家深地科技战略将作出重要贡献。

## 二、论坛概况

本次论坛由中国科学院学部主办，中国科学院地学部和学部学术与出版工作委员会承办，中国地质大学（武汉）生物地质与环境地质国家重点实验室和《中国科学》杂志社协办。

中国科学院院士殷鸿福担任论坛主席，中国地质大学地质微生物实验室主任董海良任论坛执行主席。论坛邀请 16 位中外嘉宾作了主题报告。论坛由潘永信院士、董树文教授、肖湘教授、董海良教授和王风平教授先后主持，中国科学院学部工作局生命地学办公室赵剑峰副主任受地学部委托到会致辞。中国科学院院士殷鸿福、周忠和、赵国屏、邓子新、沈树忠、潘永信，中国工程院院士谢和平，国际宇航科学院空间生命科学部通讯院士庄逢源，国家自然科学基金委员会生命科学部冯雪莲副主任，以及来自 38 所院校和研究机构的 200 多位国内外专家学者和研究生参加了此次论坛。与会专家围绕与深地生物圈研究相关的多个议题展开热烈讨论，提出了许多有价值的观点和建议。

## 三、论坛报告概述

**（一）中国地质大学殷鸿福院士：深部地下生物圈研究的意义和科技问题**

在深地开发中，必须了解其生物量、多样性、活性、能量来源及对深地环境的影响。深地微生物参与各种元素地球化学循环，它们驱动的碳、硫、氮循环对气候变化过程起着重要作用。它的资源开发应用意义包括：与深地生物圈有关的成矿成藏作用（如铀矿、页岩气、天然气水合物）与矿藏开发（如生物采油、低阶煤原地微生物气化）；二氧化碳和核废料封存；环境的生物修复；用于生物医药、食品保健、冶金和化学工业的微生物资源利用等。所以，作为地球深部圈层之一的深地生物圈在深地科技战略中占有重要地位。目前对深地生物圈的研究很薄弱，需要大力加强。亟待解决的重大科技问题包括：深地生物圈的生物量、多样性及其活性；深地生物圈的能量来源；深地生物圈的生物地球化学循环过程、通量及与全球变化的关系；解决这些科学问题的研究手段——深地生物圈研究的技术装备与观察模拟。

### **（二）南京大学董树文教授：深地探测项目介绍**

从透视地球、深探资源及拓展空间三个方面报告了地球深部探测重大项目的部分内容。向地球深部进军是必须解决的战略科技问题，要和国家需求结合，针对地下资源和城市地下空间利用进行攻关。我国能源矿产资源需求较大，大量原料需要进口，因此迫切需要向深部要资源、要空间。地球深部与人类生存息息相关，地下空间利用前景广大，大中城镇地下建设处于起步阶段，地下深部空间应用前景广泛。报告介绍了深地探测重大专项总体目标，即开展超深 13 千米深度钻探工程，为深地生物探测提供材料，采用国家自行研发的“地壳一号”钻井系统，建立地下观测系统，研究深部物质循环，从而为矿产流体化开采提供理论基础并建立示范工程与产业化基地。

### **（三）四川大学谢和平院士：深地科学与地下生态圈研究探讨**

报告探讨了深地生物圈的特征及深地生物圈中能量来源问题，提出能量来源的可能途径为低宇宙辐射、矿物自身放射性或其他能量源的微生物，同时对深地生物圈（地下物质循环、地下湿地、地下水自

