

学术引领系列



国家科学思想库

# 地球科学学科前沿丛书

# 土壤生物学前沿

贺纪正 陆雅海 傅伯杰 主编



科学出版社

学术引领系列



国家科学思想库

# 地球科学学科前沿丛书

# 土壤生物学前沿



贺纪正 陆雅海 傅伯杰 主编

科学出版社

北京

**图书在版编目(CIP)数据**

---

土壤生物学前沿/贺纪正, 陆雅海, 傅伯杰主编. —北京: 科学出版社,  
2014. 11

(地球科学学科前沿丛书)

ISBN 978-7-03-042431-0

I. ①土… II. ①贺…②陆…③傅… III. ①土壤生物学-研究 IV. ①S154

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 261794 号

---

责任编辑: 侯俊琳 牛 玲 文 茜 / 责任校对: 胡小洁

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 无极书装

编辑部电话: 010-64035853

E-mail: houjunlin@mail.sciencep.com

**科学出版社 出版**

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

**中国科学院印刷厂 印刷**

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 1 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张: 32 ½

字数: 540 000

**定价: 168.00 元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 地球科学学科前沿丛书

## 编委会

主 编：陈 颢

副主编（以姓氏笔画为序）：

石耀霖 戎嘉余 吴国雄

周卫健 傅伯杰

编 委（以姓氏笔画为序）：

刘丛强 刘嘉麒 杨元喜

张 经 郑永飞 姚檀栋

贾承造 郭华东 陶 澍

符淙斌 焦念志 翟明国

穆 穆

## 丛书序

随着人类经济社会以及地球科学自身的快速发展，社会发展对地球科学的需求越来越强烈，地球科学研究的组织化、规模化、系统化、数据化程度不断提高，地球科学的研究越来越依赖于技术手段和研究平台的进步，地球科学的发展日益与经济社会的强烈需求紧密结合。深入开展地球科学的学科发展战略研究与规划，引导地球科学在认识地球的起源和演化以及支撑社会经济发展中发挥更大的作用，已成为国际地学界推动地球科学发展的重要途径。

地球科学在我国经济社会发展中发挥着日益重要的作用，妥善应对我国经济社会快速发展中面临的能源问题、气候变化问题、环境问题、生态问题、灾害问题、城镇化问题等的一系列挑战，无一不需要地球科学的发展来加以解决。大力促进地球科学的创新发展，充分发挥地球科学在解决我国经济社会发展中面临的一系列挑战，是我国地球科学界责无旁贷的义务。而要实现我国从地球科学研究大国向地球科学强国的转变，必须深入研究地球科学的学科发展战略，加强地球科学的发展规划，明确地球科学发展的重点突破与跨越方向，推动实现地球科学发展的一些领域率先进入国际一流水平，才能更好地解决我国经济社会发展中的相关问题和维护国家的发展权益。为此，中国科学院学部自2010年开始，在以往开展的学科发展战略研究的基础上，在一些领域和方向上重点部署了若干学科发展战略研究项目，持续深入地开展相关学科发展战略研究。根据总体要求，中国科学院地学部常委会已研究部署了十余项战略研究项目，内容涉及大气、海洋、地震、环境、土壤、矿产、油气、空间等多个领域。这些战略研究深刻分析了相关学科的发展态势和发展现状，提出了相应学科领域未来发展的若干重大科学问题，规划了相应学科未来十年的优先发展领域和发展布局，取得了较好的研究成果。

为系统梳理学科战略研究成果，推动地球科学的研究和发展，中国科学院

地学部常委会决定，自2014年起，在常委会自主部署的学科发展战略项目中，每年选择1~2个关注地球科学学科前沿的战略研究成果，以“地球科学学科前沿丛书”形式公开出版。这些公开出版的学科战略研究报告，重点聚焦于一些蓬勃发展的前沿领域，从21世纪国际地球科学发展的大背景和大趋势出发，从我国地球科学发展的国家战略需求着眼，深刻洞察国际上本学科发展的特点与前沿趋势，特别关注相应学科领域和其他学科领域的交叉融合，规划提出学科发展的前沿方向和我国相应学科跨越发展的布局建议，有力推动未来我国相应学科的深入发展。

