

DOI: 10.11766/trxb202004190179

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.

LUO Yongming, TENG Ying. Research Progresses and Prospects on Soil Pollution and Remediation in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1137–1142.

中国土壤污染与修复科技研究进展和展望*

骆永明, 滕 应

(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: 土壤污染与修复是土壤学的一个重要分支学科, 对推进中国土壤污染管控与修复工作、保障国家土壤环境安全和生态文明建设发挥着重要的科技支撑作用。简要分析了我国土壤污染状况, 介绍了国内外土壤污染与修复技术研究现状与发展趋势, 指出了我国土壤污染防治科技研发中存在的若干问题, 提出了今后我国土壤污染与修复科技研究与发展的总体思路与主要方向等对策建议。

关键词: 中国; 土壤污染; 土壤修复; 科技进展; 发展方向; 对策建议

中图分类号: X53 **文献标志码:** A

Research Progresses and Prospects on Soil Pollution and Remediation in China

LUO Yongming, TENG Ying

(Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Soil pollution and remediation is an important branch of soil science, which plays a key role in promoting control and remediation of soil pollution and ensuring the national soil environmental security and ecological civilization construction in China. This paper briefly states soil pollution status in China, introduces the research status and development trend in soil pollution and remediation at home and abroad, points out some problems in the research and development of soil pollution prevention and control in China, and puts forward the countermeasures and suggestions on general strategies and main directions of the future research and development in soil pollution and remediation in China.

Key words: China; Soil pollution; Soil remediation; Progress in science & technology; Development direction; Countermeasure and suggestion

我国土壤污染防治形势严峻。当前, 农用地污染面广、量大, 工矿企业场地土壤与地下水污染问题突出, 流域性或区域性土壤污染态势凸显, 土壤污染风险增大, 威胁我国农产品质量安全、

人居环境安全和生态环境安全^[1-2]。习近平总书记曾多次强调“强化土壤污染管控和修复, 有效防范风险, 让老百姓吃得放心、住得安心”。开展土壤污染过程与风险基础研究, 推进土壤污染管控

* 国家自然科学基金重大项目(41991330)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41991330)

作者简介: 骆永明(1962—), 男, 浙江义乌人, 研究员, 主要从事土壤污染与修复、土壤圈污染物循环与质量演变方面研究。E-mail: ymluo@issas.ac.cn

收稿日期: 2020-04-19; 收到修改稿日期: 2020-06-12; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-06-17

与修复共性关键技术研发, 强化土壤环境监管, 保障土壤环境安全, 既是加大《土壤污染防治行动计划》科技支撑力度的现实需要, 也是支撑美丽中国、生态文明建设的长期需要。本文简要分析了我国土壤污染状况, 介绍了国内外土壤污染与修复技术研究现状与发展趋势, 指出了我国土壤污染防治科技研发中存在的若干问题, 提出了我国土壤污染与修复科技研究与发展今后的总体策略与主要方向等对策建议。

1 我国耕地和工矿场地土壤环境污染状况

我国土壤污染在区域上涉及西南、华中、华南、华东、华北、西北、东北七大区的各省市, 空间上遍布城市、城郊、农村及自然环境(例如地质高背景区), 在利用方式上涵盖农用地、建设用地、矿区、油田和军事用地^[2-3]。在污染物类型上, 耕地土壤以重金属为主, 包括镉、砷、汞、铬、铅、铊、锑等; 工矿场地, 除重金属外, 常出现有机污染物, 包括苯系物、卤代烃、石油烃、持久性有机污染物等。有的土壤还存在病原菌、病毒等生物性污染, 有的则存在爆炸物、化学武器残留物、放射性核素、抗生素及抗性基因、塑料及微塑料等^[4-5]。上述污染物在土壤中以不同的赋存形态、含量、污染方式及污染程度存在, 具有不同的释放性、迁移性、有效性和风险性^[5-6]。对土壤环境中污染物的源-径-汇和过程-含量-效应-风险, 人们研究和了解得相当有限。

