DOI：10.11766/trxb202309160381
吴同亮，刘存，周东美，陈怀满，王玉军. 环境土壤学——回顾与展望[J]. 土壤学报，2023，60（5）：1324–1338.
WU Tongliang，LIU Cun，ZHOU Dongmei，CHEN Huaiman，WANG Yujun. Environmental Soil Science：Retrospect and Prospect[J]. Acta Pedologica Sinica，2023，60（5）：1324–1338.

环境土壤学——回顾与展望*

吴同亮[1]，刘　存[1]，周东美[2]，陈怀满[1]，王玉军[1, 3†]
（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. 污染控制与资源化国家重点实验室（南京大学环境学院），南京 210023；3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要：环境土壤学是一门新兴的、土壤学和环境科学交叉融合的综合性学科，其研究重点从早期服务于农业安全生产发展至现在的土壤环境与健康，本文从土壤外源物质侵袭和土壤质量演变对土壤环境影响等方面回顾了环境土壤学发展历程。土壤污染物对土壤环境质量影响是以土壤元素背景值和环境现状调查为基础，以明确污染物形态，揭示土壤反应过程机制，评估污染效应，开展土壤环境修复工程为主线不断发展更新。土壤质量演变研究中碳、氮、硫、磷元素循环从土壤肥力和农业非点源污染的探讨拓展至土壤对全球气候变化的适应与响应；土壤退化研究则从对土壤生产力或功能丧失的研究发展至全球气候变化背景下农业发展可持续性及土壤生态功能的研究。环境土壤学在今后有四个重要发展趋势：提倡多学科交叉融合；评估全球气候变化对土壤元素循环的潜在影响；完善土壤健康评价框架中的土壤环境评价指标建立；学科发展服务于国家重大需求。

关键词：环境土壤学；土壤污染；土壤质量演变；全球气候变化
中图分类号：X53　　**文献标志码：**A

Environmental Soil Science: Retrospect and Prospect

WU Tongliang[1], LIU Cun[1], ZHOU Dongmei[2], CHEN Huaiman[1], WANG Yujun[1, 3†]
(1. *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture*, *Institute of Soil Science*, *Chinese Academy of Sciences*, *Nanjing* 210008, *China*; 2. *State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse*, *School of the Environment*, *Nanjing University*, *Nanjing* 210023, *China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Environmental soil science is an emerging interdisciplinary field that integrates soil science and environmental science. Initially focused on serving agricultural productivity, the research in environmental soil science has evolved to encompass soil health. This article primarily reviews the development of environmental soil science in terms of the impacts of exogenous substances on soil and soil quality evolution. The study of soil pollution on soil environmental quality focuses on identifying pollutant speciation, revealing soil reaction processes, assessing pollution effects, and carrying out soil remediation projects, based on soil element background values and the current state of pollution. In the context of soil quality evolution, research on the

* 国家自然科学基金项目（42225701，42107041）和国家重点研发计划项目（2021YFC1809100）资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China（Nos. 42225701，42107041）and National Key R&D Program of China（No. 2021YFC1809100）
† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：yjwang@issas.ac.cn
作者简介：吴同亮（1992—），男，江苏南京人，助理研究员，主要研究方向为污染物界面动态转化机制研究
收稿日期：2023–09–16；收到修改稿日期：2023–10–10；网络首发日期（www.cnki.net）：2023–10–13

cycling of carbon, nitrogen, sulfur, and phosphorus elements has expanded from soil fertility and non-point source pollution in agriculture to exploring the adaptation and response of soil in global climate change. The study of soil degradation processes has progressed from investigating soil productivity or functional loss to examining the sustainability of agricultural development and soil ecological functions under the background of global climate change. Environmental soil science is expected to develop in four important directions in the future, including fostering interdisciplinary integration, evaluating the potential impacts of global climate change on soil element cycling, enhancing the establishment of soil environmental evaluation indicators within the framework of soil health assessment, and aligning the development of environmental soil science with the major needs of the country.

Key words: Environmental soil science; Soil pollution; Soil quality evolution; Global climate change

“土壤是历史自然体，是位于地球陆地表面和浅水域底部具有生命力、生产力的疏松而不均匀的聚积层，是地球系统的组成部分和调控环境质量的中心要素”[1]。土壤是地球生命之本，中国有句古话“民以食为天，食以土为本”，体现了人类依存于土壤的朴素认知。然而，由自然因素和人为条件引起的土壤环境质量变化，冲击土壤圈与大气圈、水圈、生物圈和岩石圈之间的动态平衡，威胁土壤的生态功能和人类社会的可持续发展。

环境土壤学是土壤环境问题产生后发展出来的一门综合性交叉学科，其以土壤为研究主体，是土壤学和环境科学的重要组成部分，研究自然因素和人为条件下土壤环境质量变化、影响及其调控的一门学科[1]。从 20 世纪 70 年代起至今，环境土壤学得以建立和不断扩充发展。在研究早期，全球粮食短缺问题促使土壤环境研究主要服务于农业增产，在西欧、北美和大洋洲等地区的许多发达国家出现粮食过剩后，研究主题拓展至提升粮食品质、减轻土壤污染、改善土壤生态环境、应对全球气候变化和提升人类健康等方向。2015 年的“世界土壤年”使得“健康土壤带来健康生活”的理念深入人心，让土壤健康成为引领环境土壤学学科研究的一个重要主题[2-3]。

中国是当前世界环境土壤学研究的重要区域之一。于 1976 年成立的中国科学院南京土壤研究所土壤环境保护研究室是我国最早的专门从事土壤环境保护的研究机构，并在随后确立环境土壤学为其学科内容，有力地促进了我国土壤环境保护事业的发展。同时，由中国科学院南京土壤研究所等单位倡导，于 1992 年成立的中国土壤学会“土壤污染与控制专业委员会”，后更名为“土壤环境专业委员会”，为我国从事土壤环境相关领域的研究者提供了交流沟通平台，促进了我国环境土壤学的发展。由中国科学院南京土壤研究所作为承担和主编单位所著之《环境土壤学》[1]至 2018 年已再版 3 次，该论著对土壤在环境中的作用与地位，土壤中一些化学物质的行为与环境质量和健康效应，污染土壤的修复和环境土壤学研究法等进行了较为全面而深入的讨论，书中素材的组合以及对一些观点的阐述和认识，具有探索性和前沿性，是该学科领域的重要论著和教材，兼具理论性、资料性、时代性和实用性。

伴随土壤科学、环境科学、生态学、微生物学和生物地球化学等多学科与环境土壤学交叉日益频繁，尖端科学技术的挖掘应用也极大地丰富了环境土壤学的研究方法。同时土壤质量、土壤健康和土壤安全是环境土壤学始终面临的重大课题，在“绿水青山就是金山银山”这一价值观的大背景下，环境土壤学的研究如何为国家完成生态和环境保护的相关目标，并将研究成果转化为政府决策部门和公众的需要，是我们纪念中国科学院南京土壤研究所成立 70 周年的深层思考和愿望表达。

本文对环境土壤学的相关内容进行了简要的回顾与展望，以期为进一步推动任务与学科研究提供参考。本文的主要内容包括外源物质侵袭与土壤环境质量，总结了土壤环境现状及其容量、外源物质在土壤中形态含量、土壤环境行为、效应、评价与调控；土壤质量演变与环境土壤学，总结了土壤碳、氮、硫、磷元素的循环与环境质量、土壤退化与环境质量等；并在讨论的基础上展望了环境土壤学的未来。

1 环境土壤学研究范畴

环境土壤学是现代土壤科学发展的产物和重要组成部分，它的研究主体是土壤，在学科上归属于土壤学，同时其又为环境科学的重要组成部分，对于提升土壤学的科学地位、维系土壤学生存发展，完善环境科学研究体系具有重要意义。环境土壤学具有以下两大特征：第一，环境土壤学是一门交叉的界面科学，其理论基础包含土壤科学、环境科学、生态学、微生物学、生物地球化学、分析化学、矿物学和自然地理学等学科；第二，研究环境中化学物质的生物小循环与地质大循环结合交点上兼有生命与非生命科学的双重内涵[1]。

环境土壤学的核心内容是土壤环境质量与可持续发展，着眼于土壤环境质量的保护、利用和改善，研究土壤和环境的协调关系及土壤的可持续利用，重点关注土壤环境中外源物质的侵袭、累积或污染程度及其预防与修复，以及土壤质量演变过程中土壤环境质量的变化。其研究内容包含土壤环境的现状及其演变，外源物质在土壤环境系统中的反应行为，土壤环境与生态和人体健康，人为活动对土壤环境的冲击和土壤环境工程等[1]（图 1）。