净等)与地下农业的发展及其与医学结合的研究进行了阐述。

#### **(四) 中国地质大学(北京)董海良教授: 中国深部生物圈研究机遇和挑战**

地质微生物学是地质学和微生物学交叉的一门学科,在过去的20年里,该学科领域的发展非常迅猛。目前已经对地球上许多极端环境中生存的微生物进行了研究,范围从深层地下环境中的结晶岩石、高盐度湖泊,到热泉,再到深海热液喷口系统。报告对全球深层生物圈的研究进行了综述,并重点介绍了中国在这方面的研究状况。首先介绍了中国深层生物圈的研究历史,如中国大陆科学深井钻探项目。其次是当前的一些研究活动,如在中国东部建立的多井深部地下实验室。然后展示了全球范围内陆地生物量和多样性估计与地质和地球化学条件的相关性。最后,对深层生命的研究提出展望,如在地下环境中不同微生物的分布状况,代谢速率的测量,能源的可利用率以及种间的交流等。同时,就特殊地下环境中的微生物物种和基因文库在清洁能源和环境治理方面的潜在应用价值提出见解。

#### **(五) 中国科学院微生物研究所黄力研究员: 深部地下病毒多样性及生态功能**

病毒是地球上数量最大的生命形式,据估计,海洋中的病毒在数量上比细胞微生物高两个数量级,达到 $10^{31}$ 个。病毒通过与宿主细胞复杂的相互作用,或裂解细胞,或与细胞共存并对细胞进行代谢重编程或遗传改造,从而在宿主细胞微生物驱动的地球元素生物化学循环中发挥重要作用。传统的病毒研究依赖于宿主细胞的分离培养,由于绝大多数细菌和古菌尚不能培养,因此,绝大多数以细菌和古菌为宿主的病毒也不能培养。此外,由于缺少类似于原核生物16S rRNA基因的分子标识,关于自然环境中病毒的分子生态学调查也相对滞后。对于深部地下病毒的认识,则因采样手段等的更多限制而多为推测。不过,随着测序能力的迅速提升、测序成本的逐步下降以及生物信息

学手段的进步，环境病毒的元病毒组学、元基因组学研究近期发展很快，新的研究发现正在不断改写对地球病毒圈的认知。-

#### **（六）上海交通大学肖湘教授：从生物大分子到生命的边界**

生命广泛存在于各种极端环境中。从生命演化的过程来看，不同极端环境适应可能存在共同的分子基础。报告从生物大分子、细胞与群体等不同层次上分析了超高温、超高压等极端条件下微生物多样性与 C、N、S 等不同元素的代谢过程，模拟培养实验突破了已报道的微生物温、压耐受极限。相关研究对理解早期生命过程与域外生命有所帮助。

#### **（七）中国地质大学（武汉）石良教授：人类活动-深地微生物-地下环境的相互影响**

深地生物圈内生活着数量庞大且种类众多的微生物，包括细菌、古菌和真菌。据最保守估计，地下微生物细胞总数超过  $5 \times 10^{29}$  个，约占地球生物总量的 20%。深地微生物的能量主要来源于水岩相互作用过程中产生的氢气，因而深地生物圈是一个主要以化能自养微生物为主的生态系统。深地微生物因寡营养低能量，其代谢速率最多是地表微生物的 1/100，细胞分裂一次需要数年甚至上千年。人类活动，如页岩气开采、核废料地质储存和  $\text{CO}_2$  深地封存，极大地改变了深地环境和深地微生物的组成和功能。同时，响应人类活动的深地微生物反过来也显著影响着人类有效利用深地资源和空间。

#### **（八）华东理工大学牟伯中教授：油藏环境微生物群落结构与功能——生物采油技术的潜力与发展趋势**

地下深部油藏是一个典型的集厌氧、高温、高压和高矿化度、油/气/水共存为一体的多孔介质环境，这种特殊环境造就了一个独特的微生物生态系统。对油藏环境微生物群落结构与功能的研究目前发展到分子生物学水平，在油藏原位环境微生物活性、降解途径及转录表达等方面取得了许多新的认识；在生物采油等油藏微生物应用方面，油