2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》^[7]显示, 总的调查点位超标率为16.1%, 中度和重度污染点位分别为1.5%和1.1%。耕地土壤的超标率高达19.4%, 面广、量大, 危及农产品质量和生物生态安全。工矿业场地土壤污染问题突出, 点位超标率达36.3%, 有色金属矿采选、有色金属冶炼、石油开采、石油加工、化工、焦化、电镀、制革、造纸、废物处置、电子废旧产品拆解等重点行业用地及周边土壤污染风险高, 危及人居环境安全和生态系统健康。

2 国内外土壤污染与修复技术研究现状与发展趋势

近20年来, 我国农用地和工矿用地土壤污染过程与修复科技快速发展。根据全球文献计量分析, 我国近20年发表英文(SCI)论文数量逐年增加, 在2010年就超过美国, 位居第一; 我国土壤修复技术专利在全球的占比呈直线增加, 比例达60%以上, 远高于世界其他国家或地区, 美国位于第二位。

2.1 土壤污染成因和过程研究与发展现状

近40多年来, 欧美国家在土壤污染来源、过程、机制、效应、风险、预测等基础理论与方法上开展了系列研究^[8]。在土壤-植物和土壤-地下水系统污染物迁移转化机制, 特别是微观分子机制、多介质传输机制、多界面分配机制、多尺度预测模型等方面, 取得了长足的研究进展^[9]。解析了多尺度污染源-径-汇和形态/剂量-受体关系, 建立了污染源数据库、生物毒性数据库和环境基准体系; 在对土壤环境背景及基准研究的基础上, 建立了污染物的迁移风险、生态风险和健康风险评估方法; 形成了土壤污染防治的基础理论、方法及技术原理, 发展了基于界面行为调控的土壤-植物和土壤-地下水污染物有效性调控方法; 为污染土壤环境质量标准制定及修复新技术设计奠定了理论与方法基础。

在国内, 近40年来, 通过20世纪80年代第二次土壤普查和21世纪初第一次全国土壤污染调查, 积累了大量基础性数据, 建立了全国土壤背景值图集^[10], 分析了我国土壤污染特征, 评价了土壤环境质量状况, 提出了土壤污染防治对策^[11]。近20年来, 在国家“973”计划项目支持下, 围绕农业生产、环境保护和生态文明建设, 在京津冀、长江三角洲(长三角)、珠江三角洲(珠三角)、东北老工业基地、西南矿区和地质高背景地区等区域, 开展了多尺度土壤污染特征、污染物迁移转化机制、界面过程和环境风险等方面的系列研究, 了解了土壤中污染物迁移转化规律、生物有效性和污染风险, 初步阐明了重金属与持久性有机污染物复合污染及生态效应, 建立了部分土壤环境基准与标准, 发展了土壤污染风险管控与修复技术原理, 为土壤污染防治提

^①骆永明, 等. 国家中长期科技发展规划社会发展领域战略研究环境专题土壤污染防治领域战略报告. 2020.

供了理论与方法指导^[12]。“十三五”期间，在国家重点研发计划项目支持下，土壤污染成因、过程及风险研究进入了新阶段，未来 5 年内将在土壤污染源汇关系与源解析、污染物积累与转化机制、污染物扩散与驱动机制和污染风险评估方法与指标体系等方面取得系统性、创新性研究进展。

2.2 土壤污染管控与修复技术研究与发展现状

近 20 年来，在国家“863”计划项目等支持下，我国土壤污染修复技术研究，于“十五”起步，“十一五”进步，“十二五”发展，“十三五”跨越；20 年的进展，带动了土壤修复技术应用和绿色修复产业化发展，在修复技术、装备及规模化应用上与先进国家的距离在加快缩短。技术支撑上，初步建立了场地土壤修复技术体系，快速、原位的土壤修复技术得到研究与应用；技术装备上，研制了能支持快速土壤修复的多种装备；技术产业上，研发的技术支撑了规模化应用及产业化运作。总体上，在农用地土壤污染管控与修复技术上，我国与欧美国家并驾齐驱，有的已处领先地位；在建设用地方面，我国的土壤污染管控与修复技术水平与欧美国家相比尚有距离^[13-14]。