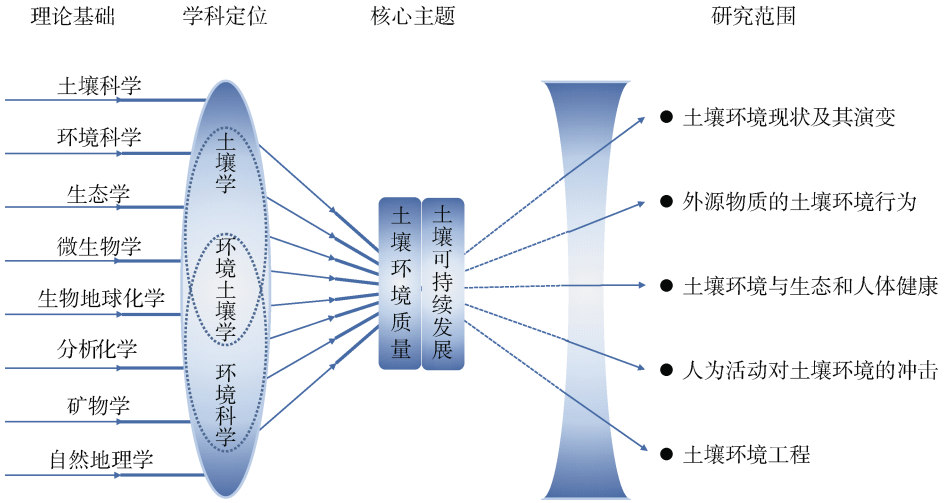

图 1 环境土壤学学科基础与研究框架

Fig. 1 Disciplinary foundations and research framework of environmental soil science

鉴于环境土壤学多学科和跨学科的学科特性，其研究方法承袭了土壤学学科特征，并融合了各交叉学科方法论特点。环境土壤学注重宏观与微观土壤环境过程相结合：强调过程量化，采用系统分析的原理与方法，工作包含宏观区域的定点观察和微观机制的深入剖析；分析测试技术要求高：土壤基质复杂，分析预处理难度大，测试仪器的灵敏度高、干扰低、定量准确；发挥模型与模拟作用：从经验模型发展至机理性微观热力学与动力学模型，实现模型尺度提升发展区域性模型，不断提升模型和模拟的准确性和可靠性，提高研究成果在宏观决策与实践中的应用；构建与应用土壤环境大数据：推动土壤环境数据资源整合，统筹建立土壤环境数据库，搭建大数据云平台、管理平台和专题应用平台，研发土壤环境大数据的分析技术[1]。

2 外源物质侵袭与土壤环境质量

2.1 土壤环境现状及其容量

1962 年由美国科普作家蕾切尔·卡逊出版的《寂静的春天》，唤起了公众对环境污染的极大关注，同样也引发了环境土壤学界对土壤中有机化合物、重金属等外源物质的研究热潮。人类社会工业和城市化进程的快速推进催生了一系列土壤环境问题。石油、炼焦、煤气、化工等行业“三废”排放以及污泥农用，农药、化肥大范围施用等，使土壤遭受严峻的重金属和有机污染问题[4]。在研究早期广泛开展了砷（As）、铜（Cu）、铅（Pb）、锌（Zn）、汞（Hg）等重金属，有机除草剂，杀虫剂以及其他类型持久性有机污染物的土壤污染现状调查和源解析研究[5-6]。利用指纹图谱、正定矩阵因子分解

模型（PMF）、主成分分析和同位素技术等对土壤中多环芳烃类（PAHs）有机污染物[7]和镉、铅等重金属[8]开展污染源解析的研究工作，发现了工业污水排放、大气沉降、污泥农用等为土壤环境的主要污染源[9]。

土壤元素背景值和土壤环境容量研究是环境土壤学早期发展的研究重点，可进一步掌握外源物质在土壤中侵袭、累积或污染现状，量化土壤所能容纳污染物的最大负荷量。我国自 20 世纪 70 年代起，在“七五”国家重点科技项目（攻关）计划支持下，在全国 29 个省、自治区、直辖市开展了土壤元素背景值和土壤环境容量的研究。中国科学院南京土壤研究所是最早开展土壤背景值研究单位之一，与其他科研单位一起共同完成涵盖 41 个土类、30 余种元素的土壤背景值调查研究[10-11]，研究了背景值区域成因和分异规律，阐明了不同土壤类型和成土母质对元素土壤背景值的影响，发展了背景值数据统计处理方法，开发了相关计算机程序[12]。在土壤元素背景值基础上，综合考量了污染物对土壤动物、植物、微生物和酶活性影响在内的生态效应，对地表水、地下水的影响以及污染物在土壤中物质平衡等要素，计算出研究区土壤环境容量[13-14]，取得了初步的、但却具开创性的一些成果，攻关任务组出版了《环境背景值和环境容量研究》[15]、《土壤环境容量研究》[16]等著作。在此基础上，我国环境保护部于 1995 年首次颁布了《土壤环境质量标准》（GB 15618-1995），包括 8 种重金属和 2 种有机氯农药。经过 20 余年土壤环境领域的研究发展，综合实际使用和管理的经验，对于标准制订中化学物质影响的独立性与依存性逐步有了较为深入的理解[17]，于 2018 年修订并颁布了《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618-2018）和《土壤环境质量-建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 36000-2018），对于保障农田土壤环境质量及建设用地合理开发利用具有重要的参考意义。

2.2　外源物质在土壤中形态含量分析

在学科发展早期，对于重金属和有机化合物等外源物质的土壤过程和效应的研究仅仅关注在土壤中的始态和终态，而将二者的土壤环境行为视作黑箱过程。外源污染物在土壤中的形态决定了其生物毒性，因此精准识别其土壤形态是研究土壤环境过程和效应的基础。在土壤总量研究的基础上发展出基于操作定义的单一（EDTA、HCl、$CaCl_2$，NH_4OAc，$NaNO_3$）[18-19]和连续形态提取方法（Tessier[20]、Wenzel[21]、BCR[22]以及相应修正法），对于揭示重金属在土壤中有效态和组分结合态具有积极意义。对于多环芳烃、多氯联苯和有机氯农药等有机化合物的有效性提取，开发出了甲醇、乙醇、丙酮、正丁醇等溶剂萃取法[23-24]和相关固相萃取技术[25-26]。然而，操作定义提取法存在费时、费试剂、方法间可比性差、提取过程中重金属形态再分配等局限。现代分析技术的飞速发展为（准）原位分析重金属在土壤中的“真实”化学形态提供了有效的方法，也进一步促进了环境土壤学的纵深发展。例如，利用基于同步辐射的 X 射线吸收光谱（XAS）解析 Cd、Zn、Ni 等金属阳离子以及 As、Cr、Sb、Se 等金属（类金属）含氧阴离子与土壤关键组分的结合价态、吸附构型和土壤分布等提供了分子-原子级关键证据[27-31]；利用扫描电子显微镜（SEM）、透射电子显微镜（TEM）揭示微米至纳米尺度重金属在矿物界面形貌和空间分布特征[32-33]，球差校正扫描透射电子显微镜（Cs-STEM）的使用从纳米至亚纳米尺度上表征重金属与土壤矿物-有机质等的相互作用[34]；傅里叶变换离子回旋共振质谱技术（FT-ICR-MS）研究可从分子层面解析土壤溶解性有机质（DOM）与重金属的结合机制[35-36]。此外，密度泛函理论（DFT）等理论计算方法结合 Gaussian、VASP、CASTEP、Dmol3 等程序的使用，为土壤有机质或矿物界面与重金属/有机化合物的固液反应提供了原子级解释[37-38]。

人工纳米颗粒、抗生素、抗性基因（ARGs）和微/纳塑料等新型土壤环境污染物的不断涌现，给环境土壤学的发展带来新的机遇和持久驱动力，相关的分析检测技术也在不断发展。来自纳米肥料、纳米农药、污水、污泥等的人工纳米颗粒，具有尺寸小、比表面积大和表面活性高等特点，在进入土壤环境后难以分离和准确定量，利用超滤分离等前处理技术，结合单颗粒电感耦合等离子体-质谱法（Sp-ICP-MS）和非对称流场流分离（AF4）技术的应用，实现了土壤-植物系统中金属纳米颗粒的定量分析[39-41]。抗生素主要通过粪肥、污泥和污水的施用进入土壤，土壤环境中抗生素的累积将会诱导细菌耐药性增强，ARGs 即决定抗生素抗性的遗传因子。土壤是 ARGs 的重要储存库，也是抗生素环境

效应形成的主要场所。目前，采用基于细菌培养的筛选技术、定量聚合酶链式反应（qPCR）技术、宏基因组学和功能宏基因组学技术等，可以实现土壤中 ARGs 多样性和丰度的定性、定量分析[42]；土壤中微/纳塑料的环境风险受到广泛关注，开展土壤微/纳塑料的分析技术研究是探索其在土壤中的迁移转化规律和评估其生态风险的基础。现阶段土壤中微/纳塑料的分离手段包含密度分离和静电分离等物理分离法，油提法和加压流体萃取等化学分离法等；识别定量方法包括借助显微镜的目视鉴定法，以红外和拉曼光谱及其衍生技术为主的光谱分析法，质谱或色谱等联用的热分析方法[43]；近期，稀土配合物掺杂标记微/纳塑料的方法，克服了传统荧光标记法的背景荧光干扰和染料易泄漏等缺点，实现了土壤-作物体系中微/纳塑料的生物积累和转运的精确定量分析和时间分辨荧光成像[44-45]。