藏环境石油烃厌氧降解产甲烷过程对复杂油藏生物改造和枯竭油藏残余油生物气化开采方面具有重要应用价值，已经受到国内外同行的高度关注，美国能源部就此提出了技术概念图，我国在油藏环境石油烃厌氧降解产甲烷途径与调控机制方面进行了深入研究，取得了一系列重要成果。我国已开发油田目前平均采收率上不足 35%，据预测，采用现有技术开采后，仍将有大约 1/3 残余油滞留地下有待开发。利用微生物作用将油层中原本难以动用的残余油就地转化为甲烷，以天然气的形式开采，在进一步延长油藏的开发寿命和大幅度提高油气资源利用率方面有着潜在的巨大应用价值。报告综述了近 20 年来国际上在油藏环境微生物群落结构与功能方面的研究结果；同时，结合作者所在实验室的研究工作，从中间代谢产物与生物标志物、组学方法、生物反应器模拟实验等 3 个方面，介绍石油烃厌氧生物降解产甲烷途径及调控机制研究进展，分析了生物采油技术的潜力与发展趋势。为深入认识地下深部油藏微生物生物地球化学过程以及油藏微生物资源化利用提供了基础。

#### **（九）中国地质大学（武汉）王红梅教授：洞穴微生物的研究现状及发展趋势**

由于缺少阳光，洞穴生态系统缺乏直接来自光合作用的有机质，加上地理位置相对隔离、常年恒温、较高的 CO<sub>2</sub> 浓度等，洞穴通常被认为是一种寡营养的极端环境，是研究地下生物圈的天然实验室。洞穴中孕育着大量未知的资源微生物，尤其是放线菌，它们是抗生素最重要的来源，是人们寻求新药物的重要基地。因此，洞穴无论在科学研究、资源开发和生态系统维持中都具有十分重要的意义。近年来，洞穴微生物的研究在如下方面取得了重要进展：（1）对洞穴细菌和真菌的微生物群落的组成、多样性以控制微生物群落的环境因子有了较为清晰的认识，pH 在洞穴系统微生物群落的分布上起着重要作用；但古菌研究相对薄弱；（2）洞穴微生物功能的研究方兴未艾：利用纯培

养菌株以功能基因、宏基因组的手段，对洞穴物在溶磷、氨氧化、固碳、硫氧化等方面取得了一定的进展，但洞穴生态系统中整体的物质循环仍然有许多未知领域；（3）洞穴资源微生物的开发显示出良好的势头：近年来，对洞穴放线菌的分离培养、基因组测序以及新的抗生素的产生等方面均取得了丰硕的成果，有望为开发新的抗生素，解决病原菌的耐药性提供解决途径。

#### （十）上海交通大学王风平教授：微生物介导的深地碳迁移转化

海洋沉积物中含有地球上最大的有机碳库，这些沉积物及沉积物/水界面处的碳素流动基本上控制着大气中氧气及二氧化碳的浓度，而微生物的迁移转化作用被认为是这一流动过程的关键步骤。目前，关于微生物介导亚表层有机物迁移转化的研究仍然较为匮乏。我们了解这些微生物的生物学分类，却对其在整个系统中的功能知之甚少，前人研究表明古细菌是亚表层微生物群落当中的重要组成部分，然而对于其在碳循环当中究竟扮演何种角色，我们的认识却仍处于初级阶段。报告回顾了目前为止前人探究微生物在亚表层碳循环系统中的作用时所取得的重要成果，并探讨了该领域所面临的重大挑战、机遇及未来的发展方向。

删除的内容：

#### （十一）国家海洋局海洋三所邵宗泽研究员：深海热液区化能自养生态系统中的微生物多样性与环境作用

深海热液区常出现在地壳板块交界的洋中脊、俯冲带、弧后盆地和热点火山（700~5000 m 水深）。目前全球已发现 600 多个深海热液区。与陆地上以光合作用产生有机质的生态系统不同，这是一个完全不依赖光合作用的化能自养生态系统。化能自养微生物通过自由生长或与动物共生，固定二氧化碳、合成有机物，支撑了小型底栖动物等初级消费者，进而支撑了整个热液区生物群落。近 10 多年来，我国在东太平洋海隆、西南印度洋中脊、西北印度洋中脊及南大西洋中脊开展了热液区硫化物与环境综合调查，也初步开展了深海微生物多样性