(1) 在农用地方面，根据国际技术的研发历程、产业化程度和应用推广的分析，侧重发展农用地土壤重金属污染管控与修复技术，可归纳为三类：I 类技术（植物提取与资源化技术）相对成熟，已经实现产业化，仍是研究热点；II 类技术（重金属钝化与替代种植技术）正逐渐成熟，开始进入产业化阶段，缓慢发展；III 类技术（植物阻隔与稳定化技术）已有研究基础，正在加快产业化进程，快速发展。相对于发达国家，我国农用地土壤污染治理技术研究起步较晚，但进步迅速。在我国，植物阻隔/稳定化技术研发早于国际，植物提取与资源化技术已处国际领先地位。我国的相关论文、专利数量增幅明显，但篇均引用频次大幅落后美国等发达国家^①，指明需要继续加强提升研究质量和学术影响力。正在努力的方向是丰富修复植物种质资源^[15]、提升修复功能材料产品效益^[16]、发展资源-材料-技术-效评体系^[17]，继续加大投入，形成高效、廉价、安全、普适的农用地土壤污染管控与修复技术模式。

(2) 在工矿用地方面，欧美国家已经形成场地土壤污染调查、风险评估、标准制定、管理控制、修复技术和法规体系^[18-19]；正在着力研发高效、安全、低能耗、低成本、低碳排的生物修复技术及多技术耦合智能系统。近 20 年来，我国场地-地下水污染风险管控与修复技术发展上，发表的英文（SCI）论文数量快速增加，已经超越美国；虽然在多种新技术发明的时间上落后于美国平均约十年，但我国发明专利占国际的比例接近三分之二^①。然而，我国的相关技术转化率较低，总体上仍处于跟踪阶段。在重金属污染修复方面，国内外的共同热点在植物修复、固化/稳定化药剂及设备、淋洗设备，电动修复的电极材料研发和微生物修复的菌剂研发等。有机污染修复方面，发表的论文数量明显少于重金属；我国的不少工作集中于有机污染物的热脱附设备以及微生物修复药剂的研发。热脱附及相关技术在国际上已步入产业化阶段，在国内异位和原位热脱附技术广泛应用于难降解性或持久性有机物污染场地土壤的修复。近年来，国内外生物修复技术研究与发展迅速。近 10 年我国的相关技术研发明显增强^[20]。微生物转化技术、生物质炭复合纳米技术、强化氧化/还原技术、多相抽提技术、深度垂向阻隔技术、可渗透反应屏障技术等在国内得到发展，并应用于场地土壤与地下水管控与修复。现正努力创新研发绿色高效环境功能材料，研制智能化、模块化装备，提升绿色和可持续的土壤污染管控与修复技术、产品与装备水平，致力于土壤污染综合防治与安全利用技术体系及模式的形成，提升土壤环境管理与风险监管能力及土壤污染协同治理水平。

2.3 土壤污染与修复科技研究与发展趋势

纵览国内外土壤污染与修复科技研究与发展，其总体趋势表现为：(1) 在过程与效应上，从传统污染物、单一污染过程与生态效应关注到新兴污染物及其复合污染过程与健康效应，从单一的物理、化学或生物学过程及机制发展到多介质、多界面、多过程耦合机制。(2) 在分析与监测上，从单一的污染物含量分析到多种监测并存分析，从微观的点源分析到宏观的多源、多尺度的土壤立体智慧监测。(3) 在风险与管理上，从健康风险到生态风险，从

^①骆永明，等. 国家中长期科技发展规划社会发展领域战略研究环境专题土壤污染防治领域战略报告. 2020.

