



环境科学研究

Research of Environmental Sciences

我国农用地土壤重金属污染防治标准体系现状及展望

赵彬 王亮 魏雨泉 祝文彬 曹晗霖 张昊

Current Status and Prospects of Agricultural Soil Heavy Metal Contamination Prevention and Control Standard Systems in China

ZHAO Bin, WANG Liang, WEI Yuquan, ZHU Wenbin, CAO Hanlin, ZHANG Hao

在线阅读 View online: <https://www.hjkxyj.org.cn/article/doi/10.13198/j.issn.1001-6929.2024.01.06>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

湖南省某典型流域农用地土壤重金属污染及影响因素

Heavy Metal Pollution and Influencing Factors of Agricultural Land in a Typical Watershed in Hunan Province

环境科学研究. 2021, 34(3): 715-724. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2020.10.06>

贵州遵义下寒武统黑色页岩区土壤重金属污染和人体健康风险评估

Assessment of Pollution and Human Health Risk from Heavy Metals in Soils and Crops in the Lower Cambrian Black Shale Area, Zunyi, Guizhou Province

环境科学研究. 2021, 34(5): 1247-1257. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.01.10>

龙口市北部平原区不同土地利用类型对土壤重金属污染距离的影响

Effects of Different Land Use Types on Pollution Distance of Heavy Metals in North Plain of Longkou City

环境科学研究. 2019, 32(7): 1224-1230. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2019.02.15>

安徽庐江县砖桥潜在富硒土壤重金属元素空间变异与来源

Spatial Variations and Source Apportionment of Heavy Metals in Potential Selenium-Enriched Soils in Zhuanqiao Village, Lujiang County, Anhui Province, China

环境科学研究. 2019, 32(9): 1594-1603. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2019.04.02>

基于UNMIX模型的北京城区公园土壤重金属源解析

Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Beijing Urban Park Based on the UNMIX Model

环境科学研究. 2020, 33(12): 2856-2863. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2020.03.40>

植物基因工程修复土壤重金属污染研究进展

Advances in Enhanced Phytoremediation by Genetic Engineering Technology for Heavy Metal Pollution in Soil

环境科学研究. 2019, 32(8): 1294-1303. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2019.03.19>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

我国农用地土壤重金属污染防治标准体系现状及展望

赵彬¹, 王亮³, 魏雨泉⁴, 祝文彬², 曹晗霖², 张昊^{2*}

- 广东省科学院生态环境与土壤研究所, 广东 广州 510650
- 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京 100012
- 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101
- 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

摘要: 标准体系建设是实施土壤污染防治与农产品安全保障的重要保障。该文系统分析了我国农用地土壤环境质量管理发展历程, 总结了土壤重金属污染控制标准体系的最新进展。在总结发达国家与国际组织关于农用地土壤重金属污染控制标准建设经验的基础上, 分析我国标准体系当前所面临的问题及挑战, 并提出本土化规划发展与完善建议, 以期为我国农用地土壤重金属污染防治及风险阻控提供经验借鉴。该文将我国标准的建设历程大致总结为初识探索、质量管理、污染控制与风险管控 4 个阶段, 初步形成了以法律、法规与国家政策为指导, 国家、行业、地方与团体标准为基本框架, 污染防治与农产品安全保障为总体原则的多维度、层次化、全链条污染防治标准体系。针对现行标准体系有待完善的内容, 未来可通过应用导向与前瞻引领的顶层设计, 强化农用地土壤重金属污染防治标准体系建设的科学规划和整体布局, 满足适合我国不同阶段的农用地土壤环境管理需求, 为深入打好净土保卫战提供理论基础和标准支撑。

关键词: 农用地; 土壤; 重金属; 环境质量管理; 标准体系

中图分类号: X53

文章编号: 1001-6929(2024)05-1092-12

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2024.01.06

Current Status and Prospects of Agricultural Soil Heavy Metal Contamination Prevention and Control Standard Systems in China

ZHAO Bin¹, WANG Liang³, WEI Yuquan⁴, ZHU Wenbin², CAO Hanlin², ZHANG Hao^{2*}

- Institute of Eco-Environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China
- Technical Centre for Soil, Agriculture and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China
- Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
- Beijing Key Laboratory of Biodiversity and Organic Farming, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract: The agricultural soil environmental quality management standard system is a critical technical assurance for soil contamination prevention and agricultural product quality assurance. This article presents a comprehensive analysis of the historical development of soil environmental quality management for agricultural land in China. Moreover, it provides an overview of the recent advancements in China's control standards system for heavy metals in agricultural soil. Finally, based on the experience of foreign developed countries and international organizations, this work summarizes the problems and challenges currently faced by China's standard system and puts forward targeted recommendations for its development and enhancement. The results show that the development process of soil quality management of agricultural land in China can be divided into four main stages: Initial Exploration, Quality Management, Pollution Control, and Risk Control. This system is guided by laws, regulations, and relevant national policies, with national, industry, local, and group standards serving as the fundamental framework. A multi-level, comprehensive, hierarchical, and full-chain contamination prevention and risk control standard system has been initially established based on the principles of pollution control and the assurance of

收稿日期: 2023-10-31 修订日期: 2023-12-27

作者简介: 赵彬(1991-), 男, 河南许昌人, 男, 博士, 主要从事土壤污染风险评估与绿色可持续管控技术研发, bzhao@soil.gd.cn.

* 责任作者: 张昊(1990-), 男, 辽宁开原人, 男, 博士, 主要从事生态环境污染治理与低碳能源研究, zhanghao@tcare-mee.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (No.42307021); 广东省基础与应用基础研究基金-青年基金项目 (No.2022A1515110625)

Supported by Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (No.42307021); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation, China (No.2022A1515110625)

agricultural product safety. To address the deficiencies of the current standard system, future improvements can be achieved through an application-oriented and forward-looking top-level design. It is also crucial to strengthen the planning and layout of the standard system for the prevention and control of heavy metal soil contamination in agricultural land. This approach ensures tailored responses to the evolving needs of soil environmental management at different stages in China. It lays a theoretical foundation and provides standard support for advancing the battle for clean soil.

Keywords: agricultural land; soil; heavy metal; environmental quality management; standard system

广泛定义的重金属指的是密度超过 5 g/cm^3 的金属元素. 常见的重金属包括铅 (Pb)、汞 (Hg)、镉 (Cd)、砷 (As)、铬 (Cr)、镍 (Ni)、铜 (Cu)、锌 (Zn) 等. 土壤因其特殊的生态功能与强大的自净能力成为环境重金属污染物的载体与归宿, 大气和水环境中的外源性重金属污染物最终以干沉降、降雨、泄露、地表径流或污水灌溉等多种途径进入土壤. 当土壤中重金属含量超过一定阈值时, 将对农作物生长、土壤生物多样性、微生物群落等方面构成潜在生态风险; 污染土壤产出农副产品中富集的重金属会随着食物链途径进入人体, 形成潜在健康风险. 农用地土壤重金属污染具有鲜明的隐蔽性、持久性、危害性与难治理的特点, 这些特点随着土壤环境条件与污染状况的不同而存在显著差异. 不同于城市污染棕地的可逆性差、再生性好、土地二次开发利用价值高, 重金属污染农用地容易失去基本耕种功能, 叠加影响农产品质量安全、人体健康风险与生态扰动^[1-4]. 近些年来, 各国积极致力于污染土壤的防控及健康风险管控, 我国农用地环境状况总体稳定, 而且土壤生态环境标准体系的建设也取得了长足的发展. 鉴于此, 该文从我国土壤环境管理历程、基本框架、标准现状与发达国家管理经验方面展开分析, 梳理当前我国标准体系现状、问题并提出对策建议, 以期为我国农用地土壤重金属污染防治标准体系构建与持续优化提供借鉴.