调查和微生物成矿过程研究。2015 年与 2017 年中国大洋第 35 与第 38 航次科学考察期间，又利用“蛟龙号”深海载人潜器在西南印度洋中脊、西北印度洋中脊新发现的多个热液区开展了精细调查，为深入开展深海热液区生物多样性与极端环境下的生命过程研究提供了重要资料。

### **（十二）山东大学张玉忠教授：深海微生物的多样性、独特的生命特征及环境生态效应**

深海尽管环境极端，仍生活着大量的微生物，是一座巨大的微生物资源宝库，是目前世界研究的热点和资源竞争的焦点。阐明深海微生物的多样性、独特的生命特征与环境适应机制，揭示深海微生物在碳、氮、硫等生物地球化学循环中的作用与机制，具有重要的理论意义，也将为深海微生物资源的开发利用奠定基础。针对上述科学问题，报告介绍了以下主要内容：（1）揭示了深海沉积物中参与有机质降解的细菌及胞外酶的多样性，发现和鉴定了一系列细菌新种和新属，揭示深海细菌的演化机制；（2）揭示了深海细菌独特生命过程与环境适应的生理、遗传与生化机制；（3）发现和鉴定了一系列具有新结构或新功能的深海微生物新酶，阐明了深海微生物酶对海洋有机氮、碳、硫的降解过程与分子机制。上述研究发现为揭示深海微生物多样性、独特的生命特征及环境生态效应提供了重要依据。

### **（十三）美国新墨西哥矿业及科技学院 Thomas L. Kieft 教授：氢气驱动的地下微生物生态系统——以南非卡普瓦尔克拉通为例**

关于大陆深部生物圈的几个重要问题在很大程度上仍未解决，包括：（1）哪些因素控制着生命的最低深度限度？（2）哪些是深部生命的碳源？（3）哪些过程控制着深部生命的能量流？这些重要问题的解决受到深部钻探成本的限制。作为地表钻探的替代方案，报告人及其团队在南非卡普瓦尔克拉通的采矿工程中从金矿、钻石和铂矿开采的钻孔中采集了极深的裂隙水（1~4 千米）。报告指出：（1）细胞的周



转时间在深度 3 千米、55°C 时约为 1~2 年；(2) 约 20 亿年的深部含盐裂隙水富含放射性成因的  $H_2$  和非生物烃；(3)  $H_2$  通量受到地震活动的刺激；(4)  $CH_4$  和  $CO_2$  是微生物生态系统的主要碳源；(5) 更复杂的有机碳似乎是由生长在这些能源和碳基质上的微生物原位产生的，而缺少植物和土壤衍生的溶解性有机碳。非培养分析（16S 焦磷酸测序、宏基因组测序、转录组测序、单细胞基因组测序和蛋白质组学）揭示了原生、新型、厌氧的微生物群落。初级生产者为化学自养生物，包括氢碎屑产甲烷菌和硫酸盐还原菌（SRB）。ANME 序列表明一些产甲烷菌实现了厌氧甲烷氧化。硫酸盐还原菌包含金矿菌，它是一种世界性的地下居民，也在其他深部裂隙水域，例如芬兰的大盆地沙漠以及轴向海脊玄武岩中被发现。硫氧化反硝化菌代谢硫酸盐还原菌产生的硫化物。总体而言，这些发现支持活性代谢  $H_2$  驱动地下无机自养微生物生态系统（SLiME）的存在，其完全独立于地球表面的生命——即光合作用产物而运作。

