

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勖之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李勛之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
- 再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
- 基于多种新型受体模型的 $PM_{2.5}$ 来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
- 华中地区夏季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
- 淄博2021年元宵节 $PM_{2.5}$ 水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
- 浙江省大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
- 2001~2019年气象条件对江苏省 $PM_{2.5}$ 分布的影响 潘晨, 康志明 (649)
- 基于神经网络和数值模型的重点区域 $PM_{2.5}$ 预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
- 2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
- 济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
- 山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
- 基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
- 日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
- 泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
- 典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
- 2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
- 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
- 生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
- 不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
- 雨源型城市河流污染特征及水质联合评价: 以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
- 廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
- 北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
- 河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素: 以石家庄为例 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
- 青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
- 鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
- 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
- 汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
- 基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)
- 新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
- 铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
- 氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
- 环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
- 冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)
- 不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
- 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
- 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
- 地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索: 以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)
- 西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)
- 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
- 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
- 不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
- 温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
- 两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全性的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
- 复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
- 产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉 (1031)
- 土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
- 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
- 中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
- 稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
- 模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
- 德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
- 陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
- 长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
- 《环境科学》征订启事(618) 信息(685, 935, 956)

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示

李勛之¹, 姜璐², 王国庆^{1*}, 陈玉东¹, 龙涛¹, 林玉锁¹

(1. 生态环境部南京环境科学研究所, 国家环境保护土壤环境管理与污染控制重点实验室, 南京 210042; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 农用地土壤环境质量影响农产品质量、人体健康和生态安全。经过十几年的修订, 我国于 2018 年发布了《土壤环境质量 农用地土壤风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)。与国外发达国家相比, 我国土壤污染防治依然处于起步阶段, 当前有关农用地土壤环境标准相关的综述研究相对较少。本文系统梳理了国内外 17 个国家或地区的农用地土壤环境标准, 从标准体系、保护目标、制定方法、覆盖指标、分析方法、标准数值和影响因素等方面进行对比分析。结果表明, 我国农用地风险管控标准污染指标较少、均为总量指标, 且制定过程缺乏标准化的推导方法。因此, 我国农用地土壤风险管控标准仍需要持续地补充、修订和完善, 建议后续加强农用地土壤环境基准和背景值等基础研究, 建立科学、规范基准和标准制定方法, 逐渐完善风险管控标准指标数量、形态和有效性指标, 同时鼓励建立区域和地方配套农用地标准, 为我国农用地土壤风险管控标准的优化和完善提供参考。

关键词: 农用地; 土壤风险管控标准; 农产品质量安全; 生态安全; 生物有效性

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0577-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202106203

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China

LI Xu-zhi¹, JIANG Rong², WANG Guo-qing^{1*}, CHEN Yu-dong¹, LONG Tao¹, LIN Yu-suo¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Soil Environmental Management and Pollution Control, Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Soil environmental quality of agricultural land plays a determinate role in the quality of agricultural products, human health, and the safety of the ecosystem. In 2018, China issued the "soil environment quality risk control standard for soil contamination of agriculture land" (GB 15618-2018), which has been essential to soil pollution prevention and the control of agricultural land. In this study, a systematic and comparative analysis of soil environmental standards for the agricultural land of 17 countries or regions was conducted, including the framework, protection objective, derivation method, contaminant elements, analyses methods, and standard values, as well as the impact factors. The results showed that the number of contaminants of GB 15618-2018 was insufficient with the simple consideration of total concentrations. Meanwhile, there was a lack of the standardized derivation method. On such a basis, we put forward some suggestions to improve GB 15618-2018 in light of the aforementioned problems, including strengthening the research of soil environmental benchmark and background values; establishing the scientific and standardized derivation method; and improving the number, form, and availability of indicators for risk control. In the meantime, the regional and local background environmental concentration of soil was highly proposed as a supplement and optimization to soil screening values.

Key words: agricultural land; risk control standard for soil contamination; safety of agricultural product; safety of terrestrial ecosystem; bioavailability

土壤是经济社会可持续发展的物质基础, 关系人民群众健康, 关系美丽中国建设, 保护好土壤环境是推进生态文明建设和维护国家生态安全的重要内容。近年来因土壤污染引发的污染危害事件逐年增多, 尤其是农用地土壤污染, 严重影响着人体健康和生态环境安全^[1,2]。根据 2014 年《全国污染土壤环境调查公报》报道, 我国土壤总的超标率为 16.1%, 而耕地土壤点位超标率为 19.4%, 耕地土壤环境质量堪忧, 工矿业和农业等人为活动以及土壤环境背景值高是造成土壤污染或超标的主要原因^[3]。农用地土壤环境质量不仅影响农产品质量和农作物生长, 同时影响土壤生态安全, 包括土壤微生物的活性、地下水、地表水和饮用水的安全等。因此, 农用地土壤环境质量关系到人民群众的“菜篮子”、“米袋子”和“水缸子”安全, 是事关经济社会发展和