期望通过地球科学家们的不断努力，对我国地球科学未来10~20年的创新发展发挥引领和促进作用，推动我国地球科学相关领域跻身于国际前列。同时期望本系列战略报告的出版，对广大科技工作者触摸和了解科学前沿、认识和把握学科规律、传承和发展科学文化、促进和激发学科创新有所裨益，共同促进我国的科学发展和科技创新。

中国科学院地学部主任 陈 颢

2014年6月

# 前 言

土壤是人类赖以生存的物质基础，是具有生命的历史自然体。土壤生物是物质（元素）转化的主要驱动者，是土壤生态系统的核心，深刻影响着土壤质量。土壤生物是维系陆地生态系统地上-地下相互作用的纽带，支撑陆地生态系统过程和功能，在全球物质循环和能量流动过程中发挥着不可替代的作用。土壤生物可以通过影响土壤-植物系统中污染物的迁移转化、病原菌及抗生素抗性基因的存活与传播而最终影响人体健康。不仅如此，由于土壤是地球关键带的关键组分，影响水圈、大气圈、生物圈和岩石圈的物质循环和平衡。土壤生物作为生物地球化学过程的引擎，驱动土壤圈与其他各圈层之间发生活跃的物质交换和循环，在全球环境变化中也扮演着重要的角色。因此土壤生物学是现代土壤学研究的重点和前沿领域之一。

然而，长期以来由于土壤生物系统的复杂性和土壤生物学研究技术手段的限制，人类通过分离培养手段所认识的土壤微生物种类不足总量的1%，制约了人们对土壤生物组成和多样性的理解及其功能的挖掘。近年来，高通量测序、原位表征等新技术的发展和应用于土壤生物学的研究注入了新的活力，并取得了诸多重要进展。这些进展为土壤生物功能的挖掘与利用奠定了基础，使土壤地力和生产力的提升成为可能，并在生物地球化学循环的微生物机制和生态系统地上-地下的协同调控方面孕育着重大突破。

鉴于土壤生物学在农业可持续发展、生态环境保护和全球变化研究中的重要作用，以及学科迅速发展的特点，需要深入分析该学科的国际发展趋势和前沿，结合国家战略需求，提出我国土壤生物学的发展战略目标、未来发展的重点方向和优先领域。2012年，中国科学院地学部启动了土壤

生物学学科发展战略研究项目，2013年纳入了国家自然科学基金委员会—中国科学院学科发展战略研究。自项目启动以来，项目组经过认真分析和讨论，系统总结了土壤生物学研究的国际前沿，凝练了研究重点，明确了研究方向。

本书共7篇20章，主要内容包括：第一篇：总论（土壤科学发展态势和前沿、土壤生物学基础研究前沿）；第二篇：土壤生物与土壤肥力；第三篇：土壤生物与全球变化；第四篇：土壤生物与环境污染；第五篇：土壤生物相互作用；第六篇：土壤生物学多学科交叉研究前沿；第七篇：土壤生物学研究的新技术与平台。各章撰写人分别为：第一章：沈仁芳、董晓英、吴金水、赵方杰、李忠佩；第二章：吴金水、魏文学、陈彩艳、葛体达、陈香碧；第三章：张旭东、何红波、李忠佩；第四章：贺纪正、朱永官、张丽梅、陈正、孙国新、刘玉荣；第五章：陆雅海；第六章：傅声雷、杨云锋、刘占锋；第七章：褚海燕；第八章：李芳柏、胡敏、罗春玲、陈曼佳、于焕云；第九章：赵方杰、陈保冬、朱永官；第十章：徐建明、汪海珍、姚志远、苏建强、朱永官；第十一章：朱永官、乔敏、李小方、邓欢；第十二章：施卫明、韦革宏、陈保冬、张瑞福、陆玉芳；第十三章：胡锋、刘满强、陈小云、傅声雷；第十四章：张斌、吴金水；第十五章：徐建明、李芳柏、何艳、刘同旭、袁勇；第十六章：黄巧云、吴华勇；第十七章：贺纪正、郑袁明、曹鹏；第十八章：黄志群、何红波、张旭东、贾仲君、陆雅海；第十九章：贾仲君、陆雅海、周集中、杨云峰、邓晔；第二十章：傅声雷、胡锋、贾仲君、刘占锋、刘满强。全书由傅伯杰、贺纪正、陆雅海、张丽梅统稿。这些作者来自中国科学院所属相关研究所、中国农业科学院、北京大学、清华大学、浙江大学、南京农业大学、华中农业大学、西北农林科技大学、福建师范大学、广东省生态环境与土壤研究所等单位，多为我国土壤学、特别是土壤生物学领域的中青年学术带头人，活跃在国际土壤生物学舞台上，具有较为宽阔的视野和扎实的研究基础。本书不仅体现国际土壤生物学研究的前沿，也包括了作者们的最新研究成果，可作为从事土壤学、环境科学和生态学研究的相关专家和研究生参阅的专业文献。