1 我国农用地土壤重金属污染概述

目前我国土壤环境风险得到基本有效控制, 农用地土壤环境状况总体稳定, 影响农用地土壤环境质量的主要污染物是重金属. 重金属来源可分为自然源和人为源, 其中自然源包括火山喷发、岩石风化和成土母质. 农业生产和工业活动对土壤重金属污染的影响较大, 尤其是以有色金属冶炼、化工、采矿等典型代表的重点行业成为主要的人为源, 农药、化肥的过度使用以及工业和城市废物的不当处理加剧了土壤重金属污染状况^[5].

我国农用地土壤污染呈现隐蔽性、持久性、广泛性、累积性与多金属叠加的污染特征. 首次全国土壤污染状况调查显示, 全国土壤污染物总超标率为 16.1%, 其中耕地土壤点位超标率为 19.4%^[6], 主要污

染物为镉、铬、铅、铜、汞、砷等单一或复合重金属. 例如, 镉砷复合污染是我国南方水稻产区的主要污染物类型. 一项针对我国 19 个省份 4 个水稻主产区的研究显示, 土壤中镉和砷超标率分别达到 33.6% 和 6.19%^[7-8]. 从污染空间分布来看, 南方土壤污染程度普遍高于北方, 污染主要集中在长三角、珠三角、东北老工业基地等工业发达区域, 如我国南方的湖南、广西、贵州、云南等地区镉污染治理问题不容忽视^[8].

重金属污染土壤对农产品安全与人体健康构成潜在威胁: 首先, 重金属可以通过作物根系吸收、地上转移并累积至籽粒, 通过农产品食用途径进入人体. 长期暴露于重金属易引起人体急慢性疾病, 如神经系统损伤、肾功能障碍、骨质疏松、心力衰竭, 甚至癌症等^[9-10]. 农用地土壤污染的健康风险与土壤质地、污染水平、作物类型、耕作方式、敏感人群等综合因素相关. 其次, 重金属也可能对土壤生态系统造成危害, 从而影响微生物、植物和动物的生存环境^[11-14]. 我国对农用地土壤污染防控高度重视, 相应的环境管理措施与技术不断完善, 其中标准体系的建设是土壤重金属污染防控的关键环节之一^[15-20].

2 我国农用地土壤环境管理发展历程

2.1 初识探索阶段

我国不同阶段颁布的农用地土壤环境管理相关的法律、法规及标准规范汇总如图 1 所示. 新中国成立初期, 我国农业领域的工作目标主要在用地制度的重大变革. 该阶段最具时代意义的法律文件为 1954 年 9 月通过的《中华人民共和国宪法》, 该法律规定“国家保护和改善生活环境和生态环境, 防治污染和其他公害”. 直至 1978 年农村经济体制改革以前, 农业领域的目标是发展生产、提升产量、服务工业化建设. 改革开放以前, 由于相对落后的工业、农业和城市化建设进程, 农业土壤质量得以基本保持原生状态, 农业生产过程中也极少量地投入化肥、农药、土壤改良剂等携带潜在外源性重金属的农资, 因此, 土壤重金属污染问题并未突显.

2.2 质量管理阶段

改革开放以来, 大量耕地用于基础设施建设和地产开发, 农业生产与城市建设之间出现“抢夺土地”

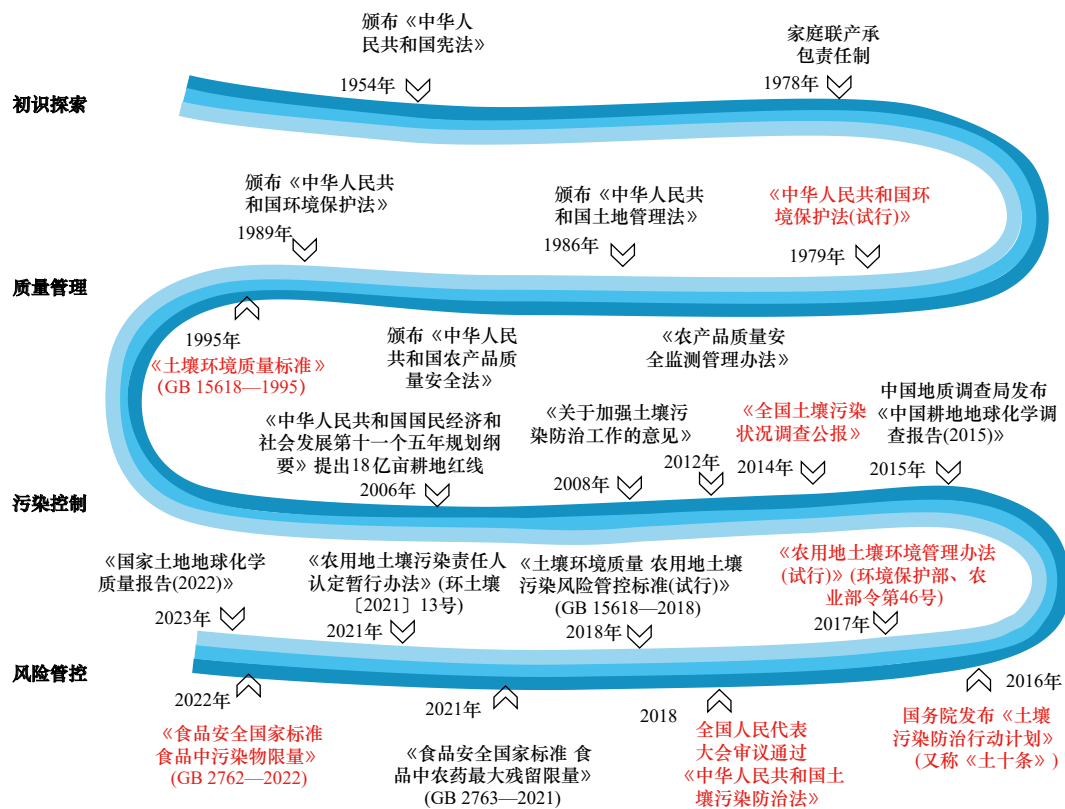


图1 我国农用地土壤环境质量管理发展历程

Fig.1 Development history of the environmental quality management of agricultural land

现象. 我国人均耕地面积从新中国成立初期的 0.260 hm^2 减至 2017 年 0.097 hm^2 ^[21]. 鉴于此, 国家越来越重视耕地保护, 并不断出台法律、法规以规范土地规划及城镇有序开发. 1986 年 6 月, 第六届全国人民代表大会常务委员会第十六次会议通过《中华人民共和国土地管理法》; 1979 年 9 月, 第五届全国人民代表大会审议通过《中华人民共和国环境保护法(试行)》; 到 1989 年 12 月, 第七届全国人民代表大会审议通过《中华人民共和国环境保护法》.

