

DOI: 10.11766/trxb202006240330

沈仁芳, 颜晓元, 张甘霖, 滕应. 新时期中国土壤科学发展现状与战略思考[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1051-1059.

SHEN Renfang, YAN Xiaoyuan, ZHANG Ganlin, TENG Ying. Status Quo of and Strategic Thinking for the Development of Soil Science in China in the New Era[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1051-1059.

新时期中国土壤科学发展现状与战略思考*

沈仁芳¹, 颜晓元¹, 张甘霖¹, 滕应²

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2. 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要: 土壤科学在保障国家农业可持续发展和生态文明建设中具有重要的学科战略地位。本文全面扼要分析了国内外土壤科学研究现状和发展态势, 结合未来土壤科学发展的国家战略需求与关键科学问题, 梳理了未来 5~10 年我国土壤科学拟重点发展地球关键带过程与土壤功能演变、农田土壤健康与质量提升理论与技术、区域土壤复合污染过程与绿色修复、土壤生物过程与功能等优先领域和重要方向, 以期进一步推动我国土壤科学跨越式发展。

关键词: 新时期; 土壤科学; 研究发展; 战略思考

中图分类号: X53 **文献标志码:** A

Status Quo of and Strategic Thinking for the Development of Soil Science in China in the New Era

SHEN Renfang¹, YAN Xiaoyuan¹, ZHANG Ganlin¹, TENG Ying²

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. CAS Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Soil science plays an important strategic role in ensuring sustainable development of the agriculture and the construction of ecological civilization in China. This paper briefly reviews the status quo and development trend of soil science research at home and abroad, analyzes national strategic needs and key scientific issues of the research on soil science in the future, and collates priority aspects and key strategic directions of the soil science of China over the next 5-10 years, such as earth's critical zone process and evolution of soil functions, theories and technologies for improvement of farmland soil health and quality, regional soil mixed pollution processes and green remediation, soil biological process and function, in an attempt to further promote leaping development of the soil science in China.

Key words: New era; Soil science; Research and Development; Strategic thinking

土壤是联接大气圈、水圈、岩石圈和生物圈的基础、地球表层元素生物地球化学循环发生的主要场所, 是陆地生态系统存在、演变和发展的物质基础、保护人类生存的自然历史体, 支撑着陆地生态

* 国家杰出青年科学基金项目(41025005)资助 Supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 41025005)

作者简介: 沈仁芳(1965—), 男, 浙江萧山人, 研究员, 主要从事土壤-植物营养方面研究。E-mail: rfshe@issas.ac.cn

收稿日期: 2020-06-24; 收到修改稿日期: 2020-07-13; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-07-27

系统中的生命过程。当前,全球面临着土壤资源短缺、环境污染加剧、生态系统退化、自然灾害频发和气候变化等重大挑战,严重威胁着经济社会可持续发展、生态环境安全和人体健康,如何协调发挥土壤的生产功能、环境保护功能、生态工程建设支撑功能和全球变化缓解功能,成为现代土壤学为人类社会可持续发展作贡献的重要任务^[1-2]。

土壤学是研究自然条件和人为利用下土壤组成、性质、过程及功能,揭示土壤自身发生、演替、空间分布和动态变化及其与地表圈层系统的相互作用规律,并为土壤资源利用、保护和可持续管理提供科学依据的学科。当前,随着人类对土壤资源保护利用的持续认知,土壤学的研究范畴延伸到地球表层系统科学、生态和环境科学、全球变化和可持续发展科学,拓展了对土壤环境功能和生态功能的认识,土壤学的研究内涵也在发生深刻演变。经过 170 多年的发展,土壤科学吸纳了物理、化学、数学、生物学等相关学科的理论、方法及技术,研究内容不断丰富,由早期定性描述性研究发展为系统观测与定量实验研究,以多组分、多形态和多尺度物质迁移和转化为核心,以土壤多过程和多功能为重点的土壤学学科理论、研究方法和技术体系的系统性科学^[3]。土壤学在当今世界土壤资源管理、农业可持续发展与生态环境治理等领域中发挥着不可替代的作用。本文拟扼要分析国内外土壤科学发展现状与态势,结合我国土壤学科发展需求和关键科学问题,梳理了未来 5~10 年土壤科学战略发展的优先研究领域与重要方向,可供土壤科学工作者参考,以期进一步推动我国土壤科学跨越式发展。

1 国际土壤科学发展现状与态势

随着国际土壤科学的发展,其学科地位不断提升。国际土壤学会 (ISSS) 升格为国际土壤学联合会 (IUSS), 并成为国际科联的独立成员,充分反映了国际土壤学的学科地位和发展形势。目前,国际土壤学联合会设有土壤时空演变、土壤性质与过程、土壤利用与管理、土壤在社会及环境中应用等 4 个部门 (Division), 总共分设了 22 个下属专业委员会 (Commission)。同时,还设立了若干工作组 (Working Group), 来吸纳和推进交叉学科的土壤学研究。2013 年 12 月第 68 届联合国大会正式通过决