本书在讨论和编撰过程中，得到了国家自然科学基金委员会地球科学部宋长青、冷疏影的指导和帮助，得到了中国科学院学部工作局生命地学办公室的大力支持。中国科学院生态环境研究中心、城市环境研究所、南京土壤研究所、亚热带农业生态研究所和水土保持研究所支持了项目的实



施和多次研讨会，在此表示衷心的感谢。

土壤生物学是一个快速发展的前沿学科，涉及多个学科领域，由于编著者水平有限，书中难免存在一些不足之处，敬请读者批评指正。

傅伯杰

2014年7月

# 目 录

丛书序/i

前 言/iii

## 第一篇 总 论

第一章 土壤学学科发展态势和前沿..... 3

第一节 土壤科学研究现状 ..... 4

第二节 土壤学研究前沿 ..... 19

主要参考文献 ..... 25

第二章 土壤生物学基础研究前沿 ..... 29

第一节 土壤微生物群落 ..... 29

第二节 土壤生物系统网络 ..... 36

第三节 土壤生物系统计量学 ..... 40

第四节 前沿与展望 ..... 47

主要参考文献 ..... 50

## 第二篇 土壤生物与土壤肥力

第三章 土壤微生物与土壤有机质转化 ..... 57

第一节 土壤微生物与底物代谢 ..... 57

第二节 碳氮耦合作用与激发效应 .....	65
第三节 土壤微生物与有机组分转化 .....	67
主要参考文献 .....	70
<b>第四章 土壤微生物与生源要素循环 .....</b>	<b>73</b>
第一节 土壤微生物与氮循环 .....	73
第二节 土壤微生物与磷循环 .....	82
第三节 土壤微生物与铁循环 .....	86
第四节 土壤微生物与硫循环 .....	94
主要参考文献 .....	97

### 第三篇 土壤生物与全球变化

<b>第五章 土壤温室气体产生和转化的微生物机制 .....</b>	<b>107</b>
第一节 二氧化碳 .....	108
第二节 甲烷 .....	111
第三节 氧化亚氮 .....	116
第四节 国内外重要研究计划的启示与研究展望 .....	118
主要参考文献 .....	123
<b>第六章 土壤生物对全球变化的响应 .....</b>	<b>129</b>
第一节 土壤生物对气候变化的响应 .....	130
第二节 土壤生物对土地利用变化和生物入侵的响应 .....	137
第三节 研究展望 .....	140
主要参考文献 .....	141
<b>第七章 全球变化敏感区域土壤生物学问题 .....</b>	<b>146</b>
第一节 高寒生态系统 .....	147
第二节 干旱半干旱生态系统 .....	158
第三节 研究展望 .....	168
主要参考文献 .....	169

## 第四篇 土壤生物与环境污染

第八章 土壤有机污染物的微生物降解 .....	179
第一节 有机污染物降解的代谢途径与分子机制 .....	180
第二节 有机污染物降解的微生物耦合机制 .....	188
第三节 有机污染土壤的根际修复 .....	193
第四节 研究展望 .....	196
主要参考文献 .....	200
第九章 土壤重金属的微生物转化与污染修复 .....	208
第一节 微生物介导的土壤重金属转化 .....	209
第二节 土壤重金属污染对微生物区系及功能的影响 .....	223
第三节 研究展望 .....	226
主要参考文献 .....	227
第十章 土壤生物污染与控制 .....	234
第一节 土壤中病原微生物的存活及影响因素 .....	236
第二节 土壤中病原微生物的迁移及风险 .....	253
第三节 土壤生物污染控制 .....	257
第四节 研究展望 .....	260
主要参考文献 .....	261
第十一章 土壤污染的生物诊断与生态风险评价 .....	265
第一节 土壤污染的生物诊断 .....	265
第二节 基于生物测试的污染土壤生态风险评价 .....	280
第三节 研究展望 .....	283
主要参考文献 .....	284