2.3 外源物质的土壤环境行为

外源物质在土壤中往往经历吸附-解吸、氧化-还原、溶解-沉淀、自然降解等环境过程，并影响其在土壤中的行为和归趋。环境土壤学学科在发展过程中已从污染物在土壤中的单一过程研究发展至多介质-多界面-多过程耦合的机理性反应过程研究，极大地促进了土壤黑箱过程向灰箱、白箱过程的过渡。

2.3.1 重金属和有机化合物的土壤环境行为 吸附是重金属和有机化合物与土壤固相之间的主要相互作用，吸附过程涉及吸附质（外源物质）和吸附剂（黏粒矿物、氧化物和土壤有机质），重点围绕其在土壤铁锰氧化物、黏粒矿物、有机质等关键界面的专性与非专性吸附开展了研究[46-48]，在基于批实验的等温吸附和吸附动力学研究基础上发展出基于搅拌-流动反应系统的吸附实验研究法[49]，不同方法的使用具备反应真实土壤条件，减少副反应和逆反应以及吸附样品快速制备等优点。吸附解吸热力学-动力学模型的发展对于量化吸附质吸附能力，阐明吸附机制具有重要意义。模型从早期传统 Freundlich、Langmuir 等经验吸附等温模型[50-51]，一级（准一级）、二级（准二级）、Elovich 等经验吸附动力学模型[52-53]发展至基于土壤矿物界面电荷分布的金属表面络合模型[54-55]，及兼顾热力学平衡和反应动态变化的机理性动力学方程[49, 56]，将重金属和/或有机化合物在土壤中吸附解吸行为由表观定量描述拓展至兼顾机理阐述，有助于人们对于土壤吸附过程的理解。

土壤中非生物-生物氧化还原形态转化过程对于变价重（类）金属和有机化合物的环境行为和效应具有重要意义。土壤中广泛分布的锰氧化物具有较高的氧化还原电位和较高的比表面积，可以通过快速氧化方式将 As（III）、Cr（III）、Sb（III）等低价态重（类）金属转化至高价 As（V）、Cr（VI）、Sb（V），进一步影响其固定迁移能力和毒性[57-59]；近年来，土壤自由基过程对土壤外源物质的形态影响也受到极大关注，借助电子顺磁共振（EPR）等手段，研究了土壤中铁元素价态循环、金属硫化物、醌酚类活性物质等在土壤氧化还原交界处通过原位产生自由基的方式氧化 Sb（III），溶解硫化镉及快速降解 PAHs 等有机化合物[60-63]；土壤有机质产生的持久性自由基，参与 Cr（VI）和 Ag^+等重金属的还原[64-65]，通过交叉、氧化偶联等方式影响多环芳烃等有机污染物的形态和毒性[66-67]，加深了人们对污染物在土壤中非生物氧化还原过程的理解。

土壤中微生物通过解毒或代谢供能等生理过程参与重金属和有机化合物的氧化还原过程。其中，现代微生物技术的蓬勃发展，突破了实验室传统培养手段的限制，伴随微生物宏基因组、代谢组学等分析技术和微生物生信分析等发展，极大促进了人们对土壤环境微生物参与过程的理解。研究显示不同微生物参与了土壤中 As、Cr、Hg 等重金属的氧化或还原过程[68-70]；此外，微生物还通过体内代谢和胞外电子传递等途径降解有机化合物[71]；微生物参与的重金属（Hg、As 等）甲基化-去甲基化过程往往涉及氧化-还原过程，研究进一步明确了该过程的微生物生理机制，阐明了土壤中，尤其是稻田土壤根系重金属的微生物甲基化过程对重金属的化学特性，如生物可利用性和挥发能力等，以及生物毒性的影响机制[72-73]。同时，以微生物-腐殖质-土壤矿物间电子转移为核心的生物地球化学过程受到关注，并将显著影响污染物在土壤中的形态和环境归趋[74]。

2.3.2 新型污染物的土壤环境行为 吸附是人工纳米颗粒的最基本环境行为之一，其吸附行为与团聚过程密不可分。纳米颗粒之间的均相团聚过程以及其与土壤介质间的异相团聚过程将使纳米颗粒在土壤中的粒径增大、浓度和生物有效性迅速降低，pH 和有机质等关键土壤因子以及纳米颗粒包被物等也将显著影响其在土壤中的固定过程[75]；围绕纳

米颗粒在土壤多孔介质中的迁移也开展了大量研究，应用 DLVO 等理论定量比较纳米颗粒的迁移能力，识别出土壤 pH、离子强度、粘土矿物、铁氧化物、可溶性有机物等关键因子[76]；纳米颗粒在土壤中的团聚、氧化、硫化和溶解等转化行为将直接影响其土壤形态及生物有效性。

抗生素在进入土壤后主要发生吸附和降解等行为，与常规非极性有机化合物不同，抗生素属于离子型有机化合物，因此影响抗生素土壤吸附的主要因素包含土壤 pH、离子强度、多价态离子、土壤有机质等；抗生素还会通过光解、水解和生物降解等方式转化为无机或有机短链化合物。对于 ARGs，水平基因转移（HGT）是其传播的重要方式，其中可移动遗传元件是 HGT 的基础，发现接合、转化和传导 3 种 HGT 的分子转移机制[77]，阐明了抗性基因在土壤-微生物-动物-植物四元体系中的流动机制和生态环境风险[78]。

土壤中微/纳塑料在太阳辐射、风力、降水作用下产生老化和迁移等行为。微/纳塑料在老化过程中尺度、比表面积、表面电荷和官能团等将发生显著变化，影响其迁移和食物链传递能力，同时还易释放塑料制造工艺过程中添加的增塑剂和阻燃剂等污染物[79]；微/纳塑料在土壤中的迁移行为受到塑料自身特性、雨水淋滤、人为耕作和土壤动物行为的扰动[80]；此外，微/纳塑料对重金属和有机化合物具有较强吸附作用，使微/纳塑料成为污染载体，对土壤环境生态造成威胁[81]。

2.4　外源物质在土壤中的环境效应、评价与调控

研究土壤污染物的土壤环境效应是本学科持续关注的主题之一，其中植物、动物、微生物是土壤污染物效应的直接受体。围绕植物对重金属和有机化合物等外源物质的吸收、转运和累积开展了大量工作，研究了土壤 pH、阳离子交换量（CEC）、氧化还原电位（Eh）等土壤因素[82-83]，植物根系分泌物、根系泌氧、根表铁膜等植物生理因素[84-85]以及根系微生物[86-87]等对植物根部吸收污染物的影响过程及机制；探讨并量化了不同作物对污染物的吸收转运能力，探明了水稻等作物累积重金属的关键生育期[88]，此外借助 X 射线吸收光谱和荧光等技术揭示了可食部位污染物形态和分布等规律[89]。近年来，土壤中人工纳米颗粒、ARGs、微/纳塑料等新型污染物的暴露，其植物吸收和累积过程及机制受到关注[39，44-45，90-91]。对于土壤动物而言，研究了外源污染物对蚯蚓、跳虫等土壤动物存活率、繁殖率的急慢性毒性和致毒机制[92]。污染物对土壤微生物量、微生物活性均有一定影响，通过抑制土壤微生物的生命活动进而影响土壤有机质周转和营养元素循环等过程而降低土壤肥力，影响土壤环境质量[93]。

科学的土壤污染评价方法是掌握土壤污染程度，评估污染效应以及评判土壤修复必要性的基础，是土壤环境质量保护的一个重要内容。评价方法包括内梅罗指数法、地累积指数法、富集因子法、潜在生态危害指数法等指数法，以指数法为基础的模糊数学模型、灰色聚类法、层次分析法等模型指数法，以及人体健康风险评价法。其中一些常见的方法，例如内梅罗指数法、地累积指数法、富集因子法、潜在生态危害指数法等均起源于水生生态系统，在评价模型、参数的划分和等级的方法与陆地生态系统有较大的差异，亦缺乏与土地利用相结合的指标，故所得土壤评价结果不够科学合理，参考意义不大[94]。针对农田重金属污染，考虑了土壤污染总量和植物可利用度的结合，发展了一种土壤和农产品综合质量指数法[95]，以农田土壤和农产品中重金属的含量为基础，综合元素价态效应、土壤环境质量标准、土壤元素背景值、特定土壤负载容量和农产品污染物限量标准等要素，有针对性地应用于农田重金属污染评价。针对污染，已开发出成熟的操作软件，包括美国的基于风险的纠正行动（RBCA）软件和英国的污染土地暴露评估（CLEA）软件。2012 年，针对我国特定环境和地质场景，中国科学院南京土壤研究所率先自主研发了我国首套本土化的污染场地健康与环境风险评估（HERA）软件，具有功能全面、稳定性高等诸多特点[96]。

理解土壤中污染物形态、环境行为、归趋规律将有助于土壤环境修复研究的开展。在早期针对土壤重金属污染，发展出翻土、客土等物理法，利用碳酸盐和磷酸盐等无机钝化剂降低重金属溶解度的化学法[97]；利用金属离子在土壤溶液中的定向迁移发展出电动修复技术[98]；利用有机污染物的挥发性发展出土壤热脱附技术[99]；利用自由基的强氧化性发展出土壤有机污染高级氧化修复技术[63]；随后利用土壤微生物对重金属的生物吸附、氧化还原作用，对有机污染物的代谢分解作用，发展出强化土著微生物、接种外源微生物和基因工程菌等方