子孙后代生存安全的重大民生问题^[4]。

2016 年国务院发布了《土壤污染防治行动计划》(“土十条”)。针对农用地, “土十条”提出明确以保障农产品质量和人居环境安全为出发点, 坚持预防为主、保护优先和风险管控; 要求到 2020 年, 农用地土壤环境安全得到基本保障, 土壤环境风险得到基本管控; 确保到 2020 年, 受污染耕地安全利用率达到 90% 左右; 到 2030 年, 受污染耕地安全利用率达到 95% 以上; 提出对农用地实施分类管理, 保障农业生产环境安全; 2017 年底前发布农用地土

收稿日期: 2021-06-24; 修订日期: 2021-07-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1800202, 2018YFC180090, 2017YFD0801301); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(GYZX200204)

作者简介: 李勛之(1991~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为土壤环境基准与风险评估, E-mail: nmlee40@126.com

* 通信作者, E-mail: wqg@nies.org

壤环境质量标准.

为落实“土十条”要求,切实加强农用地土壤污染防治,《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)于2018年正式实施^[5].新修订的《生态环境标准管理办法》指出,风险管控标准“为保护生态环境,保障公众健康,推进生态环境风险筛查与分类管理,维护生态环境安全,控制生态环境中的有害物质和因素”而制定.因此,与水、空气质量达标目标不同,新修订的土壤风险管控标准提出了筛选值和管制值两条线,适应土壤风险管控的思路,进行风险筛查和分类,对有效管控农用地土壤污染风险和加强土壤环境管理水平具有重要意义.

土壤环境标准需要持续地补充、修订和完善.与我国相似,为配合各国农用地土壤污染防治工作的开展,部分国家和地区针对农用地制定了相关的土壤环境标准.不同国家和地区的农用地土壤环境保护目标、污染物指标、制定方法和应用场景等各不相同.德国于1998年颁布了《联邦土壤保护法》,1999年配套《联邦土壤保护和污染地块条例》,该条例规定了农用地预防值、触发值和行动值这3类土壤污染限值^[6].荷兰于2009年提出可持续土壤治理概念,以背景值作为农用地和自然用地的土壤环境标准^[7].日本直接以稻米镉标准作为农用地的土壤环境质量标准^[8].此外,一些国家为保护农用地使用人制定相应的土壤环境标准,如英国租赁用地的土壤指导值^[9]和加拿大农用地的保护健康和生态的土壤质量指导值^[10].与上述国家相比,我国土壤污染防治依然处于起步阶段,当前与农用地土壤环

境标准相关的综述研究相对较少.因此,本研究通过对国内外国家或地区农用地土壤环境标准的标准体系、保护目标、制定方法和应用情景等方面进行研究,归纳得出我国与其他国家之间的主要区别,提出我国农用地土壤环境基准研究和标准修订的建议,以期为我国农用地土壤风险管控标准的优化和完善提供参考.

1 不同国家农用地土壤环境标准比较

1.1 标准体系

由于各国在地理环境(影响土壤污染物暴露的区域性因素,如降雨、降雪、土壤类型、地下水深度和地表水等)、生物环境(影响人群或生态受体敏感性因素,如体重、寿命和敏感物种等)、社会文化(影响土壤污染物暴露的因素,如社会行为和土地利用方式等)、管理政策(土壤污染管理需求、法律和法规等)和科学基础(土壤防治科学的理论基础)等方面差异,各国农用地土壤污染防治体系各不相同,农用地土壤环境标准在定义、推导和使用等方面也不尽相同.最直接反映这些差异的是标准名称的不同,包括筛选值、管制值、触发值、清洁标准、限制、指导值和环境质量标准等.

尽管各国或地区农用地土壤环境标准存在差异,但根据其标准功能和对应的相应风险等级将各国标准大致划分为指示可忽略风险的标准值、中等风险的标准值和不可接受风险的标准值.如表1所示,可忽略风险标准是土壤环境保护的长期目标,低于该值表明无风险,通常该值略高于土壤背景值,少数国家也直接以背景值指示可忽略风险,然而我国

表1 国内外农用地土壤环境标准划分¹⁾
Table 1 Types of soil environmental standards for agricultural land