## 第五篇 土壤生物相互作用

第十二章 植物-微生物根际互作 .....	291
第一节 根际概述 .....	291

第二节	典型的根际互作过程 .....	292
第三节	根际互作信号分子 .....	306
	主要参考文献 .....	318
<b>第十三章</b>	<b>土壤动物及其生态功能</b> .....	<b>327</b>
第一节	土壤动物-微生物相互作用与食物网 .....	328
第二节	土壤动物的主要生态功能及作用机制 .....	332
第三节	研究展望 .....	340
	主要参考文献 .....	343
<b>第六篇 土壤生物学多学科交叉研究前沿</b>		
<b>第十四章</b>	<b>土壤生物与土壤物理</b> .....	<b>351</b>
第一节	土壤结构异质性和生物多样性 .....	356
第二节	土壤物理和生物学过程互作 .....	358
第三节	土壤生物物理过程模拟 .....	362
第四节	研究展望 .....	364
	主要参考文献 .....	365
<b>第十五章</b>	<b>土壤生物与土壤化学</b> .....	<b>369</b>
第一节	土壤生物与物理化学 .....	371
第二节	土壤生物与电化学 .....	378
第三节	研究展望 .....	384
	主要参考文献 .....	385
<b>第十六章</b>	<b>土壤微生物与矿物相互作用</b> .....	<b>389</b>
第一节	微生物-矿物界面作用机制 .....	389
第二节	生物成矿与矿物风化 .....	395
第三节	研究展望 .....	398
	主要参考文献 .....	399
<b>第十七章</b>	<b>土壤微生物地理学</b> .....	<b>402</b>
第一节	土壤微生物的分布格局及其多样性 .....	403

第二节 土壤微生物分布的驱动机制 .....	408
第三节 研究展望 .....	411
主要参考文献 .....	412

## 第七篇 土壤生物学研究的新技术与平台

第十八章 质谱与光谱技术 .....	420
第一节 核磁共振 .....	421
第二节 标识物质谱 .....	424
第三节 纳米二次离子质谱 .....	435
第四节 研究展望 .....	443
主要参考文献 .....	445
第十九章 分子生物学技术 .....	448
第一节 稳定性同位素探针技术 .....	450
第二节 组学技术 .....	460
第三节 单细胞技术 .....	470
第四节 生物信息学 .....	479
第五节 研究展望 .....	483
主要参考文献 .....	485
第二十章 野外研究实验平台 .....	493
第一节 现有土壤生物学研究相关的野外实验平台 .....	494
第二节 平台建设展望 .....	503

## 第一篇 总 论

土壤是集生物、物理、化学及地质过程于一体的地球表层，是支持生命系统的基础。现代土壤科学整合了跨越大范围的空间和时间尺度相互作用的物理、化学和生物过程，是门多学科交叉的学科。土壤科学不仅要寻找研究前沿，还要把研究与重要的社会和全球性问题相关联，如粮食安全、可持续发展、气候变化和水资源等。目前所面临的粮食安全和环境污染等方面的问题，以及节能减排和生态保护等方面的要求，促使土壤学各分支学科的研究都在不断向前推进，并且与其他学科交叉融合。作为土壤科学和生命科学的交叉发展领域，土壤生物学是现代土壤科学的研究热点和前沿，随着分子生物学和现代分析测试技术的广泛引入，土壤生物学的研究进入了一个新的发展阶段，成为各学科交叉融合的活跃场所，并将极大地促进传统土壤学向现代土壤学理论的转变。

在当前能源紧缺的形势下，土壤科学面临的一个挑战是：如何在兼顾粮食安全与生态和环境可持续发展的前提下建立和维持高的土壤肥力？土壤生物种类丰富、数量巨大，参与土壤有机质的分解与合成、养分的释放与固定等过程，与土壤团聚体的形成及污染物的降解等密切相关，因而在可持续农业、环境保护和资源开发等方面发挥着重要作用。重建土壤生物过程是获得持续食品供应和环境