议,将 2015 年定为“国际土壤年”,主题为“健康土壤带来健康生活”。目前,国际上十分关注土壤安全议题,解决与土壤相关的国际共同关注的重大问题,以提高对土壤资源的可持续管理能力,满足人类对粮食、燃料和纤维生产的需求,促使土壤生态系统功能更好地适应当前和未来的气候变化^[1-4],因此在联合国可持续发展目标 (SDG) 中土壤得到前所未有的重视^[2]。说明土壤学科作为一门自然科学在科学界已达成共识,其应用领域不断扩大的同时重要性也得到了进一步提升。近 20 多年,国际土壤学的发展现状与趋势有如下特征:

1) 土壤服务功能研究进一步拓展,已经从相对单一的生产功能研究进入到生产、环境、生态多目标多功能系统研究阶段

当前,全球土壤正面临着严重的退化问题,威胁着世界粮食安全、生态安全、环境安全。因而土壤服务功能也随之扩展,从传统单一的生产功能发展到生产、环境、生态多目标多功能阶段。2018 年 8 月在巴西召开的第 21 届世界土壤学大会的主题:“Soil Science: Beyond food and fuel-土壤科学:超越食物和燃料”,讨论如何养活一个饥饿的星球,如何为一个能源匮乏的星球生产燃料,如何解决地球上水资源短缺,如何消除地球的污染,如何平衡生物多样性保护与农业生产的可持续土地管理。以 Web of science 核心数据库中 34 份土壤科学期刊为检索范围,从这些主流期刊发文的主题来看,在过去二十多年里世界主要国家的土壤科学服务于作物生产、农业土壤学的基础研究仍然是一个永恒的主题 (图 1),以土壤肥力为中心的土壤养分与元素的转化还是国际土壤科学的研究重点。由于土壤微生物学研究成为国际土壤科学的研究前沿,其关注点转向养分元素的生物地球化学循环过程研究^[5]。随着环境污染治理与缓解全球气候变化的新需求牵引,土壤污染修复和全球变化下土壤碳氮循环研究成为国际土壤科学的研究热点。植物修复作为有效净化污染土壤的绿色环保方法越来越受到重视,且微生物介导的植物根际修复理论与技术的研究成为目前土壤污染治理研究中的生长点。土壤是地球表层系统中最大的碳储库,土壤碳循环研究不断得到重视。一些新的研究主题,比如生物质炭 (biochar) 和生物多样性,由于其在土壤生态功能中的多方面作用,不时涌现并呈爆发式增长态势。可见,近 20 多年来土壤科学研究不仅关注肥力、产量、水

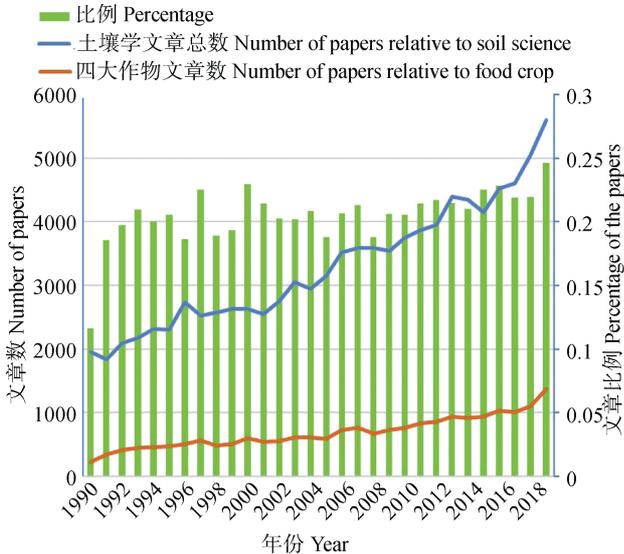


图1 以水稻、小麦、玉米、土豆四大粮食作物为主题的土壤学论文及其占全部土壤学论文的比例(数据来源, Web of Science 34 份土壤学期刊)

Fig. 1 Percentage of the soil science papers with the four staple food crops (rice, wheat, corn and potato) as themes against the total of the soil science papers published

分等传统土壤学的内容,还关注人为活动产生的环境效应等方面,目的是充分发挥土壤的生产功能、环境功能、生态功能,从而实现人类活动和生态环境的协调发展。

2) 土壤形成、过程与演化研究向关键带扩展,成为地球系统科学的组成部分

地球关键带(Earth's Critical Zone)是物质和能量循环最活跃的地球表层系统,土壤圈是关键带最核心的部分,是元素生物地球化学过程最活跃的区域,土壤科学研究关键带土壤的物质形成,与大气、水、生物的交流循环过程,为理解地球表层系统演变和功能提供依据。主要研究内容包括:土壤时空演化与关键带多界面、多尺度、多要素过程耦合关系,关键带重要的生物地球化学过程和驱动机制,关键带结构与水文过程、岩石风化、土壤形成之间的关系,关键带过程对土壤生产力、生态环境安全等功能的影响^[6]。在美国自然科学基金(NSF)资助下,美国境内的关键带研究点由最初的3个流域发展到由10个流域组成的监测网络。在欧盟第七框架资助下,开展了以欧洲各国流域为主体的土壤过程及其功能的联合监测研究。在德国DFG资助下,在德国境内建立了类似于关键带的陆地环境监测网络。这些监测网络覆盖了气候变化和人类活动强度