2.3 污染控制阶段

我国积极借鉴发达国家和地区在土壤环境保护领域内的实践经验, 直面当前国家环境保护面临的问题及考验, 在环境保护制度、环境监管、污染防治等方面颁布一系列政策并采取适当的行动, 积极关注农田土壤环境污染控制与质量提升. 1995 年, 我国制定并发布了《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995), 规定了适用于土壤应用功能重金属污染物的最高容许浓度限值. 2006 年, 国家统计局与原农业部综合了经济、社会、人口、粮食单产等多个要素进行核算后表明, 如需保障粮食自给率 95% 及以上则至少需要 18 亿亩耕地. 由此, 国家“十一五”规划纲要将 18 亿亩 (约 $1.2 \times 10^8 \text{ hm}^2$) 作为耕地保护红线. 2006 年 4 月

29 日, 全国人民代表大会颁布了《中华人民共和国农产品质量安全法》; 2012 年, 原农业部发布了《农产品质量安全监测管理办法》, 填补了我国农产品质量安全管理法律空白; 2014 年, 我国首次公布的《全国土壤污染调查公报》为土壤污染防治立法与技术标准体系的构建起到重要的数据支撑.

2.4 风险管控阶段

2016 年, 国务院印发了《土壤污染防治行动计划》, 确立了我国“十三五”期间及以后较长时间内土壤污染防治的总体要求、工作目标、主要任务及考核指标. 2017 年, 原环境保护部和原农业部联合发布《农用地土壤环境管理办法(试行)》(环境保护部与农业部第 46 号令), 明确了农用地土壤污染预防、污染调查与分类、分类管理的基本治理思路. 针对《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995) 中污染物指标少、适用范围窄的局限, 2018 年, 生态环境部发布了《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018). 2018 年 8 月, 第十三届全国人民代表大会常务委员会第五次会议通过《中华人民共和国土壤污染防治法》, 填补了我国土壤污染防治的法律空白, 成为强化土壤的分类管理、风险管控的法律武器. 此后, 我国相继制修订了《食品安全国家标



图 2 我国农用地土壤重金属污染防治基本框架

Fig.2 Basic framework for management of heavy metal soil contamination in agricultural land

准食品中污染物限量》(GB 2762—2022)、《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》(GB 2763—2021)等国家风险管控标准。

3 我国农用地土壤重金属污染防治体系

3.1 基本框架

如图2所示,我国农用地土壤重金属污染防治的基本框架可分为法律/法规、管理政策与技术标准3个层次,其中法律、法规对土壤污染防治提出了基本原则,国务院及直属部委或省级、市级出台的管理政策做详细部署。技术标准可分为国家、行业、地方与团体4个层次,又可细分为4类:①基础标准,主要对土壤分类、名词术语、图表进行规范化;②质量标准,提供土壤或农产品环境介质中重金属管控标准;③技术规范,规定重金属污染治理导则、指南与技术规程;④监测分析,明确重金属及土壤指标标准测试方法。

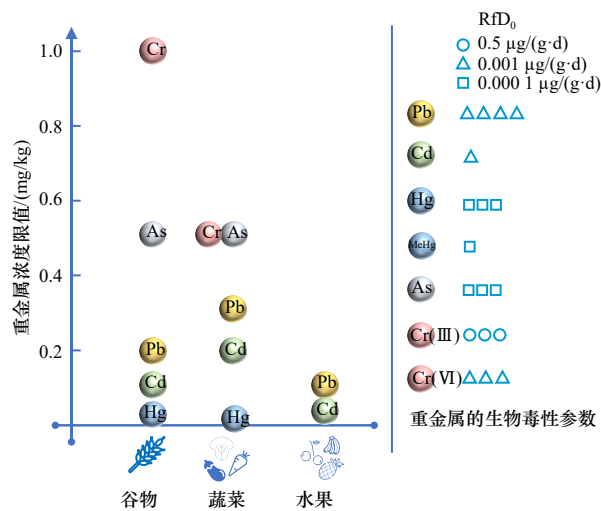
3.2 管理政策

我国积极吸取发达国家和地区先进的土壤污染防治经验,不再简单追求“永久治理”与“彻底清除”的单一目的,而是实施基于环境风险的土壤污染防治原则。这既符合土壤污染产生的客观规律,又可以根

据环境风险水平判断土壤修复与管控的优先级,支撑农用地土壤环境质量的分类、分级管理^[22]。例如,当土壤中重金属含量低于风险筛选值时,土壤中的重金属污染物水平不会对农作物生长、农产品质量或土壤生态环境的风险产生影响,一般情况下不需要采取进一步调查及风险管控措施,建议采取积极的优先保护,提升土壤肥力,保障农作物生长与农产品产量。我国农用地土壤重金属治理主要以农产品富集风险控制为目标,其污染管理概括为污染调查、类别划分、风险管控与修复、后期环境管理等阶段,各阶段都有配套的法律法规与标准规范。

根据土壤与农产品样本中重金属含量与土壤风险管控标准及食品中污染物限量的对比结果,将农用地划分为优先保护、安全利用及严格管控等不同类型。此阶段涉及的代表性标准包括《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)、《耕地质量监测技术规程》(NY/T 1119—2019)、《耕地土壤重金属污染风险管控与修复 风险评价》(DB44/T 2263.2—2020)等。常见农产品中重金属污染物限值及经口摄入参考剂量为代表的生物毒性参数汇总如图3^[23]所示。

针对优先保护类,应制定保护方案,进行土壤改



注: Pb 浓度限值是指谷物、叶菜蔬菜与新鲜水果中 Pb 的浓度,检测方法参照 GB 5009.12—2023; Cd 浓度限值是指谷物(稻谷除外)、叶菜蔬菜与新鲜水果中 Cd 的浓度,检测方法参照 GB 5009.15—2023; Hg 浓度限量是指谷物、新鲜蔬菜中总汞的浓度,检测方法参照 GB 5009.17—2021; As 浓度限量是指谷物、新鲜蔬菜中总砷的浓度,检测方法参照 GB 5009.11—2014; Cr 浓度限量是指谷物、新鲜蔬菜中 Cr 的浓度,检测方法参照 GB 5009.123—2023; MeHg 为甲基汞, Cr(III) 为三价铬, Cr(VI) 为六价铬,如上浓度限值数据来自 GB 2762—2022 和美国环境保护局综合风险信息系统 (US EPA Integrated Risk Information System)。

RfD₀ 为经口摄入参考剂量, µg/(g·d)。

图3 农产品重金属浓度限值及生物毒性参数^[23]

Fig.3 Threshold limits and biotoxicity of heavy metals in agricultural products^[23]

良与土壤环境容量提升. 针对安全利用类, 采用土壤钝化、生理阻隔等措施, 辅以水分调节、品种筛选、肥力调整等农艺措施, 实现对低风险农用地安全利用. 针对严格管控类, 以降低土壤重金属含量和风险等级为目标. 此阶段我国已有的标准包括《受污染耕地治理与修复导则》(NY/T 3499—2019)、《稻米镉控制田间生产技术规范》(NY/T 3176—2017)、《耕地土壤重金属污染钝化治理技术指南》(DB44/T 2271—2021) 等.

