

土壤-微生物系统功能及其调控

1 立项背景和意义

土壤是粮食生产的主要载体。党的“十八大”以来,习近平总书记从我国发展全局出发,深刻阐述了粮食安全的重大理论与实践问题,多次强调“解决好吃饭问题始终是治国理政的头等大事”。“藏粮于地、藏粮于技”成为我国“十三五”规划的十四大战略之一和国家重大需求,习近平总书记指出,要像保护大熊猫一样保护耕地。在“十三五”规划建议的说明中,他又对藏粮于地进行延伸,提出探索实行耕地轮作休耕制度。同时,要为粮食生产插上科技的翅膀,坚持走依靠科技、提高单产的内涵式道路。20世纪90年代以来,传统土壤物理、化学调控措施的增产潜力已达瓶颈,我国粮食安全保障亟待发掘新的增长点。例如,我国在世界7%的耕地上施用了世界1/3的化肥,氮肥的平均利用率不足30%,相当于每年损失高达500亿元。此外,大量农业化学品投入导致了有害物质积累、农业面源污染和温室气体排放等生态环境问题。据2010年环境保护部的估算,我国农业来源总N和总P占全国排放总量的57.2%和67.4%。土壤养分元素的形态转化几乎完全依赖于土壤微生物组,因此,揭秘土壤微生物组,发展土壤-微生物系统及其功能调控技术,探索现代农业管理方式对土壤微生物系统的影响及其反馈机制,已经成为我国“藏粮于地、藏粮于技”战略的重大理论和实践问题。

土壤微生物组是土壤中所有微生物及其栖息环境的

总称,已经成为新兴的交叉前沿和战略高地。土壤之所以被称为地球活的皮肤,主要原因就是其中栖息着数量巨大、种类繁多的微小生物,据估算,每克土壤中微生物的数量最高可达上百亿,种类多达上百万,但其中高达99%的微生物功能仍不清楚,极大地阻碍了人类对土壤中海量微生物多样性的资源发掘和功能利用。因此土壤微生物组也被认为是“暗物质”,是土壤养分的“转化器”、环境污染物的“净化器”、陆地生态系统的“稳定器”、气候变化的“调节器”。2016年5月13日,美国总统科学技术政策办公室与相关政府机构和私人基金会共同颁布了国家微生物组计划(National Microbiome Initiative),成为奥巴马政府在脑科学计划、精准医学计划和抗癌症计划后的又一个重大国家战略行动,代表着促进科技创新和经济增长的一个新领域。该计划的目标是研究不同环境中微生物组的功能及其利用前景,涵括了人体、土壤、海洋、大气等环境中的全部微生物个体及其功能,为解决21世纪人类面临的农业、能源、环境、海洋和气候等重大问题提供新的解决思路和技术途径。

2 主要进展

“土壤-微生物系统功能及其调控”先导专项实施两年以来,如图1所示,围绕“资源”“功能”“调控”三大任务和新技术新方法探索,集科技攻关、人才培养和平台建设于一体,取得了明显进展并产生了重要的国际影响。

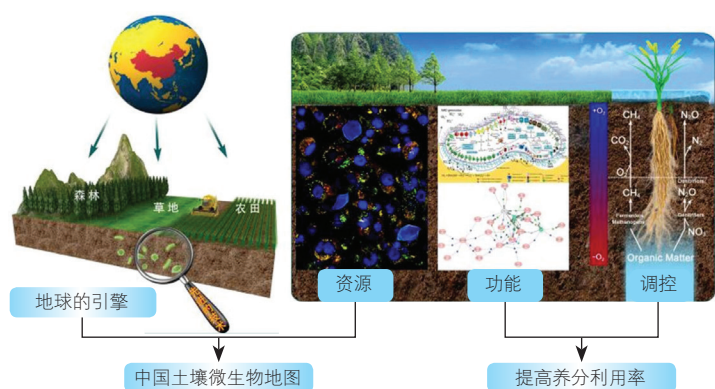


图1 “土壤-微生物系统功能及其调控”先导专项任务示意图：瞄准作物养分利用率提升的国家重大需求,创新土壤微生物组研究方法,勾勒中国典型生态系统土壤微生物资源图,定向调控土壤微生物功能