的梯度,集成了实时监测、控制实验、过程模拟等环节,提供了不同学科相互合作的研究平台。我国生态系统研究网络(CERN)近来也在积极向关键带观测推进。以地球关键带为平台,土壤作为重要的组成部分,近期可深入开展以下几个方面的系统研究:(1)土壤形成发育过程及其元素生物地球化学过程的耦合,(2)多尺度(剖面、坡面、流域和区域)的生态水文过程及其物质迁移转化,(3)多界面(土-水、土-气、土-生、土-岩等)的物理、化学和生物过程相互作用与反馈机制。

3) 新技术、新方法的应用以及长期定位试验成为土壤科学发展的重要手段

近年来,新技术与新方法在土壤研究中的广泛应用,极大促进了土壤科学的发展^[7-9]。在土壤物质形态和性质方面,传统元素稳定性同位素如 ^{13}C 、 ^{14}C 、 ^{15}N 、 ^{32}P 和重金属同位素等用于标记和示踪土壤-生物系统中生命元素循环和污染物转化的生物地球化学过程,尤其在土壤功能微生物识别及其物质代谢过程方面发挥了重要作用;同步辐射技术成功应用于揭示土壤胶体组分与重金属之间的物理、化学、生物界面分子作用机制,而且同步辐射光谱显微镜技术能够详细描述微米和亚微米空间的化学特征,为研究土壤微环境中复杂的生物地球化学过程提供了可能;宇宙射线土壤水分监测(COSMOS)是一种精度较高的大尺度土壤水分含量监测系统;CT技术使土壤结构研究从定性描述走向定量化,推动了土壤结构与水分运动和根系生长等相互耦合研究;模型模拟成为重要的研究工具,可以实现土壤多过程的精细刻画、情景分析、尺度扩展等分析,如在污染物环境行为、水力学过程、水土流失、空间变异预测与制图、碳氮循环与全球变化等方面发挥了重要作用。信息技术结合新的遥感遥测、近地传感与制图技术应用于土壤性质动态变化的监测与制图,不断提高土壤监测的准确性与实时性,尤其是5G技术、物联网技术、高精度遥感遥测技术的发展,将对土壤学科发展产生变革性影响,促进土壤监测朝向智慧化、智能化方向发展。

长期试验研究方法的重要性日益凸显,被赋予了新的生命力,从农田肥料试验走向生态系统试验,从单一试验研究走向整合和网络研究,从土壤过程走向生态系统过程,从土壤圈走向地球关键带系统,并被用于分析全球尺度的土壤变化规律。目前的发

展趋势是土壤过程-生物过程-生态系统过程的系统而连续的观察和监测。通过长期定位观测试验可以揭示土壤微生物区系与生物多样性、长期施肥与土壤肥力的变化、长期耕作措施的土壤保育效果、土壤环境质量的演变规律,以及模型预测结果的验证(图2)。长期土壤生态系统研究已经纳入美国科学基金会的关键带探测网络(Critical Zone Exploration Network),我国也初步形成了中国地球关键带网络的雏形,有望融合到相关国际网络中。

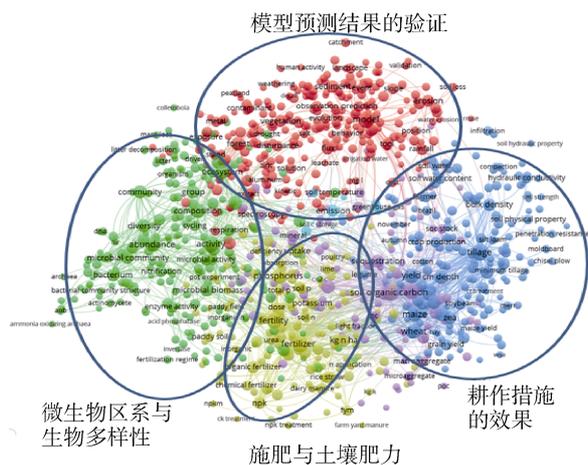


图2 应用长期试验平台的土壤学研究主题词共现关系图

Fig. 2 Soil science key word cooccurrence graph based on the long-term experiment platform

4) 多学科交叉融合研究成为土壤科学发展的重要推动力

随着化学、生物学、物理学等学科的基础理论、方法、技术的进步在土壤科学中的进一步应用,多学科交叉融合成为推动国际土壤科学快速发展的重要动力,土壤学与其他基础科学的渗透融合促进了土壤学研究新方向和分支学科的诞生。化学各分支学科发展为定性和定量研究土壤中养分离离子及污染物形态及其转化提供技术和理论支撑,尤其是近年来原子及分子分析方法的快速发展,为从分子水平研究养分与污染物的界面过程提供了先进手段;化学结构、化学计量与土壤颗粒基本物质分子组成研究内容的交叉和综合形成了土壤分子模拟方向;生物学尤其是分子生物学技术的进步,深化了对土壤微生物所驱动土壤过程的认识,尤其是基于高通量测序的组学技术(基因组学、转录组学、蛋白组学、代谢组学等)打开了土壤微生物的“黑箱”,极大地推动了对土壤中“未知微生物类群及功能的认

识^[9]。生物学参与的土壤物质和过程的研究,衍生出土壤生物物理研究分支学科;微生物学与土壤微形态学的交叉研究派生出土壤微生境和微生态研究方向;数学、地统计学和土壤学的交叉形成了土壤计量学;数字技术、信息技术的发展使得土壤信息系统研究和数字土壤研究成为现实,改变了传统土壤学分析的模糊和定性的形象。在关键带土壤环境过程研究方面,土壤学整合了生物学、水文学、生态学、环境科学、地球化学、地质学、大气科学等知识和技术,大大提升了解释地球各圈层之间交互作用的能力以及对区域土壤环境质量进行综合管理的能力。