法[100]。利用植物对重金属和有机化合物的富集、固定、根际降解等作用，筛选培育重金属超富集植物，伴矿景天（*Sedum plumbizincicola*）、蜈蚣草（*Pteris vittata* L.）等[101-103]；研究了植物对有机污染物的累积转化规律以及强化根际矿化作用对有机污染物的转化作用。现阶段土壤修复理论与技术不断发展成熟，出版了《土壤污染与修复理论和实践系列丛书》[104]、《重金属污染土壤修复理论与实践》[105]等著作，形成土壤修复分支学科，并在保障土壤的农业生产与生态环境服务功能基础上，取得了良好修复效果[106]。

3 土壤质量演变与环境土壤学

土壤碳、氮、硫、磷元素的循环与环境质量、土壤退化与环境质量等是环境土壤学研究中不可或缺的组成部分。

3.1 土壤碳、氮、硫、磷元素循环

人们对土壤功能的早期认知以服务农业生产为主，碳、氮、硫、磷作为土壤中重要的营养元素，其在土壤中形态及其转化将深刻影响土壤肥力及土壤环境质量。土壤有机碳是土壤肥力的核心，其在土壤中的动态平衡与转化直接影响着土壤肥力的保持与提升，进而影响作物产量与品质，是发展可持续农业的基础[107]。探索了施肥等农业管理措施对土壤有机碳储量和土壤生产力的影响[108]，研究了土壤溶解性有机质对铁、锰离子的配位和迁移能力的影响[109]等。氮素是植物生长必需的大量营养元素，化学氮肥的输入极大地提升了农业产量；然而其巨量投入也对全球和区域的环境质量造成显著影响。因为氮肥输入量大，有效利用率低，容易形成农业非点源污染，土壤氮通过农田排水和地表径流造成水体富营养化和通过淋溶损失造成地下水硝酸盐含量超标等[110]；氮肥的输入还会造成蔬菜等农产品中硝酸盐累积以及土壤酸化等问题[111]。土壤硫素管理关乎土壤肥力以及生态环境健康。相关研究表明了作物缺硫和富硫均不利于其生长，影响作物品质[112]；土壤硫排放也会向大气输入其他硫化物，并最终形成硫酸与硫酸盐，并以酸沉降的形式造成土壤酸化，进一步影响土壤重金属活性和土壤生态等[113]。磷是农业生产中最重要的养分限制因子，土壤磷肥的大量输入极大地提升了农业生产力，探究了磷肥输入等对土壤微生物固定磷的影响等[114]。然而磷素流失也会造成的环境问题，因而相应的研究也受到广泛关注，包括土水界面磷的环境行为和归趋[115]，农田非点源磷对水体富营养化的影响等[116]。

3.2 全球气候变化与碳氮循环

在全球气候变化大背景下，197 个国家于 2015 年 12 月 12 日在巴黎召开的缔约方会议第 21 届会议上通过了《巴黎协定》，对此，中国力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和（简称“双碳”目标），该目标是我国按照《巴黎协定》规定更新的国家自主贡献强化目标以及面向 21 世纪中叶的长期温室气体低排放发展战略。土壤碳库是陆地生态系统中最大碳库，因此，土壤碳氮循环及对土壤环境质量的影响逐渐成为研究重点。土壤中碳的相关研究逐渐受到重点关注，土壤中碳储量变动将通过温室效应等深刻影响全球气候变化；与此同时，由全球气候变化造成的土壤水热梯度变化也将影响土壤呼吸过程从而进一步影响 CO_2 和 CH_4 等温室气体排放[117-119]。在土壤有机质研究方面，采用稳定同位素 ^{13}C 技术等，阐明了土壤类型、土壤团聚体物理保护、耕作管理、土壤有机质与土壤矿物化学键合保护等土壤固碳机制，研究土壤微生物碳泵介导的土壤碳储存机制和影响因素[120]，评估了其对有机质在土壤中赋存和周转过程的影响因素[121-123]；利用遥感（RS）、全球定位系统（GPS）、地理信息系统（GIS）（“3S”技术）建立土壤碳循环模型[124]。围绕土壤中氮素循环，研究了氮肥施用和化石燃料燃烧等人类活动造成的氮损失和氮沉降对土壤酸度、营养元素和金属阳离子活性等土壤环境的影响[125-126]，进一步探讨了农田和草地等生态系统中 N_2O 和 NO 排放对全球气候变化的反馈作用[125, 127]。

围绕土壤固碳减排措施开展了大量工作，生物炭对土壤环境的综合影响成为研究热点之一，围绕生物炭固碳减排、提升土壤肥力、对土壤污染物吸附固定、形态转化等开展了大量且较为深入的研究工作[128-129]，包括通过适宜的土地恢复利用和保护性耕作等土壤科学管理实践，以进一步减少土壤有机碳库损失及向大气排放的 CO_2[130]；探究不同耕作方式、水肥管理等农艺措施对土壤有机质稳定性的影响进而影响土壤温室气体排放[131-132]等。

3.3　土壤退化

农业生产潜力与调节环境容量是土壤的重要功能。在土壤的自然和人为（农业、城市化和工业化）影响演变中产生土壤污染、侵蚀、荒漠化、酸化、盐渍化和压实等土壤退化现象，造成土壤生产力或功能的丧失，或者生产经济产品和环境调节的内涵功能下降[1]，严重影响农业发展的可持续性及土壤的生态功能，故土壤退化研究持续受到关注。土壤污染造成的土壤退化问题已在污染物的环境效应中阐述，因此不再复述。

围绕土壤侵蚀问题，开展了水力侵蚀和重力侵蚀等的自然侵蚀和人类活动影响下的侵蚀机制研究，评估了土壤侵蚀造成的耕作层消失、土壤肥力下降及侵蚀过程伴生的非点源污染的影响[133]，提出具有经济性、长效性的植物种植水土保持措施，以及相关山坡防护、山沟治理等工程措施等[134]。针对我国黄土高原突出的水土流失问题，提出水土保持是“治黄”的根本，提出按流域治理、农林牧并举等防治措施[135-136]。围绕土壤酸化问题，分析了大气酸沉降和土壤管理措施（施肥）等酸化成因，评估了土壤酸化导致土壤肥力、养分循环和土壤生物的负面影响[137-138]。由中国科学院南京土壤研究所组织，在国家“八五”科技攻关专题“南方红壤退化机制及防治措施研究”等项目支持下，重点开展了我国南方和东部地区红壤区土壤退化的机制研究，利用定位观测和遥感技术等编制了相关区域的土壤退化分区图，建立并完善了土壤退化评价指标体系，评估了退化红壤肥力减退现状，提出了相关肥力恢复技术[139]。对土壤盐渍化问题，我国从 20 世纪 60 年代起在全国范围内开展了大量工作，研究了盐土、碱土的分布规律，分析了矿物风化、气象、水文地质条件、地下水状况和人为因素等造成土壤盐渍化条件[140-141]，提出应用井灌井排等综合治理旱涝盐碱[142]。针对干旱、半干旱和偏干旱的半湿润地区存在的荒漠化问题，研究了荒漠化发生发展过程与变化趋势，评估了荒漠化过程对土壤有养分、微生物活性和固碳能力的影响，提出恢复植被、构建护田林网、减少农民对土地的不合理使用等措施[143]。

近年来，在全球气候变化背景下的温度、降水时空格局变化对土壤退化过程和相关土壤环境效应的影响受到关注，借助同位素、“3S”技术、人工智能和机器学习等新技术，从区域大尺度层面阐明土壤退化对土壤性质，土壤生态环境效应以及大气、水体的综合影响[144]。发展出以生态功能提升为主的土壤退化阻控措施，评估了生物炭和其他新型土壤调理剂的改良效果[145]。

4　学科展望

4.1　加强多学科交叉融合促进学科发展

环境土壤学本身是一门新兴的土壤学和环境科学交叉融合的综合性学科，因此学科交叉是本学科得以延续发展的持续动力。与微生物学交叉，借助微生物分析技术和信息处理手段，在分子、生化、生理和群落水平上阐明微生物调控土壤营养元素循环，适应、代谢土壤污染物等的生物学机制，在此基础上与土壤界面化学机制耦合，阐明土壤微生物参与的营养元素、传统污染物、新型污染物的生物地球化学过程机制，特别是抗生素抗性基因、纳米材料颗粒、微塑料等；积极发展大数据模型，拓展微观机理模型，实现模型的精准尺度提升，实现大尺度范围内土壤营养元素循环和污染物转化的精准预测；与物理学、化学交叉，借鉴相关表征手段并优化至环境条件，探索复杂土壤条件下新型污染物精确分离定量和原位分析技术；与材料学交叉，开发具有环境友好、绿色低碳等优点的土壤修复功能材料。