污染源阻隔到过程管控,融合遥感、物联网、大数据的智能风险管理。(4)在修复技术与利用上,单一修复技术到多技术耦合系统,从源头控制、过程阻断、净化修复、安全利用到生态开发的集成治理再发展模式。(5)在修复材料与装备上,从单功能单目标到多功能多目标的靶向修复材料方向发展,从服务于离场异位修复的固定式装备向支持现场原位修复的移动式、模块化装备方向发展。(6)在工程应用方面,从单项修复走向场地土壤污染协同智慧修复方向发展。就近年来的污染修复技术热点及趋势分析而言,国际上更多地关注生物修复、植物修复、固化/稳定化等原位技术研究。例如,关注于生物群落结构对污染物去除的作用^[21]、植物生长状态对重金属的富集^[22]、长效性的固化/稳定化材料(如生物质炭)等^[23]。总体而言,我国的研究热点与国际的相一致。

3 我国土壤污染与治理科技研发中存在的若干问题

近年来,国家高度重视土壤污染防治科技的投入,科学技术部、国家自然科学基金委员会、生态环境部、农业农村部、中国科学院等部委相继启动了一批土壤污染过程、管控与修复重大项目,大大促进了土壤污染防治科技的发展。但是,在我国土壤污染与治理修复科技研发中尚存在如下重要问题:

(1)土壤环境基准是土壤环境质量标准制定的基础,可科学地反映土壤污染物的环境行为对相关受体的效应及其风险。我国土壤环境背景值和环境基准严重不足,难以满足科学制定土壤环境质量标准的需要;现有土壤环境质量标准基本上与全国土壤类型和土壤利用方式脱钩,难以支持国家及区域土壤环境标准化和差异化管理。

(2)风险评估与风险管理存在明显局限性。在场地土壤和地下水健康风险评估模型计算上缺乏我国土壤中污染物的毒性和毒理参数,更是严重缺乏本土化参数,从而造成过于保守或过于宽松的风险控制值或修复目标值,难以有力、有效地支持科学的风险管控。迄今,我国尚缺乏大量研究支持下的、能有效保护土壤生物安全和生态系统健康的生态风险评估方法,亦缺乏能有效保护地下水安全的环境

迁移风险评估方法。

(3)基于风险管控的稳定化技术推广应用难以降低土壤污染物超标率,难以体现土壤环境质量的改善。特别是对农用地土壤,在缺乏长效稳定调理管控材料下,需要反复施用土壤稳定剂,将严重影响良田的土壤肥力质量和健康质量。

上述问题关系到国家《土壤污染防治行动计划》^[24]中提出的目标的实现。例如,到2030年,全国土壤环境质量稳中向好,农用地和建设用土壤环境安全得到有效保障,土壤环境风险得到全面管控;主要指标是到2030年,受污染耕地安全利用率达到95%以上,污染地块安全利用率达到95%以上。

4 我国土壤污染与治理修复科技研发展望

土壤环境安全是支撑美丽中国和健康中国建设的重要基础。防治土壤污染,保障农产品质量安全、人居环境安全和生态环境安全,是我国乡村振兴和生态文明建设的重大战略需求。我国土壤污染防治策略应针对我国社会经济发展中面临的重点区域、重点行业、重点污染物的土壤污染问题,以“保护优先、综合防控、改善质量、安全利用”为土壤污染防治出发点,构建基于“基准化监管”和“净土化修复”的土壤污染防治理论和技术创新、工程应用与管理支撑以及产业化发展的全链条式科技创新体系,建立多学科融合、多部门协同、产学研结合和国际合作的自主创新机制,培育具有市场开拓力和国际竞争力的土壤修复企业,全面提升土壤污染防治科技水平,支撑和引领土壤污染攻坚战,抢占土壤污染防治领域的国际战略制高点,形成我国土壤污染治理体系,以安全健康的土壤支撑美丽中国和生态文明建设。《中华人民共和国土壤污染防治法》^[25]明确指出,国家支持对土壤环境背景值和环境基准研究,而且修复活动应当优先采取不影响农业生产、不降低土壤生产功能的生物修复措施。建议未来重点研究方向如下:

(1)土壤污染过程、效应与生态健康风险。包括土壤环境污染物的多尺度效应及其转化的新方法和新技术;土壤圈污染物多介质、多界面、多过程耦合动力学机制与气候变化影响预测;区域土壤复