5) 社会与公众需求成为土壤科学发展的内在牵引力

全球农业可持续发展和资源生态环境安全面临的现实挑战,对土壤学的需求越来越强烈,极大地牵引了国际土壤科学的发展,也促进了土壤学在各个领域的应用。联合国可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)中就有多个目标对土壤科学的需求提出了明确要求,其中促进可持续农业、保障健康生活、确保可持续消费与生产模式、恢复退化陆地生态系统等,分别涉及土壤质量、土壤污染、土壤健康、土壤退化等方面。在全球资源环境矛盾日益突出的情况下,土壤的生产力及其可持续发展的机理和途径仍然是农业土壤学的一大中心任务^[10]。应对气候变化挑战催生了土壤碳循环研究在全球的兴起,至今一直是国际土壤学的前沿领域;环境污染的全球化背景下,旨在控制持久性有机污染物(POPs)国际公约的签订,使得土壤环境与污染修复成为全球环境科学的热点领域。科学研究的全球化和重大国际科学研究计划,推动了土壤学的全球对比与网络化,如全球土壤信息化对比研究,推进了国际土壤分类系统和数字土壤制图的全球合作研究。

2 我国土壤科学发展现状与态势

我国土壤科学虽然起步较晚,但近几十年来发展迅速,土壤学研究在面临国家需求、解决生产实际的同时,学科建设得到了极大发展,相继建立了土壤地理学、土壤物理学、土壤化学、土壤生物学、土壤侵蚀与水土保持、土壤肥力与土壤养分循环、

土壤污染与修复、土壤质量与食品安全等各分支学科,提出了土壤圈物质循环的重要研究内涵,建立了较为完整的土壤学科体系,在国际上已具有一定特色和地位。以 Web of Science 收录的 34 份土壤学期刊发表的文章为例,我国在 2014 年超过美国,成为在土壤学期刊上发文最多的国家(图 3),目前已超过全球总量的 30%。由于我国社会经济快速发展对土壤学的强烈需求,我国土壤学各分支学科均取得了很好的研究进展,如系统清查了我国土系资源,建立了近 5 000 个土系并出版了《中国土系志》,全面更新了我国土壤资源清单和土壤信息,将土壤分类工作推向了新的前沿^[11];发展了土壤物理新技术和新方法,以及地球关键带水文过程与物质迁移、土壤水热盐耦合过程与调控、污染物迁移与数值模拟、土壤结构等新理论与新模型^[12];基于同步辐射技术、机理性动力学模型及量子化学计算等,揭示了土壤微界面化学动力学反应分子机制^[13];首次在较大的空间尺度下定量揭示了土壤微生物的地理分布特征,揭示了土壤生源要素的微生物地球化学过程与驱动机制^[14];阐明了土壤侵蚀动力机制,建立了土壤抗冲性与土壤物理性质参数的最优模型^[15];采用氮稳定同位素成功标记测定了土壤氮素初级转化速率,在认识亚热带土壤氮动态和机制方面取得了一系列新的认识^[16],在协调作物生产和环境双赢的氮肥管理方面从理论到实践均取得了较大进展^[17];在农田和场地土壤污染过程、污染机制、风险评估、风险管控修复材料、装备和技术及工程示范等方面开展了大量工作^[18];土壤质量和食品安全领域主要聚焦在施肥、作物类型、水肥管理以及施肥引起土壤酸化对食品安全的影响等^[19]。详细参见各个分支学科发展报告^[11-19]。

从研究领域看,我国土壤科学研究领域既紧跟国际热点,如在应对全球气候变化、根际微生物多样性、硝化过程与氨氧化菌等国际热点领域;又带有明显的区域特色,如在黄土高原水土流失、污染土壤生物修复等特色领域(图 4)。在过去的十多年里,这些热点研究领域研究成果累累,产生了多项国家自然科学奖和科技进步奖。

从研究深度上看,我国土壤学整体上处于跟踪国际前沿水平,引导国际土壤科学研究方向的原创性研究成果较少。少数领域如人为土壤(特别是水耕人为土)的研究、古土壤、土壤电化学、植物修

复、稻田温室气体排放研究等处于国际领先水平。部分学科和研究领域与国际前沿差距较大,需要多学科多领域交叉综合研究,进一步推动我国土壤科学的全面发展。

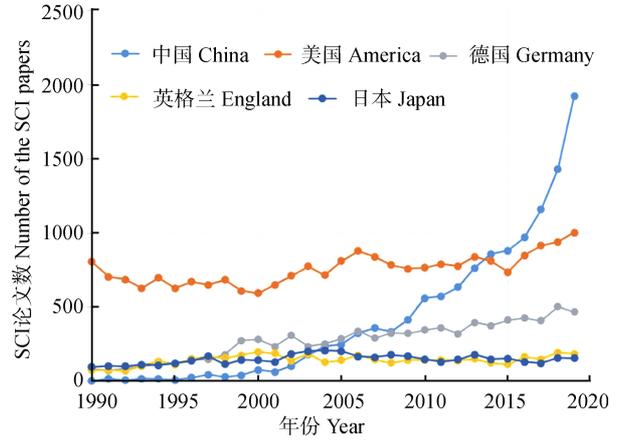


图 3 世界主要国家在 Web of Science 土壤学期刊发文数量变化

Fig. 3 Number of the papers published in soil science journals of the Web of Science relative to country and region