2.1 土壤微生物组资源方面

已完成对中国典型农田、草地和森林的土壤采样工作,行程超过8000 km。(1)评价了当代环境与历史因素对土壤微生物空间分布格局的影响规律,揭示了沿纬度及海拔梯度微生物多样性与植物多样性不同的分布模式;发现在长期施肥管理下,历史因素在农田土壤微生物空间分布中发挥了更加重要的作用,土壤pH能够最大程度解释土壤微生物变异规律,包括微生物类群变异,而在高寒地带,有机碳含量则能更好地解释青藏高原土壤微生物分布格局。(2)定量了干旱程度对土壤微生物群落分布的影响规律,分析了干旱程度驱动土壤细菌群落的变化规律,解析了其在导致生态系统氮素循环发生根本性变化过程中的重要作用,发现北方草地区域氮循环在干燥度 $AI=0.32$ 处存在拐点,对于干旱程度呈非线性响应,而在干旱区域($AI<0.32$),土壤硝化细菌和反硝化细菌数量随干燥度指数增加而增加,并且发现在极度干旱条件下土壤微生物多样性剧烈下降。

2.2 土壤微生物组功能方面

(1)发现厌氧氨氧化不仅是湿地和土壤系统中的重要过程,而且是稻季土壤氮素损失的重要途径,其中根际氮损失是发展氮肥高效利用技术的热点微域;同时发现了厌氧氨氧化与铁氧化还原的耦合机制。(2)在土壤碳转化的微生物驱动机制方面,通过比较新石器时期的古水稻土(6300年耕作史)和现代水稻土,发现

长期耕作导致土壤微生物结构发生明显改变,但水稻土微生物组向功能均质化演化,特别是土壤营养元素生物地球化学循环相关的生态功能,有利于增强土壤活性和加快养分转化,提高水稻产量;进一步发现高浓度甲烷刺激下,干湿交替水稻土能氧化低浓度大气甲烷,而传统甲烷氧化菌在其中发挥了重要作用,这为开展野外观测实验,准确估算我国温室气体排放清单提供了重要依据。

2.3 土壤微生物组调控方面

(1)定量分析了典型农田土壤碳氮转化微生物群落演替规律,发现长期施用有机肥促进红壤大团聚体中线虫—微生物的交互作用,从而提高氮素转化能力。

(2)筛选出氮磷高效的水稻品种,通过气孔调控,可提升水稻C同化能力和蒸腾拉力,揭示了促进N、K养分增效的分子调控模式;发现水稻根系质子分泌、ABA含量和生长素转运速率是应答土壤磷匮乏环境的核心,优化施磷与水分调控耦合可促进水稻根系下扎、提高磷素利用率。(3)发现潮土免耕可维持较高丛枝菌根真菌多样性、侵染率和玉米磷利用效率,高磷土壤接种丛枝菌根真菌降低蔬菜对磷肥的需求量,阐明了“高磷育苗、低磷种植”显著提升菜地磷肥利用效率的生物学机制。

2.4 土壤微生物组的新技术及其应用方面

(1)在国际上首次实现了纳升(nL)级别的单细胞扩增体系,降低成本100倍,构建了首台基于拉曼光谱的活体单细胞筛选设备,申报了相关专利,获得中科院孵化400万元天使投资推广。(2)建立了土壤属性空间数据库与土壤微生物组整合分析平台,为深度发掘与调控土壤微生物组资源提供了技术支撑。(3)开发了稳定性同位素示踪标记物方法。建立了稳定性同位素示踪土壤微生物各种分子标记物,如氨基糖(AA)、磷脂脂肪酸(PLFA)和核酸(DNA/RNA),高通量测序微生物多样性的技术平台,为国内外上百个科研用户提供了实质性支撑,组织相关技术研讨会暨培训班12次,共

计 16 个国家/地区的上千名青年科研人员参与活动，打造了国际一流的土壤微生物组研究平台，也为地质、海洋和污染等相关领域的微生物功能研究提供了重要支撑。

3 独创性

（1）理论方面。在国际上首次提出了土壤微生物组的全新理念。土壤微生物组以人类生产生活中的基本需求（如粮食生产、环境保护和生态安全等）为导向，通过原位观测、室内培养、田间试验等技术手段，研究不同时间和空间尺度下土壤微生物与环境、生物与生物之间的相互作用规律及其功能意义。研究的技术主要包括宏基因组、转录组、蛋白组和先进的物理化学及计算分析手段。