4.2　全球气候变化背景下土壤元素循环的新认知

全球气候变化导致的气温和海平面的提升以及极端天气的频发将对土壤中营养元素及重（类）金属的生物地球化学循环产生显著影响。海水侵入将通过改变土壤孔隙水离子强度等影响土壤污染物的固持能力，产生迁移风险；极端降水和干旱天气，将改变土壤水分含量，进而通过改变土壤 pH、Eh、微生物活性等因素，影响土壤营养元素及重（类）金属的生物可利用性，另一方面大气 CO_2 浓度升高，有利于增强植物光合速率，那么营养元素及重（类）金属的土壤过程与植物生理过程的耦合将对农产品品质和安全性产生影响，甚至出现“隐形饥饿”问题。

4.3　完善土壤健康评价框架中的土壤环境评价指标

土壤和人类健康的关系是一个永恒的主题，健康的土壤应满足粮食、能源和生存环境等不同需要。健康土壤评价需要形成包含各种物理、化学和生物

学指标的框架体系，今后还需完善该框架下土壤环境评价指标以促进土壤健康的可持续性管理。土壤环境评价中应进一步加强微/纳塑料、抗生素、ARGs等新型污染物在土壤中的污染现状-赋存形态-环境行为-污染效应研究，并纳入原有土壤环境评价体系；加强农田土壤-作物体系污染综合评价，发展兼顾土壤性质和作物吸收累积特性的区域性精准评价模型；完善区域土壤环境容量和承载力的精准评估模型，量化土壤所能容纳污染物的最大负荷量以及所能承受的人类活动的规模和强度。

4.4 学科发展服务国家重大需求

生态环境是人类生存最为基础的条件，生态文明建设更是关乎中华民族永续发展的根本大计。土壤环境保护是生态文明建设的重要环节，环境土壤学学科发展应为此提供科技保障和支撑。应积极推动生态文明制度体系构建，完善土壤污染防治技术标准与规范，更新监管重点污染物名单，为后续《中华人民共和国土壤污染防治法》修订完善提供技术支撑。进一步提升土壤环境质量，尤其注重提高耕地内在质量；针对土壤酸化、盐渍化、侵蚀等耕地退化以及耕地养分失衡等情况，提出相应阻控举措，提升基础地力，实现节本增效、提质增效。着力打赢污染防治攻坚战，一方面加强土壤污染过程和调控机制研究，阐明特征污染物土壤污染机制；另一方面，加强土壤污染修复技术发展与集成，因地制宜开展绿色、经济和长效性修复；持续推进精准治污和科学治污。积极开展土壤环境容量与承载力研究，厘清不同理化性质和土地利用类型土壤所能容纳的最大污染负载量，进一步掌握土壤单元所能承受的人类活动的规模和强度，优化国土空间开发保护格局。积极应对全球气候变化，参与全球环境与气候治理，注重发展农业土壤固碳减排措施，通过适宜的土地恢复利用和保护性耕作等土壤科学管理实践减少土壤碳库损失。

参考文献（References）

[1] Chen H M，Zhu Y G，Dong Y H，Zhou D M. Environmental soil science[M]. 3rd ed. Beijing：Science Press，2018. [陈怀满，朱永官，董元华，周东美. 环境土壤学[M]. 第3版. 北京：科学出版社，2018.]

[2] Rojas R V，Achouri M，Maroulis J，et al. Healthy soils：A prerequisite for sustainable food security[J]. Environmental Earth Sciences，2016，75（3）：1—10.

[3] Zhang J Z，Li Y Z，Li Y et al. Advances in the indicator system and evaluation approaches of soil health[J]. Acta Pedologica Sinica，2022，59（3）：603—616. [张江周，李奕赞，李颖，等. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J]. 土壤学报，2022，59（3）：603—616.]

[4] Zhao F J，Ma Y，Zhu Y G，et al. Soil contamination in China：Current status and mitigation strategies[J]. Environmental Science & Technology，2015，49（2）：750—759.

[5] Rappe C，Kjeller L O. PCDDS and PCDFS in environmental-samples air，particulates，sediments and soil[J]. Chemosphere，1987，16（8/9）：1775—1780.

[6] Nestrick T J，Lamparski L L，Frawley N N，et al. Perspectives of a large-scale environmental survey for chlorinated dioxins - Overview and soil data[J]. Chemosphere，1986，15（9/12）：1453—1460.

[7] Wang D，Yang M，Jia H，et al. Seasonal variation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil and air of Dalian areas，China：An assessment of soil-air exchange[J]. Journal of Environmental Monitoring，2008，10（9）：1076—1083.

[8] Liu H L，Zhou J，Li M，et al. Dynamic behaviors of newly deposited atmospheric heavy metals in the soil-pak choi system[J]. Environmental Science & Technology，2022，56（17）：12734—12744.

[9] Wu Q M，Hu W Y，Wang H F，et al. Spatial distribution，ecological risk and sources of heavy metals in soils from a typical economic development area，Southeastern China[J]. Science of the Total Environment，2021，780：146557.

[10] Chinese Academy of Sciences Collaboration Group of Soil Background Values. Natural background values of several elements in soils in Beijing and Nanjing regions[J]. Acta Pedologica Sinica，1979，16（4）：319—328. [中国科学院土壤背景值协作组. 北京、南京地区土壤中若干元素的自然背景值[J]. 土壤学报，1979，16（4）：319—328.]

[11] Collaboration Group of Agricultural Environment Background Values. Study on environmental background values of hazardous elements in main agricultural soils and food crops of thirteen provinces（cities）in China[J]. Journal of Agro-Environment Science，1986（3）：1—11. [农业环境背景值协作组. 我国十三省（市）主要农业土壤及粮食作物中有害元素环境背景值研究[J]. 农业环境科学学报，1986（3）：1—11.]

[12] Deng B，Qin J H. Concerning some issues in the statistical processing of environmental background values data for soil elements[J]. Environmental Science，1987，8（3）：89—93. [邓勃，秦建侯. 关于土壤元素环境背景值数据统计处理中的一些问题[J]. 环境科学，1987，8（3）：89—93.]

[13] Chen H M，Zheng C R，Sun X H. Factors affecting the

soil environmental capacity for lead[J]. Soils，1994，26（4）：189—195，188. [陈怀满，郑春荣，孙小华. 影响铅的土壤环境容量的因素[J]. 土壤，1994，26（4）：189—195，188.]

[14] Zheng C R，Chen H M. Soil loading capacity of heavy metals[J]. Progress in Soil Science，1995，23（6）：21—28. [郑春荣，陈怀满. 重金属的土壤负载容量[J]. 土壤学进展，1995，23（6）：21—28.]

[15] National Environmental Protection Agency. Study on environmental background values and environmental carrying capacity[M]. Beijing：Science Press，1992. [国家环境保护局. 环境背景值和环境容量研究[M]. 北京：科学出版社，1992.]

[16] Xia Z L. Study on soil environmental carrying capacity[M]. Beijing：China Meteorological Press，1986. [夏增禄. 土壤环境容量研究[M]. 北京：气象出版社，1986.]

[17] Zhou D M，Wang Y J，Chen H M. Independence and dependence of soil environmental quality standard for heavy metals[J]. Journal of Agro-Environment Science，2014，33（2）：205—216. [周东美，王玉军，陈怀满. 论土壤环境质量重金属标准的独立性与依存性[J]. 农业环境科学学报，2014，33（2）：205—216.]

[18] Sposito G，Lund L，Chang A. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge：I. Fractionation of Ni，Cu，Zn，Cd，and Pb in solid phases[J]. Soil Science Society of America Journal，1982，46（2）：260—264.

[19] Meers E，Du Laing G，Unamuno V，et al. Comparison of cadmium extractability from soils by commonly used single extraction protocols[J]. Geoderma，2007，141（3/4）：247—259.

[20] Tessier A，Campbell P G，Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry，1979，51（7）：844—851.

[21] Wenzel W W，Kirchbaumer N，Prohaska T，et al. Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure[J]. Analytica Chimica Acta，2001，436（2）：309—323.

[22] Ure A，Quevauviller P，Muntau H，et al. Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the Commission of the European Communities[J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry，1993，51（1/4）：135—151.

[23] Gan J，Papiernik S，Koskinen W，et al. Evaluation of accelerated solvent extraction（ASE）for analysis of pesticide residues in soil[J]. Environmental Science & Technology，1999，33（18）：3249—3253.

[24] Ye M，Yang X L，Sun M M，et al. Use of organic solvents to extract organochlorine pesticides（OCPs）from aged contaminated soils[J]. Pedosphere，2013，23（1）：10—19.

[25] Cheng H，Song Y，Bian Y，et al. Meso-/microporous carbon as an adsorbent for enhanced performance in solid-phase microextraction of chlorobenzenes[J]. Science of the Total Environment，2019，681：392—399.

[26] Hernandez F，Beltran J，Lopez F J，et al. Use of solid-phase microextraction for the quantitative determination of herbicides in soil and water samples[J]. Analytical Chemistry，2000，72（10）：2313—2322.

[27] Fan T T，Wang Y J，Li C B，et al. Effect of organic matter on sorption of Zn on soil：Elucidation by Wien effect measurements and EXAFS spectroscopy[J]. Environmental Science & Technology，2016，50（6）：2931—2937.