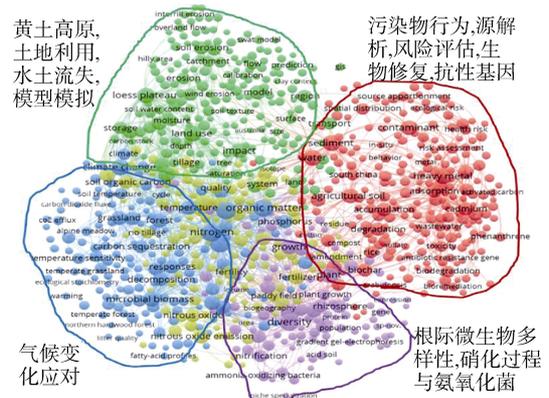


图 4 2011—2019 年我国土壤学 SCI 论文主题词关系共现网络

Fig. 4 Key-word cooccurrence graph of SCI papers published in soil science of China during 2011-2019

3 学科发展需求与关键科学问题

3.1 土壤科学与国家需求

当前,我国乃至全球社会面临着“粮食安全、环境污染、资源匮乏、生态退化、全球变化、灾害频发”等重大挑战,这些问题均与土壤的开发与利用、保护与管理息息相关。首先,耕地是保障国家粮食安全、实施乡村振兴的根本。目前,全国耕地面积为 20.24 亿亩(1 公顷为 15 亩),人均耕地不足

1.5 亩, 中低产田占 72.7%, 耕地地力总体偏低。我国耕地基础地力对粮食生产的贡献率仅为 52% 左右, 较 40 年前降低了 10~15 个百分点, 耕地质量退化严重威胁到国家粮食安全。目前, 国家正大力推进实施耕地质量保护和提升行动计划, 目标到 2022 年耕地质量平均提升 0.5 个等级以上。满足国家需求, 加强土壤质量基础与提升技术研究, 应当是我国土壤科学发展的根本任务。

其次, 土壤健康是保障生态安全和支撑美丽中国的基础。我国土壤环境污染严重, 区域扩展日益突出, 已经影响到全面建设小康社会和实现可持续发展的战略目标。“净土攻坚战”是国家三大污染防治攻坚战之一。党的十九大报告明确指出: 着力解决突出环境问题, 强化土壤污染管控和修复, 加强农业面源污染防治, 构建全社会共同参与的环境治理体系; 加大生态系统保护力度, 实施生态系统保护和修复重大工程, 尤其是长江经济带土壤污染修复与安全利用等。因此, 加强土壤环境与污染修复研究成为土壤科学发展的重要任务。

第三, 全球变化与土壤的关系密切。一方面, 土壤碳氮循环等生物地球化学过程产生或消耗温室气体以及其他气体, 直接或者间接地影响气候变化; 另一方面, 全球变化通过降雨、温度和养分沉降等变化, 影响土壤过程, 也对生态系统的生产力及其稳定性产生影响, 因此, 土壤管理成为应对气候变化的研究热点。从土壤与土壤学科及国民经济发展需求的关系来看, 当前对土壤重要性的认识, 已从农业生产向生态环境保护提升, 从食物安全向人体健康提升, 从土壤资源向生态要素的认识提升, 从土壤质量的培育向提高土壤综合服务功能提升, 从全球土壤质量变化向人类生存提升, 从城乡发展向人居环境建设提升。这些认识的提升对未来我国土壤科学的研究与发展, 均有重要的指导意义。

3.2 关键科学问题

从国际和国内土壤科学发展态势来看, 土壤形成与演化研究正朝定量化、信息化、数字化方向发展; 土壤过程与模型模拟研究成为土壤物理学研究的主要趋势; 土壤物理化学与生物化学过程的耦合研究成为土壤化学的发展新趋势; 土壤生物学已经成为土壤科学、地球科学、环境科学、微生物学和生态学等学科交叉前沿; 土壤侵蚀与水土保持研究是土壤科学服务于生态脆弱区生态环境建设的重要

内容; 土壤肥力与养分循环研究是实现土壤生产力持续提升与保护生态环境协调发展的重要途径; 土壤污染与修复研究成为土壤科学发展的重要研究方向; 土壤质量与食物安全研究是土壤科学服务于食物安全的重要内容; 发展基于“大数据+互联网+人工智能”土壤资源大数据信息决策理论与方法成为未来土壤学技术的发展趋势。围绕这些研究内容, 土壤学需解决如下关键科学问题:

1) 阐明土壤圈物质循环与土壤功能演变机制。土壤圈多时空尺度土壤形成和演化过程与机制, 土壤圈物质(养分、水分、污染物等)生物地球化学循环过程及其对土壤功能(生产功能、环境功能、生态功能)的影响, 这些过程发生的微生物学机制, 以及调控原理与途径。

2) 揭示土壤内部界面反应过程与作用机制。揭示土壤胶体及其组分与生物活性分子、微生物等相互作用复杂性、土壤界面反应作用机制及影响; 阐明土壤生态系统生源要素和污染物转化过程、食物链和食物网能量转换、生物信息传递过程及其对环境污染和全球变化的反馈机制等。