国家(地区)	可忽略风险	中等风险	不可接受风险
奥地利 ^[11]	/	触发值	干预值
比利时布鲁塞尔 ^[12]	/	风险调查值	/
比利时佛兰德 ^[12]	背景值	/	土壤清洁标准
比利时瓦隆 ^[12]	参考值	触发值	干预值
捷克 ^[13]	预警值	触发值(最大允许浓度)	/
德国 ^[6]	预警值	触发值	干预值
波兰 ^[14]	/	/	土壤质量标准(土壤允许含量)
斯洛伐克 ^[12]	限制(总量)和A值	限制(提取态)和B值	C值
荷兰 ^[7]	背景值	/	/
英国 ^[9]	/	土壤指导值	/
加拿大 ^[10]	/	土壤质量指导值	/
韩国 ^[15]	/	土壤污染关注标准	土壤污染应对标准
日本 ^[8]	/	/	土壤环境质量标准
泰国 ^[16]	/	/	土壤质量标准
中国 ^[5]	/	风险筛选值	风险管制值
中国香港 ^[17]	/	/	土壤污染整治标准
中国台湾 ^[18,19]	/	土壤污染监测标准	土壤污染管制标准

1) “/”表示该国家未设定该类型的土壤标准值;A、B和C表示土壤标准值

暂未制定农用地的可忽略风险标准或背景值；中等风险标准与该土地利用方式下假设的保守情景相关,一般低于该值表明风险可接受,高于该值应开展进一步调查甚至风险评估工作,根据调查结果选择相应的安全利用措施,如我国土壤风险筛选值和德国土壤筛选值等;不可接受风险标准旨在防治对土壤环境产生重大不利影响,一般高于该值应采取相应的修复治理和风险管控措施,如我国土壤风险管控值、奥地利干预值和波兰土壤质量指导值等。

不同国家农用地土壤环境标准的法律执行力度也有所不同. 部分国家土壤标准是强制性的,只有在某些特殊条件下才可采用其他限值,如根据风险评估计算的特定土壤筛选值;部分国家土壤标准不具有法律约束力,可作为土壤调查中的推荐值,也可直接作为修复目标。

1.2 保护目标和推导方法

如表 2 所示,国内外制定农用地土壤环境标准时主要从保护农产品安全、人体健康、生态安全和地下水安全等 4 个方面获得相应临界含量或阈值. 其中,保护农产品安全的土壤标准通常基于土壤-作物迁移模型和食品、饲料等卫生标准来制定,以农产品中污染物浓度达到相应标准为保护目标. 多元回归模型和物种敏感性分布法(SSD 法)是普遍采用的土壤-作物迁移模型. 保护农用地使用人人体健康的土壤标准采用人体健康风险评估方法学制定^[20]. 各国根据合理保守原则构建本土化的特定暴露场景(概念模型),主要暴露途径包括室内粉尘吸入、经口摄入土壤、皮肤接触土壤、食用自产作物(蔬菜、水果)和食用附着在自产作物上的土壤和饮

用地下水等. 少数国家考虑食用鱼类、肉类和乳制品等其他暴露途径,或是将其纳入背景暴露范畴。

保护生态系统安全的土壤环境标准包括保护农作物生长和保护土壤生态环境. 其中,保护农作物生长主要考虑土壤污染对农作物产量的影响,以保持土壤良好的生产力和经济效益,通常采用生态环境效应法^[21];保护土壤生态环境采用生态风险评估方法学^[22],评估污染物对陆生生态系统的直接接触毒性或经过生物累积的二次毒性,推导方法包括 SSD 法、评估因子法(AF 法)和平衡分配法等^[22]. 保护地下水安全的土壤环境标准是基于土-水迁移模型和地下水环境质量标准来制定. 本次调研仅比利时瓦隆地区和加拿大计算了保护地下水的土壤临界值. 我国已废除 GB 15618-1995 标准二级标准中原先考虑了土壤-水环境,以不引起水体次生污染为原则,基于生活饮用水卫生标准推导^[23]。

当前,我国 GB 15818-2018 标准以保护食用农产品质量安全为主,同时兼顾保护农作物生长和生态环境的需要. 与国外农用地标准相比,我国农用地更加关注保护食用农产品质量,以食用农产品的消费者为主要保护目标. 而国外农用地土壤标准更加关注农用地土地使用人的人体健康. 实际上,国外在制定保护人体健康的土壤环境标准时已经把摄食自产的农产品作为间接暴露途径予以考虑,而普通消费者接触农产品的暴露途径往往归属于背景暴露. 部分国家如加拿大在建立农用地土壤质量指导值时,同时要求计算的指导值应保证自产作物中污染浓度应满足相应标准要求。