[28] Wang J，Wang P M，Gu Y，et al. Iron–manganese（oxyhydro）oxides，rather than oxidation of sulfides，determine mobilization of Cd during soil drainage in paddy soil systems[J]. Environmental Science & Technology，2019，53（5）：2500—2508.

[29] Voegelin A，Weber F-A，Kretzschmar R. Distribution and speciation of arsenic around roots in a contaminated riparian floodplain soil：Micro-XRF element mapping and EXAFS spectroscopy[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta，2007，71（23）：5804—5820.

[30] Scheinost A C，Rossberg A，Vantelon D，et al. Quantitative antimony speciation in shooting-range soils by EXAFS spectroscopy[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta，2006，70（13）：3299—3312.

[31] Xia X，Yang J，Yan Y，et al. Molecular sorption mechanisms of Cr（III）to organo-ferrihydrite coprecipitates using synchrotron-based EXAFS and STXM techniques[J]. Environmental Science & Technology，2020，54（20）：12989—12997.

[32] Muehe E M，Adaktylou I J，Obst M，et al. Organic carbon and reducing conditions lead to cadmium immobilization by secondary Fe mineral formation in a pH-neutral soil[J]. Environmental Science & Technology，2013，47（23）：13430—13439.

[33] Burton E D，Johnston S G，Kocar B D. Arsenic mobility during flooding of contaminated soil：the effect of microbial sulfate reduction[J]. Environmental Science & Technology，2014，48（23）：13660—13667.

[34] Hu S，Lu Y，Peng L，et al. Coupled kinetics of ferrihydrite transformation and As（V）sequestration under the effect of humic acids：a mechanistic and quantitative study[J]. Environmental Science & Technology，2018，52（20）：11632—11641.

[35] Wang P，Ding Y，Liang Y，et al. Linking molecular composition to proton and copper binding ability of fulvic acid：A theoretical modeling approach based on FT-ICR-MS analysis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta，2021，312：279—298.

[36] Lv J，Zhang S，Wang S，et al. Molecular-scale

investigation with ESI-FT-ICR-MS on fractionation of dissolved organic matter induced by adsorption on iron oxyhydroxides[J]. Environmental Science & Technology，2016，50（5）：2328—2336.

[37] Huang Y N，Liu C，Cui P X，et al. Copper（I）promotes silver sulfide dissolution and increases silver phytoavailability[J]. Environmental Science & Technology，2020，54（9）：5589—5597.

[38] Gu C，Liu C，Johnston C T，et al. Pentachlorophenol radical cations generated on Fe（III）-montmorillonite initiate octachlorodibenzo-p-dioxin formation in clays：density functional theory and fourier transform infrared studies[J]. Environmental Science & Technology，2011，45（4）：1399—1406.

[39] Huang D Y，Dang F，Huang Y N，et al. Uptake，translocation，and transformation of silver nanoparticles in plants[J]. Environmental Science：Nano，2022，9（1）：12—39.

[40] Cai W P，Wang Y J，Feng Y，et al. Extraction and quantification of nanoparticulate mercury in natural soils[J]. Environmental Science & Technology，2022，56（3）：1763—1770.

[41] Hu P，Zhang Y，Wang J，et al. Mobilization of colloid-and nanoparticle-bound arsenic in contaminated paddy soils during reduction and reoxidation[J]. Environmental Science & Technology，2023，57（26）：9843—9853.

[42] Zhu Y G，Johnson T A，Su J Q，et al. Diverse and abundant antibiotic resistance genes in Chinese swine farms[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences，2013，110（9）：3435—3440.

[43] Chen Y N，Sun K，Han L F，et al. Separation，identification，and quantification methods in soil microplastics analysis：A review[J]. Acta Pedologica Sinica，2022，59（2）：364—380.[陈雅兰，孙可，韩兰芳，等. 土壤中微塑料的分离及检测方法研究进展[J]. 土壤学报，2022，59（2）：364—380.]

[44] Luo Y M，Li L Z，Feng Y D，et al. Quantitative tracing of uptake and transport of submicrometre plastics in crop plants using lanthanide chelates as a dual-functional tracer[J]. Nature Nanotechnology，2022，17（4）：424—431.

[45] Li L Z，Luo Y M，Li R J，et al. Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode[J]. Nature Sustainability，2020，3（11）：929—937.

[46] Fendorf S，Eick M J，Grossl P，et al. Arsenate and chromate retention mechanisms on goethite.1. Surface structure[J]. Environmental Science & Technology，1997，31（2）：315—320.

[47] Voegelin A，Kretzschmar R. Formation and dissolution of single and mixed Zn and Ni precipitates in soil：Evidence from column experiments and extended X-ray absorption fine structure spectroscopy[J]. Environmental Science & Technology，2005，39（14）：5311—5318.

[48] Manning B A，Fendorf S E，Suarez D L. Arsenic（III）complexation and oxidation reactions on soil//Cai Y，Braids O C. Biogeochemistry of environmentally important trace elements[M]. Washington，USA：American Chemical Society，2003：57—69.

[49] Shi Z Q，Di Toro D M，Allen H E，et al. A general model for kinetics of heavy metal adsorption and desorption on soils[J]. Environmental Science & Technology，2013，47（8）：3761—3767.

[50] Wang Y J，Chen J H，Cui Y X，et al. Effects of low-molecular-weight organic acids on Cu（II）adsorption onto hydroxyapatite nanoparticles[J]. Journal of Hazardous Materials，2009，162（2/3）：1135—1140.

[51] Fu Q L，He J Z，Blaney L，et al. Sorption of roxarsone onto soils with different physicochemical properties[J]. Chemosphere，2016，159：103—112.

[52] Elkhatib E，Bennett O，Wright R. Kinetics of arsenite sorption in soils[J]. Soil Science Society of America Journal，1984，48（4）：758—762.

[53] Wang Y J，Cui Y X，Zhou D M，et al. Adsorption kinetics of glyphosate and copper（II）alone and together on two types of soils[J]. Soil Science Society of America Journal，2009，73（6）：1995—2001.

[54] Weng L P，Vega F A，van Riemsdijk W H. Competitive and synergistic effects in pH dependent phosphate adsorption in soils：LCD modeling[J]. Environmental Science & Technology，2011，45（19）：8420—8428.

[55] Xiong J，Weng L P，Koopal L K，et al. Effect of soil fulvic and humic acids on Pb binding to the goethite/solution interface：Ligand charge distribution modeling and speciation distribution of Pb[J]. Environmental Science & Technology，2018，52（3）：1348—1356.

[56] Shi Z Q，Toro D M D，Allen H E，et al. A WHAM-based kinetics model for Zn adsorption and desorption to soils[J]. Environmental Science & Technology，2008，42（15）：5630—5636.

[57] Manning B A，Suarez D L. Modeling arsenic（III）adsorption and heterogeneous oxidation kinetics in soils[J]. Soil Science Society of America Journal，2000，64（1）：128—137.

[58] Wu T L，Liu C，Cui P X，et al. Kinetics of coupled sorption and abiotic oxidation of antimony（III）in soils[J]. Geoderma，2023，434：116486.

[59] Kim J G，Dixon J B，Chusuei C C，et al. Oxidation of chromium（III）to（VI）by manganese oxides[J]. Soil Science Society of America Journal，2002，66（1）：306—315.

[60] Fang G D，Chen X R，Wu W H，et al. Mechanisms of interaction between persulfate and soil constituents：Activation，free radical formation，conversion，and identification[J]. Environmental Science & Technology，

2018，52（24）：14352—14361.

[61] Wu T L，Qin W X，Alves M E，et al. Mechanisms of Sb（III）oxidation mediated by low molecular weight phenolic acids[J]. Chemical Engineering Journal，2019，356：190—198.

[62] Zhong D，Jiang Y，Zhao Z，et al. pH dependence of arsenic oxidation by rice-husk-derived biochar：roles of redox-active moieties[J]. Environmental Science & Technology，2019，53（15）：9034—9044.

[63] Song Y，Fang G D，Zhu C Y，et al. Zero-valent iron activated persulfate remediation of polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated soils：An in situ pilot-scale study[J]. Chemical Engineering Journal，2019，355：65—75.

[64] Zhu S，Huang X，Yang X，et al. Enhanced transformation of Cr（VI）by heterocyclic-N within nitrogen-doped biochar：Impact of surface modulatory persistent free radicals（PFRs）[J]. Environmental Science & Technology，2020，54（13）：8123—8132.

[65] Huang Y N，Qian T T，Dang F，et al. Significant contribution of metastable particulate organic matter to natural formation of silver nanoparticles in soils[J]. Nature Communications，2019，10（1）：3775.

[66] Sun Z Y，Chu L G，Wang X H，et al. Roles of natural phenolic compounds in polycyclic aromatic hydrocarbons abiotic attenuation at soil–air interfaces through oxidative coupling reactions[J]. Environmental Science & Technology，2023，57（32）：11967—11976.

[67] Sun Z Y，Wang X H，Liu C，et al. Persistent free radicals from low-molecular-weight organic compounds enhance cross-coupling reactions and toxicity of anthracene on amorphous silica surfaces under light[J]. Environmental Science & Technology，2021，55（6）：3716—3726.