实施安全利用、严格管控的措施, 并通过效果评估与验收的治理地块应进行后期长期管理, 保证修复与风险管控措施的长期有效. 一般通过定期采集土壤与农产品样本, 监测重金属污染物浓度是否达到治理

目标, 并辅以制度控制措施以实现污染农田的安全利用目标. 对于严格管控类地块, 则应适当增加跟踪监测频次, 并对效果评估不符合既定治理目标的地块及时调整为管控更严格的土壤质量等级. 此阶段相适应的代表性标准包括《耕地污染治理效果评价准则》(NY/T 3343—2018)、《耕地镉污染土壤修复效果评价规程》(DB32/T 4121—2021) 等, 详细管理阶段及适用性标准集见图 4.

3.3 标准规范

我国农用地土壤重金属污染控制标准的分布概况如图 5 所示. 我国土壤环境管理标准基本可以分为国家标准、行业标准、地方标准和团体标准 4 个基本类别. 截至 2022 年, 我国累计发布了 300 余项不同类

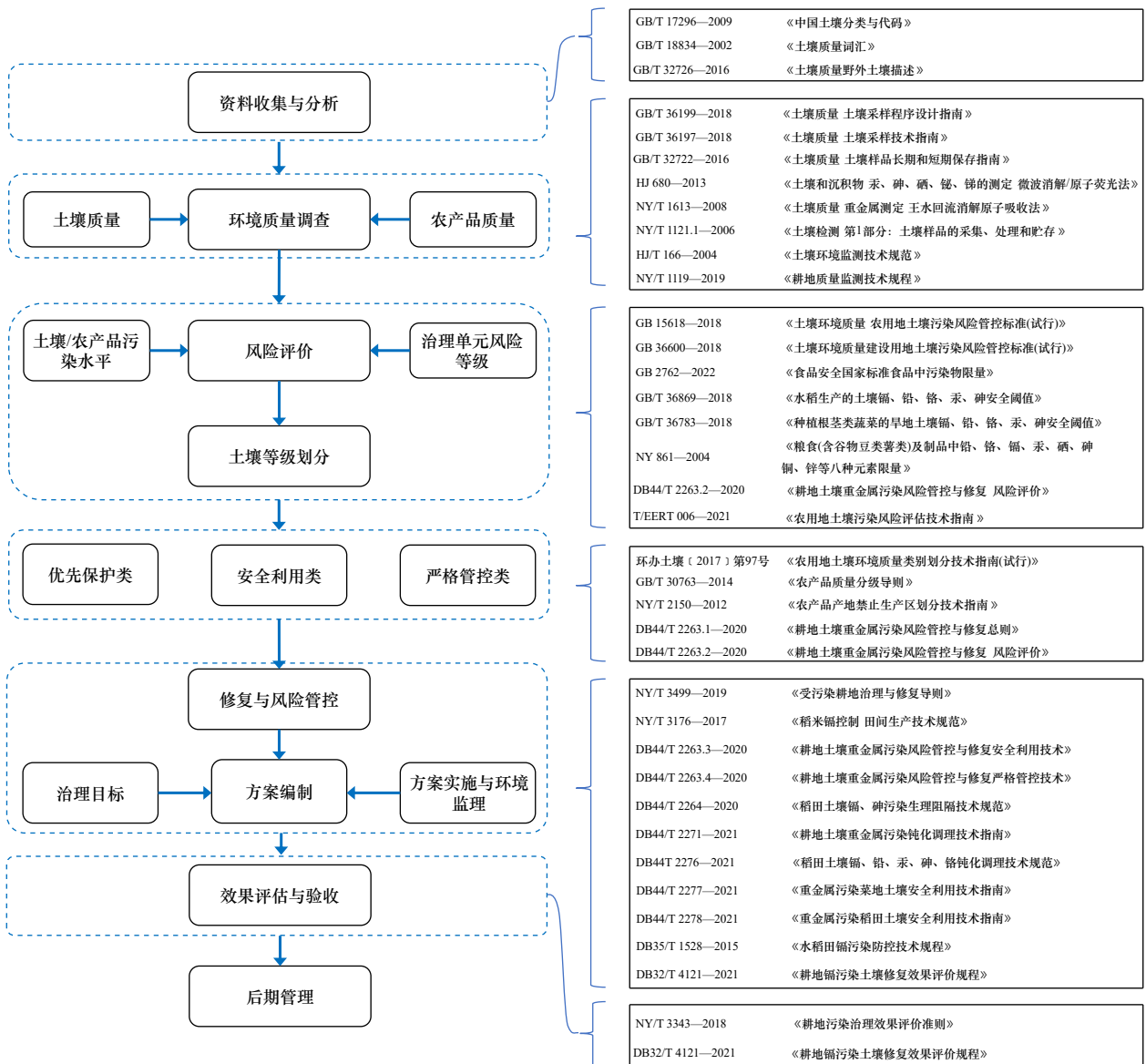
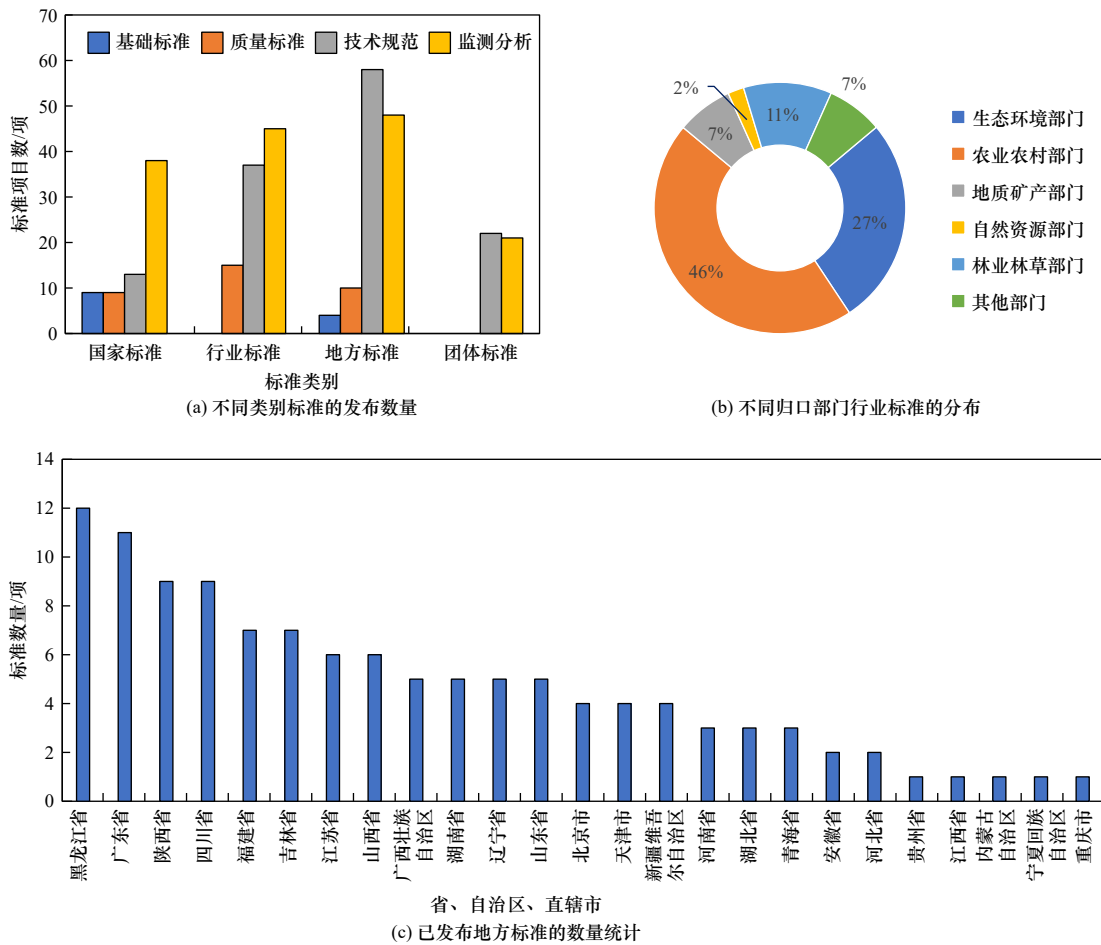