表 2 国内外农用地土壤环境标准保护目标¹⁾

Table 2 Protection objectives of soil environmental standards for agricultural land				
国家(地区)	保护农产品质量	保护人体健康	保护生态安全	保护地下水
奥地利	●			
比利时布鲁塞尔		●	●	
比利时佛兰德		●	●	
比利时瓦隆		●	●	●
捷克	●			
德国	●			
波兰		●		
斯洛伐克	●			
荷兰	●	●	●	
英国		●		
加拿大		●	●	
韩国		●	●	
日本	●			●
泰国		●		
中国	●		●	
中国香港		●		
中国台湾	●			

1) 数据来源同表 1,下同

1.3 污染物指标、测试方法和标准值

各国在制定农用地土壤环境标准时,选择保护对象、制定方法、所用模型和参数各不相同.因此,各国农用地土壤环境标准在污染物指标选择、形态特征和浓度数值上存在较大差异,部分污染物标准值存在数量级的差异^[24].

如表3所示,各国农用地土壤环境标准涉及29个重金属及其他无机物指标.按国家指标数量

排名,土壤标准中重金属及其他无机物指标数排名前六的国家(地区)为加拿大、捷克、中国香港、荷兰、奥地利和波兰,我国土壤风险管控标准8种重金属指标数相对较少;按污染物指标数量排名,超过10个国家制定标准的无机污染物指标分别为Cd、As、Pb、Hg、Ni、Zn、Cu和Cr,上述8个指标我国农用地土壤风险管控标准基本项目一致.

表3 国内外农用地土壤环境标准重金属及其他无机污染物指标¹⁾

Table 3 Heavy metal and inorganic substances of soil environmental standards for agricultural land

指标	奥地利	布鲁塞尔	佛兰德	瓦隆	波兰	德国	英国	荷兰	加拿大	捷克	斯洛伐克	日本	韩国	泰国	中国	中国香港	中国台湾
Ag									●								
As	▲	●	●	●	●	▲	●	●	●	▲	▲	●	●	●	●	●	●
Ba					●			●	●								●
Be									●	▲							
Cd	▲	●	●	●	●	▲	●	●	●	▲	▲	★	●	●	●	●	●
Co					●			●	●	▲	●					●	●
Cr	▲	●	●	●	●			●	●	▲	●		●		●		●
Cr(Ⅲ)																	●
Cr(Ⅳ)				●					●			●		●		●	●
Cu	▲	●	●	●	●	▲		●	●	▲	▲		●		●	●	●
Hg	▲	●	●	●	●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Pb	▲	●	●	●	●	▲		●	●	▲	▲		●	●	●	●	●
Mn														●		●	●
Mo				●	●			●	●	▲					●	●	●
Ni	▲	●	●	●	●	●		●	●	▲	▲		●	●	●	●	●
Sb	●							●	●							●	●
Se								●	●			●		●			●
Sn					●				●								●
Ta									●								
Ti	●					▲		●								●	
V	●							●	●	▲							
Zn	▲	●	●	●	●	◆		●	●	▲	▲		●		●	●	●
F	●								●	●	▲						
氰化物	●	●	●	●	●			●	●	●				●		●	
B									●	●							
Br									●	●							
S									●	●							
P																	
U									●								

1) ●表示污染物指标为总量,▲表示污染物指标包含总量和有效态含量,◆表示污染物指标为有效态含量,★表示污染物指标为稻米镉含量

各国重金属标准主要采用总量指标,少数国家制定提取态指标^[24].检测方法我国主要采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸的“四酸消解法”,国外主要采用王水法(提取除晶格外的所有重金属),因晶格内的重金属难以释放到环境中,因此更能客观反映重金属的土壤污染风险.提取态指标国外主要采用硝酸铵提取法.

如表4所示,各国农用地土壤环境标准涉及9类有机污染物指标,包括烃类、芳香烃类、多环芳烃类、卤代烃、二噁英、多氯联苯、农药类、石油烃类和其他有机污染物类.按国家指标数量排名,土壤

标准中有机污染物指标数排名前五的国家(地区)为荷兰(8类、82种)、加拿大(8类、63种)、比利时布鲁塞尔(7类、46种)、比利时佛兰德(6类、45种)和中国香港(8类、37种),我国土壤风险管控标准有机物指标数相对较少,仅涉及苯并[a]芘、六六六和DDT;按污染物指标数量排名,超过10个国家制定标准的有机污染物主要为多环芳烃、芳香烃、卤代烃和多氯联苯类;具体到污染物,苯并[a]芘、苯、乙苯、甲苯、二甲苯、多氯联苯、萘、荧蒽、苯并[a]蒽和蒽等10种有机物制定标准最多.

不同国家农用地土壤环境标准值比较见图1.