[68] Shi L D，Zhou Y J，Tang X J，et al. Coupled aerobic methane oxidation and arsenate reduction contributes to soil-arsenic mobilization in agricultural fields[J]. Environmental Science & Technology，2022，56（16）：11845—11856.

[69] Yu H，He Z，He Z，et al. Soil amoebae affect iron and chromium reduction through preferential predation between two metal-reducing bacteria[J]. Environmental Science & Technology，2022，56（12）：9052—9062.

[70] Wang J，Shaheen S M，Jing M，et al. Mobilization，methylation，and demethylation of mercury in a paddy soil under systematic redox changes[J]. Environmental Science & Technology，2021，55（14）：10133—10141.

[71] Cañas A I，Alcalde M，Plou F，et al. Transformation of polycyclic aromatic hydrocarbons by laccase is strongly enhanced by phenolic compounds present in soil[J]. Environmental Science & Technology，2007，41（8）：2964—2971.

[72] Li Y，Zhao J，Zhong H，et al. Understanding enhanced microbial MeHg production in mining-contaminated paddy soils under sulfate amendment：Changes in Hg mobility or microbial methylators?[J]. Environmental Science & Technology，2019，53（4）：1844—1852.

[73] Zhao F J，Harris E，Yan J，et al. Arsenic methylation in soils and its relationship with microbial arsM abundance and diversity，and As speciation in rice[J]. Environmental Science & Technology，2013，47（13）：7147—7154.

[74] Wu Y D，Li F B，Liu T X. Mechanism of extracellular electron transfer among microbe-humus-mineral in soil：A review[J]. Acta Pedologica Sinica，2016，53（2）：277—291. [吴云当，李芳柏，刘同旭. 土壤微生物—腐殖质—矿物间的胞外电子传递机制研究进展[J]. 土壤学报，2016，53（2）：277—291.]

[75] Wang R，Dang F，Liu C，et al. Heteroaggregation and dissolution of silver nanoparticles by iron oxide colloids under environmentally relevant conditions[J]. Environmental Science：Nano，2019，6（1）：195—206.

[76] Wang D，Bradford S A，Harvey R W，et al. Humic acid facilitates the transport of ARS-labeled hydroxyapatite nanoparticles in iron oxyhydroxide-coated sand[J]. Environmental Science & Technology，2012，46（5）：2738—2745.

[77] Chen Q，An X，Li H，et al. Long-term field application of sewage sludge increases the abundance of antibiotic resistance genes in soil[J]. Environment International，2016，92：1—10.

[78] Zhu D，Chen Q L，Ding J，et al. Antibiotic resistance genes in the soil ecosystem and planetary health：Progress and prospect[J]. Scientia Sinica Vitae，2019，49：1652—1663. [朱冬，陈青林，丁晶，等. 土壤生态系统中抗生素抗性基因与星球健康：进展与展望[J]. 中国科学：生命科学，2019，49：1652—1663.]

[79] Liu J，Zhang T，Tian L，et al. Aging significantly affects mobility and contaminant-mobilizing ability of nanoplastics in saturated loamy sand[J]. Environmental Science & Technology，2019，53（10）：5805—5815.

[80] Alimi O S，Farner Budarz J，Hernandez L M，et al. Microplastics and nanoplastics in aquatic environments：Aggregation，deposition，and enhanced contaminant transport[J]. Environmental Science & Technology，2018，52（4）：1704—1724.

[81] Liu J，Ma Y，Zhu D，et al. Polystyrene nanoplastics-enhanced contaminant transport：Role of irreversible adsorption in glassy polymeric domain[J]. Environmental Science & Technology，2018，52（5）：2677—2685.

[82] Zhao F J，Wang P. Arsenic and cadmium accumulation in rice and mitigation strategies[J]. Plant and Soil，2020，446：1—21.

[83] Fang X，Muntwyler A，Schneider P，et al. Exploring key soil parameters relevant to arsenic and cadmium

accumulation in rice grain in southern China[J]. Soil Systems，2022，6（2）：36.

[84] Jiang O，Li L，Duan G，et al. Root exudates increased arsenic mobility and altered microbial community in paddy soils[J]. Journal of Environmental Sciences，2023，127：410—420.

[85] Liu W J，Zhu Y G，Smith F，et al. Do phosphorus nutrition and iron plaque alter arsenate（As）uptake by rice seedlings in hydroponic culture?[J]. New Phytologist，2004，162（2）：481—488.

[86] Jia Y，Huang H，Chen Z，et al. Arsenic uptake by rice is influenced by microbe-mediated arsenic redox changes in the rhizosphere[J]. Environmental Science & Technology，2014，48（2）：1001—1007.

[87] Jia Y，Huang H，Zhong M，et al. Microbial arsenic methylation in soil and rice rhizosphere[J]. Environmental Science & Technology，2013，47（7）：3141—3148.

[88] Huang B Y，Zhao F J，Wang P. The relative contributions of root uptake and remobilization to the loading of Cd and As into rice grains：Implications in simultaneously controlling grain Cd and As accumulation using a segmented water management strategy[J]. Environmental Pollution，2022，293：118497.

[89] Wu T L，Cui X D，Cui P X，et al. Speciation and location of arsenic and antimony in rice samples around antimony mining area[J]. Environmental Pollution，2019，252：1439—1447.

[90] Chen Q L，Cui H L，Su J Q，et al. Antibiotic resistomes in plant microbiomes[J]. Trends in Plant Science，2019，24（6）：530—541.

[91] Qiao M，Ying G G，Singer A C，et al. Review of antibiotic resistance in China and its environment[J]. Environment International，2018，110：160—172.

[92] Wan Y，Jiang B，Wei D，et al. Ecological criteria for zinc in Chinese soil as affected by soil properties[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety，2020，194：110418.

[93] Yang Y，Peng Y，Ma Y，et al. Effects of aging and reduction processes on Cr toxicity to wheat root elongation in Cr（VI）spiked soils[J]. Environmental Pollution，2022，296：118784.

[94] Wang Y J，Wu T L，Zhou D M，et al. Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis[J]. Journal of Agro-Environment Science，2017，36（12）：2365—2378. [王玉军，吴同亮，周东美，等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. 农业环境科学学报，2017，36（12）：2365—2378.]

[95] Wang Y J，Liu C，Zhou D M，et al. A new approach for evaluating soil heavy metal impact：A comprehensive index combined soil environmental quality and agricultural products quality[J]. Journal of Agro-Environment Science，2016，35（7）：1225—1232. [王玉军，刘存，周东美，等. 一种农田土壤重金属影响评价的新方法：土壤和农产品综合质量指数法[J]. 农业环境科学学报，2016，35（7）：1225—1232.]

[96] Chen M F. Health and environmental risk assessment software（HERA）for contaminated sites [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2014，29（3）：344—344. [陈梦舫. 污染场地健康与环境风险评估软件（HERA）[J]. 中国科学院院刊，2014，29（3）：344—344.]

[97] Cui H，Ma K，Fan Y，et al. Stability and heavy metal distribution of soil aggregates affected by application of apatite，lime，and charcoal[J]. Environmental Science and Pollution Research，2016，23：10808—10817.

[98] Zhou D M，Deng C F，Cang L. Electrokinetic remediation of a Cu contaminated red soil by conditioning catholyte pH with different enhancing chemical reagents[J]. Chemosphere，2004，56（3）：265—273.

[99] Ding D，Song X，Wei C，et al. A review on the sustainability of thermal treatment for contaminated soils[J]. Environmental Pollution，2019，253：449—463.

[100] Wang X，Teng Y，Tu C，et al. Coupling between nitrogen fixation and tetrachlorobiphenyl dechlorination in a rhizobium–legume symbiosis[J]. Environmental Science & Technology，2018，52（4）：2217—2224.

[101] Ma L Q，Komar K M，Tu C，et al. A fern that hyperaccumulates arsenic[J]. Nature，2001，409（6820）：579—579.

[102] Chen T B，Wei Z Y，Huang Z C，et al. Arsenic hyperaccumulating plant *Pteris vittata* and its accumulation characteristics of arsenic[J]. Chinese Science Bulletin，2002，47（3）：207—210. [陈同斌，韦朝阳，黄泽春，等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报，2002，47（3）：207—210.]

[103] Wu L H，Zhou S B，Bi D，et al. *Sedum plumbizincicola*，a new species of the crassulaceae from Zhejiang，China[J]. Soils，2006，38（5）：632—633. [吴龙华，周守标，毕德，等. 中国景天科植物一新种——伴矿景天[J]. 土壤，2006，38（5）：632—633.]

[104] Luo Y M，et al. Series on theory and practice of soil pollution and remediation[M]. Beijing：Science Press，2016. [骆永明，等. 土壤污染与修复理论和实践系列丛书[M]. 北京：科学出版社，2016.]

[105] Zhang N M，et al. Theory and practice of remediation of heavy metal contaminated soil[M]. Beijing：Chemical Industry Press，2017. [张乃明，等. 重金属污染土壤修复理论与实践[M]. 北京：化学工业出版社，2017.]