3) 明确土壤健康的维持机制与新技术原理。土壤污染、土壤侵蚀、土壤盐渍化以及土壤酸化是我国土壤退化的重要因素, 阐明土壤污染、侵蚀、盐渍化和酸化形成过程、机理及其响应机制, 揭示土壤健康演变的规律与机制, 发展基于“大数据+互联网+人工智能”的土壤信息大数据决策理论与方法, 建立土壤健康评价的指标体系以及退化土壤的防控、修复与保育的理论和体系。

4 未来优先研究领域与重要方向

围绕国际土壤科学研究前沿和国家重大战略需求, 充分发挥多学科交叉融合的学科优势, 预期未来 5~10 年我国土壤学将重点发展地球关键带过程与土壤功能演变、农田土壤健康与质量提升理论与技术、区域土壤复合污染过程与绿色修复、土壤生物物的分布、过程与功能等优先领域和重要方向。

4.1 地球关键带过程与土壤功能演变

地球关键带研究作为地球科学、土壤学、水文地质学、大气科学、生态科学等的综合交叉学科, 以调查、监测、试验、模拟、预测为手段, 研究不同时间和空间尺度上土壤、水文、植被和大气相互

作用过程及其景观、物质能量传输的关系,实现关键带结构-过程-功能-服务的耦合与集成。重点研究地球关键带类型划分方法与理论框架,绘制区域、国家及全球尺度地球关键带类型分区图;研究地球关键带的厚度、地层结构、风化强度、孔隙结构等的空间变异及其气候、生物、水文、地质和人为活动驱动力;表征地球关键带中水、碳、氮、磷、钾、微生物等的时空动态。研究地球关键带区域、流域、坡面、剖面等多尺度的生态水文过程及其驱动的物质迁移过程,创新多尺度观测与模拟研究方法和理论;探究土-气、土-水、土-岩和土-根界面热区物质迁移和转化过程,创建多界面物质循环通量观测和模拟研究理论;剖析碳、氮、磷、硫、铁、锰等元素微观至宏观的生物地球化学循环过程及其耦合关系;研究典型生态脆弱地区关键带过程对土壤资源演变的驱动机制,以及关键带过程对土壤功能与安全的影响,开展青藏高原、黄土高原等热点地区的横纵向界面研究及国际对比。研究气候变化情景下矿物风化、土壤形成、植被演变、土地利用等影响下地球关键带碳、氮、磷、硫等生源要素循环过程与机制;探索地球关键带过程调控与应对气候变化的综合途径;构建我国地球关键带调查观测研究平台。

4.2 农田土壤健康与质量提升理论与技术

农田土壤健康保护和耕地质量提升,是实施藏粮于地(技)战略和确保国家粮食安全的重大现实需求,亦是土壤学内部学科交叉的综合性研究内容。重点研究农田土壤主要生源要素的生物地球化学循环过程及其驱动因子,阐明典型生源要素循环耦合关系的关键过程及其制约机制、协同转化理论;研究维系土壤健康的典型微生物过程、影响因素,阐明土壤微生物过程与关键物质循环的耦合关系;研究土壤调控对植物疾病防控的原理与机制及技术模式;研究土壤生物网络构成、多样性及其演变规律,明确土壤生物网络功能对土壤有机质周转和养分循环的影响。研究主要生态区中低产田障碍类型及驱动因素,解析土壤酸化、(次生)盐渍化、潜育化、瘠瘦化等典型障碍类型发生与形成机制,阐明其消减与调控机理;研究土壤肥沃耕层结构形成机制,提出协调土壤水、肥、气、热条件的肥沃土壤耕层的构建方向;研究农田土壤有机质形成演变规律、平衡机理及驱动因素,阐明主要生态区中低产田土

壤有机质提升的潜力与途径。

4.3 土壤复合污染过程与协同修复

系统认识我国土壤污染区域化特征,探究区域土壤污染成因,阐明区域土壤污染过程与治理修复原理,实现分区治理修复策略,已成为土壤学、环境科学、区域地理学,以及环境土壤学、修复土壤学必须解决的重大环境污染问题。针对重点区域土壤污染成因复杂性、过程耦合性、风险叠加性等基础性科学问题,研究重点区域土壤-地下水污染特征、空间格局和质量演变规律;研究区域土壤-地下水系统污染物迁移转化规律、扩散通量及主控机制;研究区域土壤-地下水污染物多介质界面过程与调控机制,阐明区域土壤-地下水复合污染物的生物地球化学过程;研究区域土壤污染的大数据系统,研发基于大数据的场地污染智能识别模式;研究农用地土壤污染靶向修复与安全利用技术原理,以及场地土壤-地下水污染智慧修复与风险智能预警系统;研究区域土壤污染全过程控制与协同修复技术原理。