与国外相比,我国风险管控标准镉元素标准值较严格,镉筛选值 $0.3\sim0.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均低于50%分位值($1.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),管制值 $1.5\sim4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,介于50%和75%分位值($4.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)之间;砷、铅和铬元素标准值相对较松,其中砷筛选值 $20\sim40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,介于25($20.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和75%分位值($45.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),管制值 $100\sim200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远大于75%分位值,铬筛选值 $150\sim350\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,介于50% ($130\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 95% 分位值 ($940.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),管制值 $800\sim1\,300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远大于75%分位值($192.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),铅筛选值 $70\sim240\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,介于5% ($39.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 75% 分位值 ($277.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),管制值 $400\sim1\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,大

于75%分位值;我国汞筛选值 $0.5\sim3.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,管制值 $2\sim6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,基本位于25% ($0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 75% ($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 之间;我国果园铜筛选值相对较严($150\sim200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),大于75%分位值($150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),其他农用地筛选值 $50\sim100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,小于50%分位值($100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);我国土壤镍筛选值 $60\sim190\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中2个标准值低于50%分位值($70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),2个标准值大于75分位值($100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);我国土壤锌筛选值相对较严($200\sim250\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),位于50% ($200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 75% 分位值 ($300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 之间. 此外,我国农用地有机污染物标准相对适中,苯并[a]芘、DDT 和六六六标准值均处在50%分位值左右.

表 4 国内外农用地土壤环境标准有机污染物指标¹⁾

Table 4 Organic contaminants of soil environmental standards for agricultural land																	
指标	奥地利	布鲁塞尔	佛兰德	瓦隆	波兰	德国	英国	荷兰	加拿大	捷克	斯洛伐克	日本	韩国	泰国	中国	中国香港	中国台湾
烃类		3	3		1				1	2*	1*			1			
芳香烃		5	5	4	5*		4	7	5	4				4		5	
多环芳烃	1*	16	16	10	9*	1*		1*	15*	7*	12*		1	1	1	16	
卤代烃		19	19		3			27	29	4	1			9		6	
二噁英	1						1	1	1							1	
多氯联苯		1	1		1	1		1	1	1	1			1			
农药类					9			19	2	2	4		2	8	2		
石油烃	1	1	1	1	2			1								3	
其他		1			6		1	25	9	3						6	

1) * 表示污染物指标包含该类污染物总量

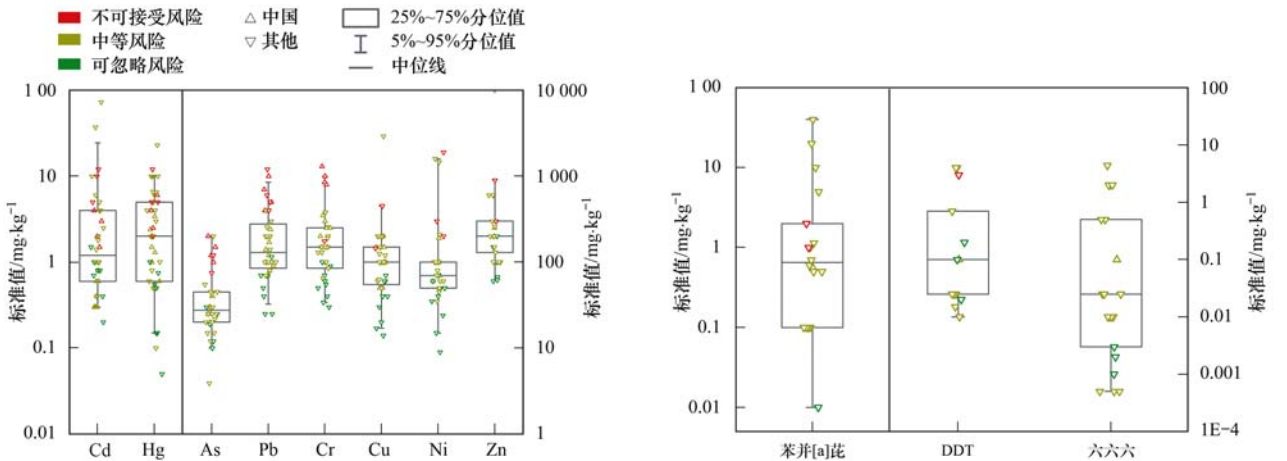


图 1 国内外农用地土壤环境标准数值统计

Fig. 1 Standard values of soil environmental standards for agricultural land

1.4 生物有效性

土壤作为异质性强的环境载体,区域差异极大. 研究者逐渐意识到土壤环境的复杂性、多变性以及不确定性,不同的土壤理化性质、土壤类型、土地利用方式和受体类型等都会影响污染物在土壤中的迁移转化^[25,26]. 有研究指出土壤污染物的风险主要由有效态部分的污染物浓度造成. 目前,各国土壤标准值主要是以一定标准土壤条件推导,以全国统一

的土壤污染物标准值有利于提高土壤污染评价的可比性和操作性,但在实际应用中,由于不同区域土壤理化性质差异极大,对土壤中污染物生物有效性影响显著,使得单一标准值在实际土壤污染调查和评估中往往存在许多不确定因素^[27].