图 4 农用地土壤重金属污染管理阶段及适用标准

Fig.4 Management process and related standards for the remediation of heavy metal contamination in agricultural land



注: 以上统计数据均来自“国家标准信息公共服务平台”(https://std.samr.gov.cn), 检索时间截至 2022 年 12 月 31 日。

图 5 不同类别农用地重金属污染防治标准分布概况

Fig.5 Distribution of standards for agricultural land heavy metal pollution prevention and control

型的标准, 分布在土壤与农产品质量、治理技术规范、监测分析标准等方面, 涉及生态环境、农业农村、自然资源在内的 8 个主要归口部门. 然而, 现有的标准规范大都集中在技术规范与监测分析方面, 基础标准与质量标准的数量相对较少, 存在进一步完善的空间, 与此同时, 行业标准大多集中于生态环境与农业农村两个归口部门, 标准体系建设在多归口部门之间的交叉与均衡发展方面存在提升空间. 地方标准在不同省份的发布数量呈现出与农业生产、经济发展相一致的特征, 大都集中在农业生产密集和经济发达的区域.

4 发达国家与国际组织农用地土壤重金属环境质量管理

18 世纪工业革命以来, 发达国家进行了一场世界范围的生产变革和科技革命, 从而步入现代工业化与农业现代化. 为了应对工业与农业生产活动对土壤环境形成的污染压力, 并缓解植物生长影响与人体健康风险, 发达国家率先启动了土壤污染保护与治理的立法、风险管控标准与技术规范编制, 逐渐形成相对

完善的土壤质量管理体系.

4.1 土壤污染防治立法

发达国家通过颁布法案构建土壤污染预防、治理与土壤资源可持续开发的法律屏障. 20 世纪中期欧美等发达国家开始土壤环境管理立法工作^[24-28]. 1947 年, 美国颁布了《联邦杀虫剂、杀真菌剂和灭鼠剂法案》(Federal Insecticide, Fungicide, and Rodenticide Act); 1980 年颁布了《CERCLA: 1980 年综合环境反应、赔偿与责任法案》, 即《超级基金法》(the Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act), 至 2000 年, 该法案不断经过修订以满足执法公正、成本控制、修复效率提升与连续性等诸多问题; 1996 年, 美国颁布了《食品质量保护法》(Food Quality Protection Act). 1947 年英国政府通过了《农业法案》(Agriculture Act 1947); 1990 年, 英国政府颁布了《环境保护法案》第 2A 部分 (Environmental Protection Act 1990: Part 2 A), 同年颁布了《食品安全法令》(Food Protection Order). 20 世纪 80 年代, 荷兰

颁布了《土壤修复法案(暂行)》(Interim Soil Remediation Act)、《土壤保护法》(Soil Protection Act)、《土壤质量法令》(Soil Quality Decree)。1998年,德国政府制定了《联邦土壤保护法》(Federal Soil Protection Act, BBodSchG);翌年出台了《联邦土壤保护和地处理条例》(Federal Soil Protection and Contaminated Sites Ordinance, BBodSchV);2012年及以后德国相继出台的《污水污泥条例》(Sewage Sludge Ordinance)和《生物废物条例》(Ordinance on Biowaste)涉及土壤环境质量保护问题^[29]。2002年,日本针对土壤污染防治颁布了《土壤污染对策法案》和《土壤污染对策法案施行规则》^[30-31]。同时,一些国际组织和机构也出台了一系列土壤资源保护相关公约,如《生物多样性公约》(Convention on Biological Diversity)、《气候框架公约》(Climate Framework Convention)及《联合国防治荒漠化公约》(the UN Convention to Combat Desertification)分别对生物资源可持续利用、减缓气候变化及干旱防治进行规范化指导^[32-35]。与国外法律相比,尽管国内已经出台了数部与农用地土壤污染防治对应的法律及法规,但在可持续发展方面的支撑与引导方面有待进一步强化,在生态风险防范及水土联控方面的也需适当补充。

4.2 土壤污染风险管控标准

农用地土壤污染带来的环境风险主要体现在土壤生态系统的扰乱、植物生长的受阻以及食品安全等多个方面。其中,植物生长与食品安全主要与受污染农田生产及农产品食用相关,而土壤生态系统扰乱则通过植物和动物的重金属暴露而发生。为控制农用地土壤污染环境风险,一些发达国家同时出台了与土壤法案相配套的标准规范。至20世纪90年代初期,土壤污染主要以单一质量标准和管理临界,如荷兰制定了《土壤修复导则》及土壤风险管控标准,分别适用于保护人体健康和陆地生态系统安全的目标值与干预值,以及农业用地、居住用地、工业用地等多种土地利用类型的环境风险最大允许值^[36-37];日本制定了《土壤环境质量标准》,规定了镉、铜、砷、铅重金属及有机氯化物、苯等有机物的标准限量。随着土壤科学的深入发展,单一固定的土壤质量标准并不符合土壤污染的客观规律,基于风险的土壤多阈值管控标准成为主流。1996年,荷兰重新修订《土壤保护法案》(Soil Protection Act)^[38],发布了标准土壤(10%有机质和25%黏粒)中重金属的目标值(Target Values)、干预值(Intervention Values)和指示值(Indicative Values)^[39-41]。美国环境保护局制定了《土壤筛选导则》(Soil