4.4 土壤生物的分布、过程与功能

土壤生物学是土壤科学、微生物学和生态学等学科交叉前沿。重点研究不同土壤生态系统中生物多样性的时空差异性,阐明不同时空尺度上土壤生物多样性的驱动机制、演化特征及其影响机制,建立土壤生物基因及物种资源数据库;研究土壤生源要素的生物学转化过程,揭示土壤物质循环的生物学机制;研究土壤健康食物网的生物和非生物影响及反馈机制,阐明土壤食物网中关键物种、生态网络关系及其对土壤生物多样性维持的贡献;解析土壤多营养级生物结构、多样性、互作关系等与土壤促生、免疫和解毒功能发挥之间的关系,探究核心土壤生物在促生、免疫和解毒功能发挥中的互作模式、演化规律和进化机制,建立动态提升土壤生物功能的策略;研究引起人类疾病的土壤病原微生物、病毒在土壤中类群、存活以及传播途径;建立土壤病原微生物动态检测方法,建立土壤病原生物数据库,提出预判和阻控土壤源疫情传播的理论与技术手段。

4.5 土壤碳氮循环与全球气候及环境变化

土壤碳氮循环与全球气候及环境变化研究成为土壤学、大气科学、地球科学等交叉学科的研究热点。研究典型陆地生态系统碳氮生物地球化学循环

特征、碳氮微量气体排放强度及固碳减排潜力；解析土壤碳氮微量气体对气候变化因子的响应规律及微生物学驱动机制；土壤碳氮循环过程的生物驱动机制与计量，碳氮温室气体产生和转化的生物学机理及其对全球变化的响应，土壤碳氮耦合的生物联作机制，全球变化敏感区土壤生物群落和功能的演变与适应，土壤碳氮生物地球化学循环过程的生物学模型；探索不同农业生态系统碳氮微量气体减排与作物高产高效的耦合途径及综合对策；研究全球变化要素农田生态系统过程的反馈机制；深入研究微生物同化无机氮的机制，增加土壤氮固持能力；探索新的固氮微生物，增加非豆科固氮，阐明土壤反硝化和硝酸盐异化还原过程的主要控制因子，实现氮素去向的合理调控，发展全球环境变化下不同区域土地利用方式下的农业绿色生产技术体系。

4.6 土壤微界面化学过程与作用机制

土壤化学-物理-生物界面反应研究是土壤化学、界面化学、胶体化学、生物学等多学科交叉的前沿。重点研究土壤组分微界面养分与污染物化学反应过程，揭示微生物-矿物-微生物之间胞外电子传递机制；研究微生物驱动的土壤养分与污染物化学过程，建立微生物驱动化学体系机制模型；研究土壤矿物-微生物-有机质界面过程，阐明多界面、多过程、多要素耦合机制；研究土壤组分间动态相互作用机制及其影响因素；研究土壤胶体界面养分与污染物多过程耦合反应动力学机制，发展土壤微纳多尺度多过程动力学行为预测模型；研究全球变化影响下土壤组分微界面养分与污染物化学动力学过程、环境行为、反馈机制以及定量预测模型。

4.7 土壤养分高效利用与精准施肥

土壤养分高效利用与精准施肥是土壤学、植物生理学、微生物学、分子生物学、育种学、肥料学等多学科交叉的研究热点。重点研究土壤-根系-微生物互作过程对作物养分高效利用的影响机制，揭示土壤-作物-环境相互作用与养分有效性；解析作物高效利用土壤养分机制，挖掘作物高效利用养分的基因、作物种质资源和微生物菌种资源；利用分子设计等育种技术培育氮磷养分高效利用的专用作物新品种；研究氮磷高效利用的地上-地下生物功能调控与技术原理，建立氮磷高效利用生物调控技术体系。开发新型控释肥料、有机肥料以及功能肥料，构建肥料环境效应评估方法和评估体系；开发土壤

肥力快速测定系统，构建智能化、信息化、数字化、精准化施肥技术体系，开展互联网+高效施肥技术集成。发展不同区域生态高值农业生产技术体系。

4.8 土壤侵蚀过程与水土保持

土壤侵蚀过程与水土保持原理研究是遏制我国土壤退化和保障区域生态安全的重要基础性科学问题。重点研究不同尺度下水文过程与侵蚀-搬运-沉积的级联效应；水文连通性对流域侵蚀产沙影响机理及其过程模拟；研究自然作用和人为活动影响下土壤侵蚀的形成过程、机理及其响应机制，典型区侵蚀产沙原型观测，跨尺度的土壤侵蚀评价系统理论与预测模型；土壤侵蚀径流-泥沙(土)-面源污染物相互作用机制；研究土壤侵蚀模型中参数的区域演变规律，建立模型参数与气候、土壤、植被、地形特征等宏观区域参数间的关系，提升模型的区域适用性；研究土壤侵蚀防治原理与技术；建立土壤侵蚀研究新技术与新方法。

4.9 土壤学研究新方法、新技术

近年来，随着信息技术、生物技术、人工智能、大数据技术等发展迅猛，土壤学亟需应用这些高技术来表征土壤物质的多态性、土壤过程的多尺度性和土壤功能的多元性。重点研究土壤多组分、多界面和多尺度性质和行为的观测、分析和模拟分析方法；研发应急和生物监测技术，完善现代土壤质量分析方法标准体系；开发土壤原位采样、地球物理探测与污染监测一体化技术，实现土壤与地下水污染物分布、地下水流场、地层特征及含水层介质渗透性实时、动态、高分辨表征；发展野外观测的定量分析、动态表征技术，结合空间表达技术，构建不同尺度的计量土壤学理论和研究方法体系；开发基于大数据的自动控制、数据采集信息技术以及基于“互联网+”的远程数据传输技术；研究基于星-空-地一体化的土壤智慧监测技术与系统；发展基于“大数据+互联网+人工智能”的土壤大数据信息决策理论与支持系统。