如表 5 所示,部分国家在制定土壤环境标准时,充分考虑土壤理化性质、土壤类型、土地利用方式和受体类型等因素对土壤污染物的生物有效性影

响,具体可分为 3 种方式:①根据土壤理化性质和土壤类型对土壤标准值进行分类表述,如我国根据土壤 pH 将标准值分为四类,并进一步将水田(作物为水稻)和其他农用地类型(作物为小麦)分开定标,德国和斯洛伐克为砂土、砂质壤土和黏土设定了不同的预警值,波兰主要考虑土壤污染对地下水的影响,根据土壤深度和水力传导率(低于和高于 $10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)提供了不同的值;②建立土壤归一方程,在土壤标准制定和标准使用过程中对土壤中污染物含量进行校准,如中国对标准制定过程中的生物累积因子

(BCF)进行归一化处理,比利时和荷兰等在标准使用过程中,基于土壤有机质和黏粒含量对标准进行归一化处理;③除总量指标外,少数国家直接采用提取态含量表征污染物在土壤中有效态浓度,如奥地利、德国、捷克和斯洛伐克这 4 个国家制定了土壤提取态指标,包括硝酸铵提取和 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硝酸提取,模拟土壤-植物的污染物迁移,表征土壤中可被作物根系吸收的重金属含量.但考虑提取剂普适性、检测方法重复性和有效态动态变化等原因,我国暂未制订有效态标准,待条件成熟后再行考虑.

表 5 国内外农用地土壤环境标准的生物有效性因子

Table 5 Bioavailability factors of soil environmental standard for agricultural land		
国家/地区	基于理化性质划分标准	土壤归一方程
奥地利		提取态指标 基于土壤理化性质(黏粒含量、有机质和颜色等)判断污染物的迁移可能性;硝酸铵提取态
比利时 布鲁塞尔		(1) 重金属: $N(x,y) = N(10, 2) \times \frac{A+B \times x + C \times y}{A+B \times 10 + C \times 2}$ (2) 有机物: $N(y) = N(2) \times y/2$ (3) 多环芳烃: $N(y) = N(2) \times (A+B \times y)$ (4) 甲基叔丁基醚: $N(y) = N(2) \times (0.6 + 0.2 \times y)$ 式中: N 为土壤标准, A 、 B 和 C 为系数, x 为黏粒含量, y 为有机质含量
比利时 佛兰德		(1) 重金属: $N(x,y) = N(10, 2) \times \frac{A+B \times x + C \times y}{A+B \times 10 + C \times 2}$ (2) 有机物: $N(y) = N(2) \times y/2$ (3) 多环芳烃: $N(y) = N(2) \times (A+B \times y)$ (4) 甲基叔丁基醚: $N(y) = N(2) \times (0.6 + 0.2 \times y)$ 式中: N 为土壤标准, A 、 B 和 C 为系数, x 为黏粒含量, y 为有机质含量
捷克	分为轻质土和非轻质土 重金属分为黏土、砂壤土和砂土	$2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硝酸提取
德国	多环芳烃和多氯联苯考虑腐殖质含量(含量 $>8\%$ 或 $\leq 8\%$)	硝酸铵提取
波兰	考虑土壤导水率($>10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或 $\leq 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)	
斯洛伐克	分为黏土、砂壤土和砂土	硝酸铵提取 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硝酸提取
荷兰		(1) 重金属: $\text{SOS}_{\text{act}} = \text{SQS}_{\text{sta}} \times \frac{X+Y \times \% \text{ clay} + Z \times \% \text{ organic matter}}{X+Y \times 25 + Z \times 10}$ (2) 有机物: $\text{SOS}_{\text{act}} = \text{SQS}_{\text{sta}} \times \% \text{ organic matter}/10$ 式中: SOS_{act} 和 SQS_{sta} 为检测土壤和标准土壤的标准值, $\% \text{ clay}$ 为黏粒含量, $\% \text{ organic matter}$ 为有机质含量, X 、 Y 和 Z 为金属常数
加拿大	分为粗粒土和细粒土	
日本		直接以稻米镉限量作为标准值
中国	根据 pH 范围制定标准,农用地类型分为水田(水稻)和其他(小麦)	$\lg(\text{BCF}_{\text{add}}) = a \times \text{pH} + b \times \lg(\text{OC}) + k$ 式中: BCF_{add} 为外源添加生物富集因子, pH 为土壤 pH 值, OC 为土壤有机质含量; a 和 b 为无量纲参数,表示土壤性质对外源富集系数的影响程度; k 为方程的截距,表征物种内在敏感性的差异