合污染物的生物地球化学过程与环境质量演变；重大工程活动和自然及人为灾害的土壤环境影响；土壤中污染物与生物相互作用、致毒机理与调控机制；土壤污染的食物安全、生物安全与健康风险；原位强化生物修复技术原理等科学问题。

(2) 土壤污染监测技术、风险评估方法和环境基准。包括土壤新型污染物与环境暴露分析方法；基于人工智能和物联网的区域土壤污染快速识别与环境信息传输处理方法；土壤污染高精度调查和智慧监测系统；土壤污染生态风险、健康风险和迁移风险评估方法及其在土壤环境基准中的应用；区域土壤环境背景值、风险评估本土化参数与土壤环境安全利用指标；基于土壤类型及利用方式下农用地土壤-作物系统污染过程-效应-风险-安全评估方法；区域土壤污染物生物有效性与环境基准/标准制定等科学问题。

(3) 土壤污染修复功能材料、绿色技术和智能装备。包括土壤污染的长效稳定/转化/去除和生物降解功能材料；土壤复合污染阻控和修复靶向技术；土壤污染植物、微生物组^[26]及其原位协同自净修复技术；土壤和地下水污染现场原位修复的规模化智能装备；修复后土壤安全利用、评估与空间生态开发技术；农用地、建设用地、矿区油田和军事场地等污染土壤的靶向仿生、协同精准和智慧修复等绿色可持续净土科技问题。

(4) 土壤环境信息管理系统与智能服务平台。在长江经济带、黄河流域、京津冀、长三角、粤港澳大湾区等重点区域，建立区域土壤污染与环境质量演变长期定位研究基地和多区域多要素观测网络系统；建立基于多源数据融合的国家土壤环境信息管理系统与智能服务平台等区域土壤环境精准管理与安全保障等科技问题。

参考文献 (References)