参考文献 (References)

- [1] Shen R F, Teng Y. Concept of soil security and its application in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(4): 468—476. [沈仁芳, 滕应. 土壤安全的概念与我国的战略对策[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 468—476.]
- [2] Zhang G L, Wu H Y. From “problems” to “solutions”:

- Soil functions for realization of sustainable development goals[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33 (2): 124—134. [张甘霖, 吴华勇. 从问题到解决方案: 土壤与可持续发展目标的实现[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33 (2): 124—134.]
- [3] Shen R F. Development, status and prospect of soil science[J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8 (1): 44—49. [沈仁芳. 土壤学发展历程、研究现状与展望[J]. *农学学报*, 2018, 8 (1): 44—49.]
- [4] Zhao Q G, Luo Y M. The macro strategy of soil protection in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30 (4): 452—458. [赵其国, 骆永明. 论我国土壤保护宏观战略[J]. *中国科学院院刊*, 2015, 30 (4): 452—458.]
- [5] Song C Q, Tan W F. The historical venation of soil science in the past 30 years—Based on the bibliometric analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (5): 957—969. [宋长青, 谭文峰. 基于文献计量分析的近30年国内外土壤科学发展过程解析[J]. *土壤学报*, 2015, 52 (5): 957—969.]
- [6] Zhang G L, Zhu Y G, Shao M A. Understanding sustainability of soil and water resources in a critical zone perspective[J]. *Scientia Sinica: Terrae*, 2019, 49 (12): 1945—1947. [张甘霖, 朱永官, 邵明安. 地球关键带过程与水土资源可持续利用的机理[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49 (12): 1945—1947.]
- [7] Siebecker M, Li W, Khalid S, et al. Real-time QEXAFS spectroscopy measures rapid precipitate formation at the mineral–water interface[J]. *Nature Communications*, 2014, 5 (1): 5003. <https://doi.org/10.1038/ncomms6003>.
- [8] Fierer N. Embracing the unknown: Disentangling the complexities of the soil microbiome[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2017, 15 (10): 579—590.
- [9] Zhu Y G, Shen R F, He J Z, et al. China soil microbiome initiative: Progress and perspective[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32 (6): 554—565, 542. [朱永官, 沈仁芳, 贺纪正, 等. 中国土壤微生物组: 进展与展望[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32 (6): 554—565, 542.]
- [10] Zhang J B, Liu J L. Principle and strategy facilitating increase of soil productivity in China food production bases[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2016, 13 (14): 181. [张佳宝, 刘建立. 粮食主产区农田地力提升机理与定向培育对策研究立项报告[J]. *科技创新导报*, 2016, 13 (14): 181.]
- [11] Zhang G L, Shi Z, Zhu A X, et al. Progress and perspective of studies on soils in space and time[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1060—1070. [张甘霖, 史舟, 朱阿兴, 等. 土壤时空变化研究的进展与未来[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (5): 1060—1070.]
- [12] Peng X H, Wang Y Q, Jia X X, et al. Some key research fields of Chinese soil physics in the new era: Progresses and perspectives[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1071—1087. [彭新华, 王云强, 贾小旭, 等. 新时代中国土壤物理学主要领域进展与展望[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (5): 1071—1087.]
- [13] Li F B, Xu R K, Tan W F, et al. The frontier and perspectives of soil chemistry in the new era[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1088—1104. [李芳柏, 徐仁扣, 谭文峰, 等. 新时代土壤化学前沿进展与展望[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (5): 1088—1104.]
- [14] Chu H Y, Ma Y Y, Yang T, et al. The strategies for development of the subdiscipline of soil biology for the 14th Five-Year Plan[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1105—1116. [褚海燕, 马玉颖, 杨腾, 等. “十四五”土壤生物学分支学科发展战略[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (5): 1105—1116.]
- [15] Shi Z H, Liu Q J, Zhang H Y, et al. Study on soil erosion and conservation in the past 10 years: Progress and prospects[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1117—1127. [史志华, 刘前进, 张含玉, 等. 近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (5): 1117—1127.]
- [16] Cai Z C. Discussion on the strategies for development of the subdiscipline of soil fertility and soil nutrient cycling for the 14th Five-Year Plan[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1128—1136. [蔡祖聪. 浅谈“十四五”土壤肥力与土壤养分循环分支学科发展战略[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (5): 1128—1136.]
- [17] Yan X Y, Xia L L, Ti C P. Win-win nitrogen management practices for improving crop yield and environmental sustainability[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33 (2): 177—183. [颜晓元, 夏龙龙, 遆超普. 面向作物产量和环境双赢的氮肥施用策略[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33 (2): 177—183.]
- [18] Luo Y M, Teng Y. Research progresses and prospects on soil pollution and remediation in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1137—1142. [骆永明, 滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (5): 1137—1142.]
- [19] Xu J M, Liu X M. Frontier trends and development strategies of soil quality and food safety in the 14th Five-Year Plan[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1143—1154. [徐建明, 刘杏梅. “十四五”土壤质量与食物安全前沿趋势与发展战略[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (5): 1143—1154.]

(责任编辑: 卢萍)