（2）方法方面。创新性提出了全链条土壤标志物示踪方法，针对土壤生物各种特征指示物包括 AA、PLFA 和 DNA/RNA，开发了耦合分析技术平台，克服了国际上单一标志物灵敏度和分辨率较低的内在缺陷，为系统研究土壤-微生物-植物系统中关键养分元素转化和高效率利用的微生物调控机制提供了重要的方法学支撑。

（3）技术方面。研制了全球首台活体单细胞拉曼分选仪，是目前已公开文献报道的首台基于细胞拉曼指纹图谱的细胞手动和自动分选仪器。该分选仪可实现单细胞拉曼图谱快速采集，并首次将单细胞的拉曼信号采集时间缩短至 1—100 毫秒；可同时完成基于拉曼图谱的细胞种类及生长状态快速鉴别的多任务。该仪器已在国内相关研究所开展了应用示范并取得了良好效果，不仅在土壤微生物组研究方面具有巨大潜力，也在生物能源种质筛选、食品微生物检测、药物筛选和环境污染生物指示监控等方面具有广阔前景。

4 国内外影响

专项的实施显著推动了我国在土壤微生物及相关领域的国际地位，迄今发表论文 200 余篇，约 1/3 的论文被土壤学、微生物学、生态学、农学

和全球变化等学科的权威期刊发表，在包括 *Nature Communications* 和 *PNAS* 等著名的综合性刊物发表了系列论文，产生了重要的国际影响；2016 年组织国际顶级专家举办了首届土壤微生物高端学术论坛，我国科学家正在牵头组织 2017 年第二届全球土壤生物多样性大会，包括美国科学院院士在内的著名科学家认为中国土壤微生物组研究已经成为国际上一支不可或缺的重要力量，将改变国际土壤微生物组的世界格局。

专项实施过程中，联合中科院、农业部、环保部、中国科协和联合国环境规划署举办了“土壤与生态环境安全”高层论坛，专项在国民经济建设中的重要作用得到了国内主流媒介包括中央电视台（CCTV1《晚间新闻》、CCTV13《新闻直播间》）、人民网、新华网、凤凰网等多家媒体的跟踪报道。专项核心骨干主持了我国土壤生物学 30 年学科发展与规划，完成了国家自然科学基金委《土壤生物学 30 年》的发展与总结战略报告写作；参与了中科院-国家基金委组织的土壤生物学发展战略研究，推动了《土壤生物学前沿》和《土壤生物学—中国学科发展战略》的编撰和出版工作。

专项的实施推动了我国在土壤学及相关领域人才队伍的快速成长，已获得国家杰出青年基金在内的国家级人才 12 人次，朱永官研究员获得发展中国家科学院（TWAS）农业科学奖，入选 2016 年度汤森路透全球高被引科学家名录，是我国环境生态学领域仅有的两位科学家之一；沈仁芳研究员当选东亚及东南亚土壤科学联合会主席。专项核心骨干团队在土壤氮素转化的微生物驱动机制方面产生了重要国际影响，根据 2015 中美科研实力的研究前沿分析，生态学和环境科学领域全球共计 11 个国际前沿中，土壤微生物组是我国 3 个入选前沿之一。

5 产业推进意义

“土壤微生物系统功能及其调控”先导专项的实施，是我国“十三五”规划“藏粮于地、藏粮于技”的重要内容，已经对我国农业和环境相关产业发挥了明显

的促进作用。推动了2项国家重点研发计划的设立与实施。专项核心骨干承担了“化学肥料和农药减施增效综合技术研发”试点专项、参与了“粮食丰产增效科技创新”重点专项等重大任务，将为建立可持续发展的现代农业体系提供重要理论和技术支撑。

2013年12月，美国政府出版了《微生物养活世界》一书，强调土壤微生物调控能够实现作物增产20%，减少20%的化肥与杀虫剂的农业投入，是未来环境友好、经济可行的绿色农业新出路。国际著名的孟山都农业生物技术公司也正在开发相关微生物组制剂，旨在改变传统的农业增产模式（地上部分植物农业性状改良的单一研究和生产），更多发挥地下微生物功能并提高土壤肥力和生产力。专项的实施将有力推动我国相关产业的快速发展。