Screening Guidance, SSG)等多项筛选标准,如清洁无污染(Clean, “Zero Contamination”)、生态风险筛选值(Ecological Soil Screening Level, Eco-SSL)^[42-43]。加拿大环境部(Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME)于2006年颁布了土壤质量指导值(Canadian Environmental Quality Guidelines, CEQGs)。此外,发达国家还配套构建制度控制措施,对污染土壤修复优先级进行科学布局^[44]。发达国家的污染物类型、推导模型及有效态指标等皆可成为我国土壤环境风险管控标准进一步完善的依据,如适用于人体健康研究的CSOIL、VOLASOIL、UMS、JAGG模型以及生态风险研究的KWRA 2021、TRIAD、CATS模型等^[41,45]。

4.3 土壤污染防治技术规范

为落实土壤重金属污染防治法律条款并满足技术需求,发达国家也出台了防控技术规范。美国联邦政府发布《最佳管控实务》(Best Management Practices for Containment Technologies),为可行性修复方案提供了经验借鉴与技术参考。英国的土壤管理更加注重风险管理,防治指南提供了规范化的风险分段评估与风险管理。英国污染土壤的修复更加注重绿色与可持续修复,基于环境、社会与经济等多维因子的考量,定量与半定量分析不同修复决策的影响^[46]。德国建立了TRANSFER数据库,以农产品限量为风险控制标准,利用回归方程反向推算方法,推导出基于农田作物质量安全保障的土壤重金属限值^[28]。加拿大发布了关于食品摄入人体健康的风险评估指南(Guidance on Human Health Risk Assessment for Country Foods, HHRAFood)。国际标准化组织(ISO)发布的相关标准可以分为土壤质量管理、土壤质量调查监测、治理技术规范三类,如《土壤管理 环境成本与效益确定指南(ISO 14007: 2019)》(Environmental Management: Guidelines for Determining Environmental Costs and Benefits)、《土壤质量 土壤背景值确定指南(ISO 19258: 2018)》(Soil Quality: Guidance on the Determination of Background Values)、《土壤质量 土壤中金属的人体生物可及性/生物有效性评估程序(ISO 17924: 2018)》(Soil Quality: Assessment of Human Exposure From Ingestion of Soil and Soil Material-Procedure For the Estimation of the Human Bioaccessibility/Bioavailability of Metals in Soil)。发达国家在绿色修复、风险评价、最佳管控技术、成本效益核算以及背景值确定等方面的技术规范可以作为今后我国相关标准体系不断完善的经验借鉴。

5 现有挑战与经验启示

5.1 问题与挑战

通过借鉴先进的环境管理经验,我国农用地土壤重金属污染防治标准体系不断丰富,对保护人体健康和农产品安全具有重要意义,而目前的标准体系还存在以下几方面有待完善的内容。

a) 基础标准有待补充.我国现有标准体系缺乏与农用地土壤重金属治理相适应的完善基础标准.我国现有标准体系中的《中国土壤分类与代码》(GB/T 17296—2009)、《土壤质量 词汇》(GB/T 18834—2002)、《肥料和土壤调理剂术语》(GB/T 6274—2016)等基础标准难以满足现场全流程工程施工需要,对农用地土壤重金属污染防治与治理实践的兼容性有待评估,对农用地土壤环境质量保护与污染防治提供规范化技术支撑力度有待进一步提升。

b) 农用地优先保护标准有待完善.我国现有的标准集中在监测分析与修复技术规程,支撑以污染预防及土壤质量提升为核心目标的农用地土壤重金属优先保护和预防相对不足.针对重金属污染溯源与源头削减、土壤肥力提升与作物增产、农资减量化及土壤生态保护、空间布局与环境质量准入、环境监管与智慧管理等相关技术标准的建设有待提高^[47]。

c) 土壤风险管控标准有待健全.我国幅员辽阔,各地区间土壤环境状况差异较大,不同地域间重金属背景值、土壤质地、农作物类型与水管理理模式亦不尽相同.目前,土壤风险管控标准以“pH、水田/果园/其他”为分类指标,难以应对较为复杂的土地类型和污染问题。

d) 生态风险评价与恢复技术标准支撑不足.已经发布的相关法律法规与技术标准着重缓解重金属污染对农作物生长影响、食品安全与人体健康风险,然而重金属污染环境风险既包括人体健康风险,还包括生态风险.现有的标准体系中的生态风险评价与恢复技术标准等文件相对缺乏,对农用地环境质量管理与污染治理决策的标准化支撑有待提升。

e) 关键治理技术规范有待丰富.治理技术规范是农用地污染治理与修复的关键核心要素,现有标准体系中的治理技术规范覆盖面涵盖不全,农用地土壤污染风险管控与修复的风险等级划分、关键控技术比选、技术方案编制、管控效果评估及环境社会管理相关标准暂时缺乏.亟需制定针对重金属污染特征的农用地土壤污染治理技术指南和导则规范(包括风险评估、土壤数据库建设、类别调整)及修复与风险管控技术(如钝化调理、生理阻隔、农艺调节、植物

修复)^[48]。

5.2 建议与展望

针对现有问题的挑战,提出完善标准体系的发展任务和优化方案,具体建议和展望有以下几点。

a) 构建基于农用地土壤重金属防治需要的基础标准框架.建议综合考虑土壤特性、污染防控、修复与风险管控、土壤环境质量管理与生产力提升等各板块的实际需求,起草、补充或修订现有基础标准内容,以构建系统性基础标准框架,具体包括并不限于术语与定义、土壤分类与代码、等级划分与治理单元、土壤制图与图例规范、标识与表征、土壤科学元数据标准、量纲与编码等,形成规范化且完善的重金属污染防治基础标准框架。

b) 由“重治理、轻防控”向“防治结合”的发展规划.建议强化重点行业企业污染监管,农业生产领域肥减量、农药与农膜削减、二次污染防控相关标准与规范,明确农业生产经营者在农田土壤重金属污染预防与质量提升的责任与义务,引导合理使用农田土壤资源并追究农田土壤环境重金属污染侵权行为人责任。

c) 不断完善农用地土壤重金属污染风险分类管控规范.根据《土壤污染防治行动计划》的要求,应充分考虑重金属背景浓度、土壤类型与质地、农作生产条件与农产品类型、复合重金属毒性叠加效应等因素,满足我国不同区域、污染状况、风险等级与作物类型的差异化农用地土壤环境质量的规范化管理需求,实现优先保护类农用地面积不减少、土壤环境质量不下降,中低风险农用地土壤的安全利用与严重风险污染农用地土壤的严格管控。

d) 制定土壤生态风险治理技术标准.建议借鉴发达国家现有生态风险标准化方法体系,结合我国农用地土壤质量管理的现状,制定本土化的农用地生态风险评价与恢复技术标准,包括丰富农用地土壤重金属污染生态风险筛选阈值,编制生态风险评价技术、生态恢复指南、农药化学品生态风险评价、生态毒性表征导则等,为生态风险防控决策提供标准化技术支撑。

e) 丰富污染防治生命周期治理管理标准化支撑.以全过程监管为指导,以土壤重金属污染的生命周期管理原则,不断丰富以污染系统预防、污染全面调查、精细风险评估与分类分级、修复与风险管控、后期管理与可持续利用为目的的农用地土壤重金属污染生命周期控制技术规范,补充包括针对新污染物、复合污染在内的环境调查与质量监测、风险评估与等级划分相关标准规范,不断丰富包括钝化调理、生理阻