#### **（十四）美国伍兹霍尔海洋研究所 Stefan Sievert 博士：深海热液口海底微生物群落的活动性和生产力**

尽管进行了 40 年的研究，但对海洋热液系统中进行碳固定的原位代谢的认识仍然非常有限，特别是缺乏鉴定化学合成活性微生物和原位测量  $CO_2$  固定率的研究。报告展示了使用创新的培育方法评估在深海热液系统中化学自养性生产的数据。在培养期间保持与海底的压力和温度一致，对取自 Crab Spa (9°N East Pacific Rise) 天然的微生物群落化学合成的初级生产力进行量化。这些实验测量了固碳作用，微生物催化无机氧化还原反应和群落组成，为在相关环境条件下自然种群的鉴定以及种群活动性的研究提供了参考。这使研究者能够确定自然群落的生长效率，为化学合成的初级生产力潜在规模和 Crab Spa 下海底生物圈的停留时间提供限制。结合该信息与来自组学方法的结果，揭示了一个高度活跃的微生物群落由不同的 *Campylobacteria* 所主导，

它们的碳固定主要由氧化硫化物与硝酸盐和氧气引起。微生物群落的特点是功能冗余，这意味着使用同源途径，不同的分类单元表现出相似的功能，但最优地适应了混合流体的流动路径下海底存在的热量和氧化还原梯度。总的来说，该部分数据提供了在这个喷口处的海底生物圈和它对周围深海的生物地球化学意义的综合视图。

#### **（十五）美国蒙大拿州立大学 Daniel R. Colman 博士：黄石国家公园深部生物圈研究**

热液系统可将行星表面与其深部的地质过程结合起来，并产生一系列惊人的地球化学组分。对栖息在热液系统极端环境微生物的研究为深入了解地球和其他行星的可居性提供了重要依据。虽然有相当多的研究证实了微生物在地球表面热液环境中的多样性和分布特征，但迄今为止，学界对具有高度还原性的热液深部生物圈的范围和特性还知之甚少。报告人利用宏基因组学与地球化学分析相结合的方法，对黄石国家公园（YNP）热液深部生物圈的特性进行了初步探讨。介绍了来自两种不同热液系统的数据，这些数据为深入了解 YNP 不同热液系统中潜在的深部生物圈提供了依据。同时也对 YNP 深部生物圈潜力的最新研究进展进行了讨论。

#### **（十六）美国普林斯顿大学 Maggie C.Y. Lau 博士：陆地深部“大数据”能告诉我们什么？**

地下无机自养型微生物生态系统（SLiME）的概念由 Stevens 和 McKinley 于 1995 年首次提出。这是一种动态、厌氧、地下的生态系统，能量来源似乎是地球化学过程产生的氢。在过去的 20 年里，工程技术的进步极大地提高了样品可获取性、检测灵敏度和数据可靠性。科学家们可以通过高通量分析的手段获得海量的生物数据。“大数据”给科学家们带来了巨大的挑战，但与此同时也为人们了解这个深邃黑暗的生物圈提供了前所未有的机遇。根据最近发表的和正在进行的研究，报告概述了学术界对寡营养的地下微生物组学已有的了解：更新

了地下微生物的生物量和分布，古流体和表层补给混合比不同的地下水中生物多样性的组成和复杂性，以及地下微生物的演化。在这个微生物学数据爆炸的时期，我们应该期待更多相关的新知识和研究课题被挖掘出来。

#### 四、论坛达成的基本共识

深地生物圈战略研究既是国家深地战略要求，也是前瞻性的重大科学技术问题，与会专家对该议题展开了广泛而深入的讨论。结合我国的深地探测计划，面对深地生物圈的机遇与挑战，力争创建有中国特色的深地生物圈科学技术。在充分利用深地生物圈资源方面，要注意防治深地微生物的负面影响，例如微生物对页岩气开采、核废料储藏、CO<sub>2</sub>地质封存和油气开采的影响、人-微生物-深地环境相互作用。在深地生物圈数据库/资源库建设方面，要注重和利用中国区域相关数据库搜集整理及与世界相关数据库/资源库机构合作。在国际合作方面，要牵头国际计划，开展深地钻探国际合作，在国际上发出中国学者的声音。在深地生物圈学科建设和人才培养方面，吸收国际同行经验，创立具有国际先进水平的深地生物圈学科体系和培养响应人才团队。此次论坛有望推动“中国地下深部生物圈”研究领域前沿科学理论和技术探索，促进相关学科交叉融合以及学术交流，充分发挥学部对我国“地下深部生物圈”研究领域创新发展的引领作用。