- [1] Zhao Q G, Huang R H, Luo Y M. Environmental quality evolution and sustainable development in the developed coastal areas of Southeast China [M]. Beijing: Science Press, 2014. [赵其国, 黄荣辉, 骆永明. 东南沿海发达地区环境质量演变与可持续发展[M]. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [2] Luo Y M, Teng Y. Regional difference in soil pollution and strategy of soil zonal governance and remediation in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2018, 33 (2): 145—152. [骆永明, 滕应. 我国土壤污染的差异与分区治理修复策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33 (2): 145—152.]
- [3] Zhu Y B, Zhao S P, Li R X, et al. Heavy metal contamination and bioavailability in shooting range soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31 (3): 594—602. [朱勇兵, 赵三平, 李瑞雪, 等. 射击场土壤重金属污染及其生物有效性[J]. 环境科学学报, 2011, 31 (3): 594—602.]
- [4] Luo Y M, Zhou Q, Zhang H B, et al. Pay attention to research on microplastic pollution in soil for prevention of ecological and food chain risks[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2018, 33 (10): 1021—1030. [骆永明, 周倩, 章海波, 等. 重视土壤中微塑料污染研究防范生态与食物链风险[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33 (10): 1021—1030.]
- [5] Luo Y M, et al. Theory and practice of soil pollution and remediation I: Characteristics, process and availability of soil pollution[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一: 土壤污染特征、过程与有效性[M]. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [6] Luo Y M, et al. Theory and practice of soil pollution and remediation II: Toxicity, criterion and risk management of soil pollution[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二: 土壤污染毒性、基准与风险管理[M]. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [7] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Bulletin of the ational survey on soil pollution status [EB/OL]. (2014-04-17) [2020-04-19]. [http : //www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm](http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm). [环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17) [2020-04-19]. [http : //www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm](http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm).
- [8] Luo Y M, Li G H, Li F S, et al. Study on the supporting technology system of soil environmental management in China [M]. Beijing: Science Press, 2015. [骆永明, 李广贺, 李发生, 等. 中国土壤环境管理支撑技术体系研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015.]
- [9] 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: 5003.
- [10] Wei F S, Chen J S, Wu Y Y, et al. Study on the background contents on 61 elements of soils in China[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 1991, 12(4): 12—19. [魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, 12 (4): 12—19.]
- [11] Zhao Q G, Luo Y M. The macro strategy of soil protection in China[J]. Bulletin of the 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.]
- [12] Luo Y M, Xia J Q, Zhang H B. The theory and method of establishing soil environmental quality criterion and standard in China [M]. Beijing: Science Press, 2015. [骆永明, 夏家淇, 章海波. 中国土壤环境质量基准与标准制定的理论和方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015.]
- [13] Luo Y M. Current research and development in soil remediation technologies[J]. Progress in Chemistry, 2009, 21 (2): 558—565. [骆永明. 污染土壤修复技术研究现状与趋势[J]. 化学进展, 2009, 21 (2): 558—565.]
- [14] Luo Y M, Tu C. Twenty years of research and development on soil pollution and remediation in China[M]. Singapore: Springer Singapore, 2018.
- [15] Huang X Y, Zhao F J. Application of plant molecular genetics in identification of genes related to heavy metals accumulation in crops[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37 (7): 1396—1401. [黄新元, 赵方杰. 植物分子遗传学在挖掘作物重金属积累相关基因中的作用[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (7): 1396—1401.]
- [16] Luo Y M, et al. Theory and practice of soil pollution and remediation III: Remediation mechanism and technology development of heavy metal polluted soil [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三: 重金属污染土壤的修复机制与技术发展[M]. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [17] Luo Y M, et al. Theory and practice of soil pollution and remediation IV: Remediation mechanism and technology development of toxic organic substance polluted soil[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四: 有机污染土壤的修复机制与技术发展[M]. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [18] Hadley P W, Harclerode M. Green remediation or sustainable remediation: Moving from dialogue to common practice[J]. Remediation Journal, 2015, 25 (2): 95—115.
- [19] Yang Y, He Y M, Luan J L, et al. Comprehensive analysis on soil remediation technologies of international contaminated sites[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 35 (10): 92—98. [杨勇, 何艳明, 栾景丽, 等. 国际污染场地土壤修复技术综合分析[J]. 环境科学与技术, 2012, 35 (10): 92—98.]
- [20] Liu Z P, Liu S J. Development of bioremediation in China-A review[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2015, 31 (6): 901—916. [刘志培, 刘双江. 我国污染土壤生物修复技术的发展及现状[J]. 生物工程学报, 2015, 31 (6): 901—916.]
- [21] Atashgahi S, Sánchez-Andrea I, Heipieper H J, et al. Prospects for harnessing biocide resistance for bioremediation and detoxification[J]. Science, 2018, 360 (6390): 743—746.
- [22] Koźmińska A, Wiszniewska A, Hanus-Fajerska E, et al. Recent strategies of increasing metal tolerance and phytoremediation potential using genetic transformation of plants[J]. Plant Biotechnology Reports, 2018, 12 (1): 1—14.
- [23] Zhang X K, He L Z, Lu K P, et al. Use of biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants: A review[J]. Soils, 2013, 45 (6): 970—977. [张小凯, 何丽芝, 陆扣萍, 等. 生物炭修复重金属及有机物污染土壤的研究进展[J]. 土壤, 2013, 45 (6): 970—977.]
- [24] The State Council. Action plan for soil pollution prevention and control [EB/OL]. (2016-05-31) [2020-04-19]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm. [国务院. 土壤污染防治行动计划[EB/OL]. (2016-05-31) [2020-04-19]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm.]
- [25] The Fifth Session of the Standing Committee of the 13th National People's Congress. Law of the people's Republic of China on the prevention and control of soil pollution[Z]. (2018-08-31). [第十三届全国人民代表大会常务委员会第五次会议. 中华人民共和国土壤污染防治法[Z]. (2018-08-31).]
- [26] Bahram M, Hildebrand F, Forslund S K, et al. Structure and function of the global topsoil microbiome[J]. Nature, 2018, 560 (7717): 233—237.

(责任编辑: 陈荣府)