隔、农艺调节、替代种植、植物修复等关键农用地土壤安全利用技术规范,并注意多介质复合污染的协同防治理论与技术要求,全面支撑农用地土壤环境污染的标准化治理^[49-53]。

6 结论

a) 我国已经初步构建起以法律、法规、政策、标准为基础,国家、行业、地方至团体不同等级的标准框架;基本形成了以基础标准、质量标准、技术规范、监测分析为主要类别的农用地土壤重金属污染管控标准体系。

b) 现有标准体系仍然存在基础标准有待完善、优先保护支撑不足、风险管控标准待提升、生态风险评估与恢复标准待补充、关键治理技术规范待健全等方面问题。

c) 建议从基础标准支撑、防治结合、分类分级风险管控、生态风险管控等多维度实施标准体系的优化健全,不断完善以风险管控标准与技术规范为屏障的综合管控标准体系,实现《土壤污染防治行动计划》中土壤环境质量全面改善的行动目标,保障农产品质量与国家粮食安全。

参考文献 (References):

- [1] 龙涛.基于风险管控的污染地块修复模式概述[J].环境保护科学,2016,42(4):36-39.
LONG T.Introduction of remediation strategies of contaminated sites based on risk management and control[J].Environmental Protection Science,2016,42(4):36-39.
- [2] 姜林,樊艳玲,钟茂生,等.我国污染场地管理技术标准体系探讨[J].环境保护,2017,45(9):38-43.
JIANG L,FAN Y L,ZHONG M S,et al.Environmental technical standards system for contaminated site management in China[J].Environmental Protection,2017,45(9):38-43.
- [3] 应蓉蓉,林玉锁,段光明.土壤环境保护标准体系框架研究[J].环境保护,2015,43(7):60-63.
YING R R,LIN Y S,DUAN G M.Research on the standard system frame of soil environmental protection[J].Environmental Protection,2015,43(7):60-63.
- [4] 李敏,李琴,赵丽娜,等.我国土壤环境保护标准体系优化研究与建议[J].环境科学研究,2016,29(12):1799-1810.
LI M,LI Q,ZHAO L N,et al.Optimizing the soil environmental protection standard system and suggestions[J].Research of Environmental Sciences,2016,29(12):1799-1810.
- [5] LUO L,MA Y B,ZHANG S Z,et al.An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J].Journal of Environmental Management,2009,90(8):2524-2530.
- [6] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[R].北京:环境保护部,2014.
- [7] MU T T,WU T Z,ZHOU T,et al.Geographical variation in arsenic, cadmium,and lead of soils and rice in the major rice producing regions of China[J].Science of the Total Environment,2019,677:373-381.
- [8] HUANG Y,WANG L Y,WANG W J,et al.Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China:a meta-analysis [J].Science of the Total Environment,2019,651:3034-3042.
- [9] SARKER A,KIM J E,ISLAM A R M T,et al.Heavy metals contamination and associated health risks in food webs:a review focuses on food safety and environmental sustainability in Bangladesh[J].Environmental Science and Pollution Research,2022,29(3):3230-3245.
- [10] TURAN V,ALI KHAN S,IQBAL M,et al.Promoting the productivity and quality of brinjal aligned with heavy metals immobilization in a wastewater irrigated heavy metal polluted soil with biochar and chitosan[J].Ecotoxicology and Environmental Safety,2018,161:409-419.
- [11] HOU D Y,DING Z Y,LI G H,et al.A sustainability assessment framework for agricultural land remediation in China[J].Land Degradation & Development,2018,29(4):1005-1018.
- [12] HOU D Y,O'CONNOR D,IGALAVITHANA A D,et al.Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability[J].Nature Reviews Earth & Environment,2020,1:366-381.
- [13] ELERT E.Rice by the numbers:a good grain[J].Nature,2014,514: S50-S51.
- [14] ALENGEBAWY A,ABDELKHALEK S T,QURESHI S R,et al. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: ecological risks and human health implications[J].Toxics,2021, 9(3):42.
- [15] 高琳琳,鲍广灵,张宁,等.土壤重金属有效态纳入农田土壤环境质量标准探讨[J].安徽农学通报,2021,27(10):105-109.
GAO L L,BAO G L,ZHANG N,et al.Study on the availability of heavy metals in soil as a risk assessment index for heavy metal pollution of soil and agricultural products[J].Anhui Agricultural Science Bulletin,2021,27(10):105-109.
- [16] 范俊楠,贺小敏,杜维,等.基于标准化方法和统计分析法的土壤重金属环境基线值分析比较[J].华中农业大学学报,2021, 40(1):160-167.
FAN J N,HE X M,DU W,et al.Analyzing and comparing environmental baseline values of heavy metals in soil based on standardized method and statistical method[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2021,40(1):160-167.
- [17] SUN Y M,LI H,GUO G L,et al.Soil contamination in China: current priorities,defining background levels and standards for heavy metals[J].Journal of Environmental Management,2019,251: 109512.
- [18] LU T,LI J M,WANG X Q,et al.Derivation of ecological criteria for copper in land-applied biosolids and biosolid-amended agricultural soils[J].Journal of Environmental Management,2016, 183:945-951.
- [19] 王硕,罗杰,蔡立梅,等.土壤-水稻系统中重金属的富集特征及对