2 我国农用地土壤环境标准面临的问题与对策

2.1 建立科学、规范的土壤环境背景值和基准制定方法

当前,土壤环境基准在定义、概念和研究方法等方面仍存在不少争议,但环境基准研究的目标是

为制定和修订环境质量标准提供科学与技术基础,已被管理部门和科研单位普遍认可^[25,26].我国土壤环境背景和基准等相关研究始于 20 世纪 70 年代“污灌区环境质量评价”、80 年代“土壤环境容量”和“土壤环境背景值”等,GB 15618-1995 标准在制定时充分借鉴上述研究成果,转化为土壤环境基准,

以此确定土壤环境质量标准. 当前农用地风险管控标准是在 GB 15618-1995 标准基础上采用最新研究数据和方法进行了修订, 但主要还是基于“土壤环境容量”、“临界含量”和“生态环境效应”等我国土壤科学传统方法, 且不同元素的标准制定受限于数据基础, 采用的推导方法各不相同. 因此, 应建立科学规范的土壤环境基准值制定方法, 为制修订土壤环境标准提供理论和方法基础.

GB 15618-2018 标准制定以农作物(水稻和小麦)盆栽和小区试验为主, 部分指标进行了野外土壤-农产品协同调查. 盆栽和小区试验部分方法与国际生态毒理学标准方法相似, 但国内外不同研究团队的培养条件和培养时间等试验条件差异较大, 当前我国尚未建立针对农作物的标准化培养试验方法; 推导方法采用目前国际上主流的回归方法和 SSD 法, 但缺少对已有土壤-农作物富集数据的筛选和评估技术方法, 对回归分析和 SSD 方法的使用缺少指导性文件; 我国食品中污染物限量标准规定的污染物类型有限, 对于食品中污染物限量标准中未限定的污染物, 应建立科学地风险评估, 制定相应标准; 我国已有《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017), 但该标准仅对地下水污染情况做监测及评价, 缺少与土壤污染情况形成关联, 随着“水土不分家”和“水土共治”等理念愈发重视, 应尝试加强保护地下水的土壤环境基准方法, 等时机成熟修订相应的农用地标准值.

土壤法实施以来, 背景值是判断土壤是否污染的重要手段. 目前, 我国已制定《区域性土壤环境背景含量统计技术导则》, 有利于规范相关土壤调查和监测数据的统计分析, 并充分利用现有的土壤调查和监测数据, 为确定区域土壤背景值提供依据.

2.2 加强土壤背景值和土壤环境基准等基础研究

加强土壤环境背景值和基准研究是我国生态环境法律体系的要求, 为制修订我国土壤环境标准提供数据基础. 《中华人民共和国环境保护法》规定“国家鼓励开展环境基准研究”. 《中华人民共和国土壤污染防治法》指出“国家支持对土壤环境背景值和环境基准的研究”. 《国家生态环境标准管理办法》指出“制定生态环境风险管控标准, 应当根据环境污染状况、公众健康风险、生态环境风险、环境背景值和生态环境基准研究成果等因素, 区分不同保护对象和用途功能, 科学合理确定风险管控要求”. 《国家环境基准管理办法(试行)》要求制定土壤环境基准, 包括“人体健康土壤环境基准、陆生生物土壤环境基准、农产品质量土壤环境基准和地下水土壤环境基准等”.

开展土壤环境基准基础研究, 为制修订土壤环境标准提供数据基础. 4 个土壤环境基准研究方向与国内外农用地土壤环境标准的保护对象一致. 其中, 保护农产品质量的土壤环境基准研究, 应加强土壤-农作物可食部分污染物迁移模型及影响因子研究, 加强生物有效性在土壤环境基准制定过程中应用; 保护陆生生物的土壤环境基准研究, 应加强本土代表性土壤和典型物种的生态毒理研究, 建立生态毒理数据共享平台; 保护人体健康的土壤环境基准研究, 应加强本土化暴露情景、暴露途径、暴露参数和剂量-效应评估(毒性参数)等基础研究, 服务于保护农用地使用人(口腔摄入、皮肤接触和吸入土壤颗粒等直接接触)和无食品安全限值的污染物土壤环境基准制定; 我国保护地下水土壤环境基准的研究基础相对薄弱, 土壤环境与水环境密切相关, 因此应以建立土壤污染与水环境质量的相互关联, 为系统化治理土壤和地下水污染夯实基础.