安全的关键所在，只有土壤的生物多样性得到修复才能确保生物系统的复苏。但是，土壤生物的研究落后于植物的研究，主要因为土壤是一个“黑箱”，其研究方法缺乏准确性和标准化，并缺乏严格设计的野外控制试验。因此本篇分2章分别综述了土壤学和生物学基础的研究现状，探究其发展态势及研究前沿，以期加深广大土壤科学工作者对土壤和土壤生物学的系统了解，促进土壤科学的进步。本篇中，第一章指出了当前土壤科学首要的挑战是土壤资源的价值评估及不同空间和时间尺度研究的整合；当前土壤科学需要重视对土壤的生态系统服务功能、土壤在保持人类健康中的作用、土壤中物质迁移过程及植物-土壤-微生物界面的基础研究，并加强现有数据库的组织 and 标准化、新技术与新方法的应用及加强跨学科合作。第二章着重阐述了土壤微生物研究的现状和前沿，以及土壤生物关联机制和土壤生物与生物过程计量等两个土壤生物学的热点问题的研究现状、发展态势和前沿，指出：生物新技术的发展促进了土壤生物学研究的快速发展，土壤生物系统组成与结构、土壤关键功能群、土壤生物系统稳定机制与区域分布规律及土壤生物系统结构与生态功能模型的研究是土壤生物学研究前沿；土壤生物系统的研究需要关注土壤生物互作体系和土壤生物信号网络的构建，关注典型土壤生物信号分子的合成、信号转导、代谢调控过程的研究，关注土壤生物互作及信号交换对生态环境变化的响应和影响；注重土壤生物系统计量学基本理论、土壤生物种群及其相互关系的定量、土壤生物系统关键过程的定量、土壤病原生物暴发与主控条件的定量，以及土壤生物系统与关键过程计量学模型构建。



## 第一章

# 土壤学学科发展态势和前沿

土壤是地球的皮肤，是地球表层系统最活跃和最重要的组成部分，既是地球各圈层间物质循环与能量交换的枢纽，又是各圈层相互作用的产物 (Baveye et al., 2012)。土壤支持着地球主要生命过程，保持着生态系统的平衡，提供着人类必需的食物，它在当今粮食安全保障和生态环境建设等方面发挥着不可替代的重要作用 (Zhu, 2009; Robinson et al., 2012)。

土壤也是地球上最复杂的生物物质 (Young and Crawford, 2004; Pepper et al., 2009)。发生在地球表面的生物地球化学过程影响着全球的气候变化、粮食供给和安全性、地球的承载容量及湿地功能，其与土壤退化及修复、营养物质和污染物的迁移及转化、水土保持、土壤和水资源的质量等许多有关土壤和水资源的管理及保护问题直接关联 (Sugden et al., 2004; Powlson et al., 2011b)。人口压力及与之相关的土地利用变化导致全球土壤资源的负担越来越重，在一些地区，有些土壤退化已经濒临不可挽回的状况，危及子孙后代的生存 (Kaiser, 2004; Zhao et al., 2011)。

在我国，长期以来土壤被看做农业资源的一部分，由于近年来作物的产量维持着平稳态势，其受到关注相比其他资源（如水和大气）要少得多。纵观国内外，土壤都是一种被低估了的资源，而土壤学则是一门被低估了的科学。当前，国际社会均面临资源紧张、能源短缺、环境污染和气候变化等重大挑战，土壤科学将在地力改善和作物生产力提高、国土规划整治、区域环境治理和污染环境修复、生态系统退化防治及应对气候变化等方面发挥越来越重要的作用。可以说，没有土壤科学的进步，就不可能保证我国农业可持续发展和粮食安全，实现国土生态安全和环境安全，也就不可能保障人类生活与健康。土壤科学家有必要让公众知晓土壤在维持作物产量以外的，尤其是在维持水的质量和可利用性方面的功能。必须了解与生态系统服务相关的土壤功能，以及这些功能怎么被退化条件、管理技术和固有的土壤特性等因素所影响。为了更好地