#### 五、有待进一步探讨的问题

世界各国已经开始相关的研究工作。美国政府于2016年正式启动美国国家微生物组计划，投入大量经费和研究力量进行研究，其中包括深地微生物。欧盟等也有许多国家开展了相关的计划。我国的深地生物圈研究较国外同行起步晚、研究点位（相关数据）少，因此应争取挖掘后发优势。可以利用现有的较为先进的实验技术手段，依靠已有的大数据信息，高起点开展深地生物圈研究。同时，可以借鉴国际

同行已经取得的成果和经验，少走弯路，快速地将深地生物圈研究的技术成果，从而减少或防治深地微生物对人类生活生产（如页岩气开采、核废料储藏、油气开采、地下城市空间利用等）的负面影响。中国科学院学部就此开展学科发展战略研究符合国际学科发展的前沿需求，有望在深地生物圈领域提前做出战略规划和部署，引领和指导该领域的科学研究，推动深地微生物观测技术的发展。

## 六、论坛总结

论坛最后，殷鸿福院士作总结时指出，本项学科发展战略研究及论坛是生命科学和地球科学的全面高度交叉。上述一系列科学问题最终可归纳为生态、进化、生物多样性（系统发育、生物分类和功能）、生物地理学、生物地球化学循环和气候变化等基本问题。要解决这些问题，需要整合地球化学、分子微生物学、基因组学等地学和生物学手段并结合分离和培养得到的微生物生理学和生物化学知识。地球化学和物理参数等环境条件的野外观测将为研究地下微生物的生态学提供背景材料；地下深部获取的样品与原位实验室系统可在长时间尺度上进行分子和微生物学实时动态观测与实验，为评价微生物在高温高压条件下进行长时间的新陈代谢提供技术支撑。深部地下实验室可为实时分析地球深部环境并了解微生物物质与能量转换提供难得的检验机会，进而确定微生物生长及个体间相互作用所需要的最小能量，阐述生物圈、水圈、岩石圈及大气圈之间相互依存关系。

在服务于国家深地科技战略的前提下，全面部署深地生物圈的学科发展。习近平总书记指出：“向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”。深地生物圈是地球深部的组成部分，必须参与国家的深地战略科技工作。在国家的深地探测项目中，短期内（3年）可以研究深地微生物丰度及多样性与地质环境之间的关系，深地微生物个体之间的共代谢机理等；中长期（5~8年）将利用中国现有深井与辽河、松辽盆地浅井，建成由多井组成的深部实验室，连续、实时、长期观

测深地生物圈与流体活动、裂隙分布、地震、火山活动之间的关系，研究长距离地下微生物的迁移与地质构造活动之间的关系，进一步研究人类活动与地下生物圈之间的相互影响。

同时，在我国深地生物圈的学科建设和人才培养方面，将从专业设置（地球生物学的二级学科体系）、平台条件（有条件的高等院校和研究所、国家级平台、国际研究中心）、学术组织、科学普及等方面，研究深地生物圈的学科建设和人才培养战略。在国际联合中形成中国的研究特色，积极参与全球微生物组计划，与国际深地实验室建立学术联系；利用各类大洋航次和深潜器广泛调查中国及其他海区的深部生物圈。在合作中形成中国深地生物圈的研究特色，实现从赶超到引领。

（作者：蒋宏忱，教授，中国地质大学（武汉），生物地质与环境地质国家重点实验室；杨渐，副研究员，中国地质大学（武汉），生物地质与环境地质国家重点实验室；董海良，教授，中国地质大学（武汉），生物地质与环境地质国家重点实验室；殷鸿福，中科院院士，中国地质大学（武汉），生物地质与环境地质国家重点实验室）