专项的实施不仅具有重要的农业环境意义，同时为医疗健康、工业生产等方面的产业提供了重要的参考。

土壤微生物被认为是地球最大的基因资源库，蕴藏着难以估量的活性物质，在医药卫生、畜牧饲料、农化用品等应用方面具有广阔的应用前景。美国瓦克斯曼是第一位获得诺贝尔奖的土壤微生物学家，他创新了微生物分离培养技术，首先定义了抗生素（antibiotic）的基本概念，发现了活性物质链霉素；而日本科学家大村智则从土壤微生物中发现了伊维菌素活性物质，在治疗河盲症和象皮病方面发挥了巨大作用，并于2015年获诺贝尔生理学或医学奖。以美国为代表的发达国家正在积极筹划国家微生物组计划，力图形成跨学科交叉科学前沿的战略高地。“土壤微生物系统功能及其调控”先导专项的实施，为我国进一步开展跨学科、跨行业的微生物组计划提供了先行先试经验，更好地发挥微生物系统在污染环境修复、人体健康和生物制造等方面的重要作用。

（依托单位：中科院南京土壤所）

专家点评

土壤微生物组对于人类健康、食品安全、生态和环境可持续发展具有极为重要的作用。“土壤微生物系统功能及其调控”先导专项与世界一些大型计划具有互补性，同时具有非常重要的特色和优点，它拥有更大的研究尺度，更多的学科交叉，在新技术开发和应用研究方面处于国际最前沿，并在一些关键领域，非常高效地将基础研究和应用需求紧密结合。该专项的创新性和论文水平都非常高，在土壤微生物组的基础研究和社会需求方面，将会改变相关的国际研究格局并成为引领者。

点评专家

James M. Tiedje 美国科学院院士，美国密西根州立大学杰出教授。美国爱荷华州立大学农学学士、康奈尔大学生物化学和土壤微生物学双博士。长期从事土壤微生物学研究。曾任美国能源部科学顾问、美国环保署科学委员会主席、美国微生物学会主席，国际微生物生态学会主席等，曾获联合国国际微生物学杰出贡献Finley

奖等。国际微生物生态学会创始人，国际微生物生态学的开拓者，革命性地创新了现代微生物学的分子生态分类策略并制定了国际通用标准，在微生物生态学理论和实践方面取得了突出成果，是过去30年国际微生物组研究的主要引领者。迄今发表论文500余篇，被引70 000余次，H指数为134。

专家点评

土壤微生物组不仅为植物提供可利用的养分，确保粮食生产安全，也是元素循环的调节器，在生态和环境可持续发展中发挥着关键作用。揭秘土壤微生物组是现代农业、环境可持续发展以及国际土壤学需要解决的主要挑战之一。

“土壤微生物系统功能及其调控”先导专项在这一全新的领域发挥着关键作用，开发了新的技术以揭示令人难以想象的巨大微生物多样性。尤为重要的是，土壤微生物组计划涵括了数量众多的大尺度研究并获得了宝贵的数据资源，为理解土壤微生物组调控的关键元素转化作出了重要贡献，在土壤有机质和养分转化等方面取得了突出成果，特别是其技术创新具有巨大的应用潜力，可为提升作物养分利用率并发展相关应用示范技术提供重要指导。

“土壤微生物系统功能及其调控”先导专项已经产生了重要的国际影响。联合国际著名专家，举办了系列高端学术研讨会，探索了更加灵活的国际合作模式。专项创造的新知识不仅有利于解决中国面临的问题，也将帮助国际同行更好地管理土壤，保护资源。如减少不可再生磷矿资源的过度开发；降低农业生产对大量氮肥施用的依赖性，消除化肥施用不当对环境的负面影响。这些高水平的国际合作与交流将对全球研究的利益最大化起到重要作用，也显著促进了中国优秀青年人才的成长，他们在不久的将来将成为国际土壤微生物组的重要推动者和领导者。

总体而言，中国微生物组计划的实施，使得中国科研人员在相关领域处于一个重要的位置，成果显示度将会持续增强，而新知识的应用则具有极为重要的经济和社会发展意义。

点评专家

Sally E. Smith 澳大利亚科学院院士，阿德莱德大学杰出教授。英国剑桥大学生物学学士、博士，长期从事土壤真菌和植物共生研究。曾任世界蔬菜中心亚太研发中心副主任、澳大利亚科学院执委等，获新南威尔士皇家学会Clarke奖、土壤学泰勒金奖等，被澳大利亚科

学院评价为土壤真菌和植物领域的世界权威。迄今发表论文200余篇，与David Read教授合作出版了*Mycorrhizal Symbiosis*（《真菌共生》）专著，被认为是国际真菌共生学领域最权威的教科书。