[106] Luo Y M，Ten Y，Guo Y. Soil remediation - A new branch discipline of soil science[J]. Soils，2005，37（3）：230—235. [骆永明，滕应，过园. 土壤修复—新兴的土壤科学分支学科[J]. 土壤，2005，37（3）：230—235.]

[107] Tiessen H，Cuevas E，Chacon P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility[J]. Nature，1994，371（6500）：783—785.

[108] Lin Y，Ye G，Kuzyakov Y，et al. Long-term manure application increases soil organic matter and aggregation，and alters microbial community structure and keystone taxa[J]. Soil Biology & Biochemistry，2019，134：187—196.

[109] Li X M，Sun G X，Chen S C，et al. Molecular chemodiversity of dissolved organic matter in paddy soils[J]. Environmental Science & Technology，2018，52（3）：963—971.

[110] Sebilo M，Mayer B，Nicolardot B，et al. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences，2013，110（45）：18185—18189.

[111] Zeng M，De Vries W，Bonten L T，et al. Model-based analysis of the long-term effects of fertilization management on cropland soil acidification[J]. Environmental Science & Technology，2017，51（7）：3843—3851.

[112] Castellano S，Dick R. Cropping and sulfur fertilization influence on sulfur transformations in soil[J]. Soil Science Society of America Journal，1991，55（1）：114—121.

[113] Carmichael G R，Streets D G，Calori G，et al. Changing trends in sulfur emissions in Asia：Implications for acid deposition，air pollution，and climate[J]. Environmental Science & Technology，2002，36（22）：4707—4713.

[114] Dai Z，Liu G，Chen H，et al. Long-term nutrient inputs shift soil microbial functional profiles of phosphorus cycling in diverse agroecosystems[J]. The ISME Journal，2020，14（3）：757—770.

[115] Chen H，Yuan J，Chen G，et al. Long-term biochar addition significantly decreases rice rhizosphere available phosphorus and its release risk to the environment[J]. Biochar，2022，4（1）：54.

[116] Gao Y，Zhu B，Wang T，et al. Seasonal change of non-point source pollution-induced bioavailable phosphorus loss：A case study of Southwestern China[J]. Journal of Hydrology，2012，420：373—379.

[117] Iqbal J，Hu R，Du L，et al. Differences in soil CO_2 flux between different land use types in mid-subtropical China[J]. Soil Biology & Biochemistry，2008，40（9）：2324—2333.

[118] Weitz A M，Linder E，Frolking S，et al. N_2O emissions from humid tropical agricultural soils：Effects of soil moisture，texture and nitrogen availability[J]. Soil Biology & Biochemistry，2001，33（7/8）：1077—1093.

[119] Chen L，Huang Z，Gong J，et al. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the Loess Plateau，China[J]. Catena，2007，70（2）：200—208.

[120] Liang C，Zhu X F. The soil microbial carbon pump as a new concept for terrestrial carbon sequestration[J]. Science China Earth Sciences，2021，64（4）：545—558. [梁超，朱雪峰. 土壤微生物碳泵储碳机制概论[J]. 中国科学：地球科学，2021，51（5）：680—695.]

[121] Schmidt M W I，Torn M S，Abiven S，et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. Nature，2011，478（7367）：49—56.

[122] Xia L L，Yan X Y，Cai Z C. Research progress and prospect of greenhouse gas mitigation and soil carbon sequestration in croplands of China[J]. Journal of Agro-Environment Science，2020，39（4）：834—841. [夏龙龙，颜晓元，蔡祖聪. 我国农田土壤温室气体减排和有机碳固定的研究进展及展望[J]. 农业环境科学学报，2020，39（4）：834—841.]

[123] Song P，Zhang N L，Ma K P，et al. Impacts of global warming on litter decomposition[J]. Acta Ecologica Sinica，2014，34（6）：1327—1339. [宋飘，张乃莉，马克平，等. 全球气候变暖对凋落物分解的影响[J]. 生态学报，2014，34（6）：1327—1339.]

[124] Wang S，Gao J，Zhuang Q，et al. Multispectral remote sensing data are effective and robust in mapping regional forest soil organic carbon stocks in a northeast forest region in China[J]. Remote Sensing，2020，12（3）：393.

[125] Snyder C S，Bruulsema T W，Jensen T L，et al. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects[J]. Agriculture Ecosystems & Environment，2009，133（3/4）：247—266.

[126] Matson P A，Mcdowell W H，Townsend A R，et al. The globalization of N deposition：Ecosystem consequences in tropical environments[J]. Biogeochemistry，1999，46（1/3）：67—83.

[127] Flechard C R，Ambus P，Skiba U，et al. Effects of climate and management intensity on nitrous oxide emissions in grassland systems across Europe[J]. Agriculture Ecosystems & Environment，2007，121（1/2）：135—152.

[128] Weng Z，van Zwieten L，Singh B P，et al. Biochar built soil carbon over a decade by stabilizing rhizodeposits[J]. Nature Climate Change，2017，7（5）：371—376.

[129] Wu S，Fang G D，Wang Y J，et al. Redox-active oxygen-containing functional groups in activated carbon facilitate microbial reduction of ferrihydrite[J]. Environmental Science & Technology，2017，51（17）：9709—9717.

[130] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. Geoderma，2004，123（1/2）：1—22.

[131] Qin Y，Li B B，Wu L F. Dynamics and interrelationship of CO_2 emissions and dissolved organic carbon in soils with crop residue retention under different tillage practices[J]. Journal of Agro-Environment Science，2014，33（7）：1442—1449. [秦越，李彬彬，武兰芳. 不同耕作措施下秸秆还田土壤 CO_2 排放与溶解性有机碳的动态变化及其关系[J]. 农业环境科学学报，2014，33（7）：1442—1449.]

[132] Xie L Y，Xu J，Guo L P，et al. Impact of water/fertilizer management on methane emission in paddy fields and on

global warming potential[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2017，25（7）：958—967. [谢立勇，许婧，郭李萍，等. 水肥管理对稻田 CH_4 排放及其全球增温潜势影响的评估[J]. 中国生态农业学报，2017，25（7）：958—967.]

[133] Wang Y，Liu G，Zhao Z，et al. Using soil erosion to locate nonpoint source pollution risks in coastal zones：A case study in the Yellow River Delta，China[J]. Environmental Pollution，2021，283：117117.

[134] Guerra A J T，Fullen M A，Jorge M D C O，et al. Slope processes，mass movement and soil erosion：A review[J]. Pedosphere，2017，27（1）：27—41.

[135] Zuo D K，Xu Y X. Several issues in Huanghe River management research[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，1987（4）：313—316. [左大康，许越先. 治黄研究中的几个问题[J]. 中国科学院院刊，1987（4）：313—316.]

[136] Tang K L，Zhang Z Z，Kong X L，et al. Preliminary report on water and soil loss and soil degradation in the Loess Plateau[J]. Environmental Science，1984，5（6）：5—10. [唐克丽，张仲子，孔晓玲，等. 黄土高原水土流失与土壤退化研究初报[J]. 环境科学，1984，5（6）：5—10.]

[137] Schroder J L，Zhang H，Girma K，et al. Soil acidification from long-term use of nitrogen fertilizers on winter wheat[J]. Soil Science Society of America Journal，2011，75（3）：957—964.

[138] Kunhikrishnan A，Thangarajan R，Bolan N，et al. Functional relationships of soil acidification，liming，and greenhouse gas flux[J]. Advances in Agronomy，2016，139：1—71.

[139] Zhang T L，Wang X X. Progress and trends in soil degradation research[J] Journal of Natural Resources，2000，15（3）：280—284. [张桃林，王兴祥. 土壤退化研究的进展与趋向[J]. 自然资源学报，2000，15（3）：280—284.]

[140] Wang Z Q，Li L Q，Liu Y C，et al. Formation conditions and distribution patterns of saline-alkali soils in Liaocheng，Shandong Province[J]. Acta Pedologica Sinica，1963，11（4）：343—360. [王遵亲，黎立羣，刘有昌，等. 山东聊城盐渍土的形成条件及其分布规律[J]. 土壤学报，1963，11（4）：343—360.]

[141] Liu C T，Zhang H C. Saline-alkali soils in Fengqiu County，Henan Province and their improvement approaches[J]. Acta Pedologica Sinica，1965，13（1）：46—58. [刘春堂，张鸿程. 河南封丘县盐渍土及其改良途径[J]. 土壤学报，1965，13（1）：46—58.]

[142] Hseung Y. Causes and prevention of soil salinization and alkalization in irrigated areas[J]. Soils，1960，3（2）：1—5. [熊毅. 灌区土壤盐碱化的原因和防治[J]. 土壤，1960，3（2）：1—5.]

[143] Zhang W X. Succession process of vegetation in the Qaidam basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment，1988（3）：77—84. [张维祥. 柴达木盆地土被的旱生演替过程[J]. 干旱区资源与环境，1988（3）：77—84.]

[144] Borrelli P，Robinson D A，Panagos P，et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water（2015—2070）[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences，2020，117（36）：21994—22001.

[145] Yuan J H，Xu R K，Wang N，et al. Amendment of acid soils with crop residues and biochars[J]. Pedosphere，2011，21（3）：302—308.

（责任编辑：陈德明）