- 土壤元素标准限的判定 [J].环境化学,2018,37(7):1508-1514.
- WANG S,LUO J,CAI L M,et al.Enrichment characteristics of heavy metals in soil-rice system and determination of the standard range of soil elements[J].Environmental Chemistry,2018,37(7):1508-1514.
- [20] 蔡信德,郭杨,方建德,等.不同标准对城市土壤重金属质量分数的评价 [J].环境科学研究,2009,22(4):444-449.
- CAI X D,GUO Y,FANG J D,et al.Discussion of different heavy metal quality assessment standards of urban soil[J].Research of Environmental Sciences,2009,22(4):444-449.
- [21] 高国力,王继源.新中国 70 年来我国农业用地制度改革:回顾与展望 [J].经济问题,2019(11):1-8.
- GAO G L,WANG J Y.Retrospect and prospect on agricultural land reform in the past 70 years since the founding of P. R. China [J].On Economic Problems,2019(11):1-8.
- [22] 王国庆,林玉锁.结合《土壤污染防治行动计划》探讨中国土壤环境监管制度与标准值体系建设 [J].中国环境管理,2016,8(5):39-43.
- WANG G Q,LIN Y S.A preliminary study on development of soil environmental management and environmental standards system in China in accordance with the SPPCAP[J].Chinese Journal of Environmental Management,2016,8(5):39-43.
- [23] CHEN L,ZHOU S L,YANG Q,et al.Pb content,risk level and primary-source apportionment in wheat and rice grains in the Lihe River watershed,Taihu region,eastern China[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2021,18(12):6256.
- [24] United States Environmental Protection Agency.Risk assessment guidance for superfund volume I:human health evaluation manual (part A)[S].Washington DC:U.S.Environmental Protection Agency,1989.
- [25] LIU Q Y,WU Y H,ZHAO W H,et al.Soil environmental criteria in six representative developed countries:soil management targets, and human health and ecological risk assessment[J].Critical Reviews in Environmental Science and Technology,2023,53(5):577-600.
- [26] JONECK M.Das bundes-bodenschutzgesetz[J].Umweltwissenschaften Und Schadstoff-Forschung,1997,9(6):417-420.
- [27] KLUGE B,WESSOLEK G.Heavy metal pattern and solute concentration in soils along the oldest highway of the world:the AVUS Autobahn[J].Environmental Monitoring and Assessment,2012,184(11):6469-6481.
- [28] 刘阳泽,刘毅,李天魁,等.部分国家农用地土壤环境质量标准体系研究 [J].生态毒理学报,2021,16(1):66-73.
- LIU Y Z,LIU Y,LI T K,et al.Study on soil environmental quality standards systems of agricultural land in several countries[J].Asian Journal of Ecotoxicology,2021,16(1):66-73.
- [29] DOROSHENKO O.Comparative analysis of the ecological and nature protection legislation of Russia and Germany[J].Ecology & Safety,2014,8:161-167.
- [30] 狄一安,杨勇杰,肖臣,等.我国重金属环境标准发展对策 [J].环境与可持续发展,2013,38(6):34-37.
- DI Y A,YANG Y J,XIAO C,et al.Recommendation and Suggestion on development of Environmental Standards to Heavy Metal in China[J].Environment and Sustainable Development,2013,38(6):34-37.
- [31] 陈平.日本土壤环境质量标准体系现状及启示 [J].环境与可持续发展,2014,39(6):154-159.
- CHEN P.Overview on the formation process and current situation of soil environmental quality standard system of Japan[J].Environment and Sustainable Development,2014,39(6):154-159.
- [32] CHANDRA A,IDRISOVA A.Convention on biological diversity:a review of national challenges and opportunities for implementation[J].Biodiversity and Conservation,2011,20(14):3295-3316.
- [33] HICKMANN T,WIDERBERG O,LEDERER M,et al.The United Nations Framework Convention on Climate Change Secretariat as an orchestrator in global climate policymaking[J].International Review of Administrative Sciences,2021,87(1):21-38.
- [34] KOWALCZYK G,BROWN M,TWIGG R,et al.Contaminated land: can acute exposure be a significant health risk? two case studies and associated risk assessment methods[J].Environmental Science Processes & Impacts,2013,15(10):1859-1865.
- [35] STRINGER L.Can the UN Convention to Combat Desertification guide sustainable use of the world's soils?[J].Frontiers in Ecology and the Environment,2008,6(3):138-144.
- [36] 李芸.上海市污染土壤环境质量评价标准体系构建之探讨 [J].环境污染与防治,2014,36(7):92-96.
- LI Y.Discussion of establishment of contaminated urban soil quality evaluation standard system in Shanghai[J].Environmental Pollution & Control,2014,36(7):92-96.
- [37] van HARDEVELD W,MOET D,SMITS A,et al.Soil and sustainability:Dutch policy[C].Dordrecht:Springer,1995:1605-1618.
- [38] de HAAN F A M,van der ZEE S E A T M.Soil protection and intensive animal husbandry in the Netherlands[J].Marine Pollution Bulletin,1994,29(6/7/8/9/10/11/12):439-443.
- [39] 周艳,万金忠,林玉锁,等.浅谈我国土壤问题特征及国外土壤环境管理经验借鉴 [J].中国环境管理,2016,8(3):95-100.
- ZHOU Y,WAN J Z,LIN Y S,et al.Discussion on characteristics of soil environmental problems in China and foreign experience reference on soil environmental management[J].Chinese Journal of Environmental Management,2016,8(3):95-100.
- [40] 李勣之,姜璐,王国庆,等.不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 [J].环境科学,2022,43(2):577-585.
- LI X Z,JIANG R,WANG G Q,et al.A comparative study of soil environmental standards for agricultural land among different countries and its implication for China[J].Environmental Science,2022,43(2):577-585.
- [41] SWARTJES F A,RUTGERS M,LIJZEN J P A,et al.State of the art of contaminated site management in The Netherlands:policy framework and risk assessment tools[J].Science of the Total

- Environment*,2012,427/428:1-10.
- [42] 陈卫平,谢天,李笑诺,等.欧美发达国家场地土壤污染防治技术体系概述[J].*土壤学报*,2018,55(3):527-542.
- CHEN W P,XIE T,LI X N,et al.Generalizaion of technical systems for soil pollution prevention and control in developed countries[J].*Acta Pedologica Sinica*,2018,55(3):527-542.
- [43] WASHBURN S T,EDELMANN K G.Development of risk-based remediation strategies[J].*Practice Periodical of Hazardous,Toxic, and Radioactive Waste Management*,1999,3(2):77-82.
- [44] DOTY C,TRAVIS C.Is EPA's national priorities list correct?[J].*Environmental Science & Technology*,1990,24(12):1778-1780.
- [45] ZHANG S,HAN Y Y,PENG J Y,et al.Human health risk assessment for contaminated sites:a retrospective review[J].*Environment International*,2023,171:107700.
- [46] LUO Q S,CATNEY P,LERNER D.Risk-based management of contaminated land in the UK:lessons for China?[J].*Journal of Environmental Management*,2009,90(2):1123-1134.
- [47] HORTENSIUS D,NORTCLIFF S.International standardization of soil quality measurement procedures for the purpose of soil protection[J].*Soil Use and Management*,1991,7(3):163-166.
- [48] 李奕杰,许秋云,柯玲杰,等.英美土壤污染生态风险评估技术体系研究及启示[J].*生态与农村环境学报*,2023.doi:10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0896.
- LI Y J,XU Q Y,KE L J,et al.Research on the technical system of ecological risk assessment of soil contamination in Anglo-American and its enlightenments[J].*Journal of Ecology and Rural Environment*,2023.doi:10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0896.
- [49] IMHOF H K,LAFORSCH C,WIESHEU A C,et al.Pigments and plastic in limnetic ecosystems:a qualitative and quantitative study on microparticles of different size classes[J].*Water Research*,2016,98:64-74.
- [50] ZHOU Y F,LIU X N,WANG J.Characterization of microplastics and the association of heavy metals with microplastics in suburban soil of central China[J].*Science of the Total Environment*,2019,694:133798.
- [51] KHALID N,AQEEL M,NOMAN A,et al.Interactions and effects of microplastics with heavy metals in aquatic and terrestrial environments[J].*Environmental Pollution*,2021,290:118104.
- [52] KUMAR R,IVY N,BHATTACHARYA S,et al.Coupled effects of microplastics and heavy metals on plants:uptake,bioaccumulation, and environmental health perspectives[J].*Science of the Total Environment*,2022,836:155619.
- [53] GANIE A S,BANO S,KHAN N,et al.Nanoremediation technologies for sustainable remediation of contaminated environments:recent advances and challenges[J].*Chemosphere*,2021,275:130065.

(责任编辑:周巧富)