我国自“十五”以来, 生态环境、自然资源和农业农村等部门相继组织开展了全国土壤污染状况调查、多目标区域地球化学调查和农产品产地土壤重金属污染调查, 土壤污染状况详查等全国性调查以及土壤例行环境监测, 积累了大量土壤调查数据, 可为制定土壤背景值提供数据基础.

2.3 逐步完善土壤风险管控标准指标体系

GB 15618-2018 标准基于考虑保护农产品安全、农作物生长和土壤生态, 以及具有研究数据支撑的污染物指标. 其中, 基本项目(重金属)已覆盖国内外土壤标准主要重金属指标, 但我国农用地土壤标准指标数量依然相对较少. GB 15618-2018 标准在征求意见过程中, 不少单位提出增加锰、钴、铊、钼、钒、锑、锡、硒和氟化物等其他重金属及无机物指标. 实际上, 在标准修订时最初也新增了上述相关指标的标准值, 但受到食品安全标准和支撑标准制定的研究数据限制, 上述标准主要参考国内外土壤标准值和背景值制定, 考虑风险管控标准的保护目标和筛选功能, 本轮标准修订最终未添加上述指标. 因此, 下一步应在积累土壤环境基准方法学和基础数据的基础上, 考虑增加其他土壤重金属及无机物的标准值.

除指标数量, 当前我国土壤重金属指标只考虑全量指标. 由于土壤的复杂性, 重金属在土壤中的存在状态较多, 尤其在高背景地区, 仅以重金属总量作为污染指标往往不能起到风险筛选的作用. 重金属对生物的危害是由重金属有效态所决定, 其生物有效性一直是土壤污染化学和污染生态学研究领域中的科学问题, 尤其是土壤重金属生物有效性受很多

因素影响. 因此, 建议在后续修订土壤标准过程中, 加强对不同重金属元素的生物有效性关键因子的考虑(目前主要考虑 pH), 尝试建立不同元素的土壤归一化经验方程, 用于基准值推导和标准值的实际使用; 针对镉和砷等对农作物质量影响较大的关键元素, 尝试建立基于提取剂的有效态指标, 补充与总量指标共同为筛选标准.

相比重金属, 我国标准中有机污染物指标较少. 实际上, 标准修订过程中尝试建立石油烃和邻-苯二甲酸酯等指标的标准值. 但考虑农用地有机污染并不是普遍存在, 且与重金属不同, 目前有机物在土壤-农作物的迁移转化规律掌握不清, 因此最终标准中有机物指标仅保留六六六、DDT 和苯并[a]芘这 3 项. 随着我国农业生产中农药和化肥的大量施用, 有机污染已成为中国土壤中不可避免的污染物质. 因此, 与重金属相似, 建议后续在标准中增加有机物的种类.

2.4 鼓励建立区域或地方农用地土壤风险管控标准

我国幅员辽阔, 土壤区域性差异极大, 各地土壤环境背景含量、种植的作物类型和品种对污染物的敏感性、富集程度、水肥管理和消费习惯等都存在巨大差异. GB 15618-2018 标准在全国范围内使用, 需统筹考虑我国农用地土壤污染情况. 因此, 国家统一的标准一般只能起筛选作用, 在部分地区难以真实反映当地情况, 可能出现假阴性(土壤未超标但农产品超标)或假阳性(土壤超标但农产品未超标)^[27]; 同时, 目前我国经济发展水平并不一致, 土壤污染在全国尺度上呈现出明显的区域特征, 不同区域或省(区、市)的土壤污染特征并不相同. 国家标准未能完全覆盖不同地区的土壤主要污染物, 因此建议组织各地环保科研团队积极进行科学研究, 制定适合于不同地域的地方标准, 作为国家标准的补充^[28].

目前, 各地尚未建立地方农用地配套标准. “土十条”和土壤法中规定“各地可制定严于国家标准的地方土壤环境质量标准”, 这可能是地方对建立地方标准值的积极性不高的原因之一. 同时, 农用地土壤标准制定方法、数据基础和科研团队等基础薄弱也是限制各地制定地标的的原因. 相比较土壤筛选值, 目前不少地方在制定或准备制定土壤环境背景值, 如已发布的深圳和韶关背景值, 正在准备制定的安徽、珠海和苏州等. 考虑到背景值在当前土壤污染识别和防治的重要作用, 且制定方法相对简单, 调查数据相对充足. 因此, 建立地方土壤背景值作为筛选值的补充似乎是当前一个不错的选择.

3 结论

(1) 建立科学规范的土壤环境基准和背景值的制定指南与规范, 加强土壤背景值和土壤环境基准等基础研究, 为制修订土壤风险管控标准提供理论、方法和数据基础.

(2) 在条件允许的情况下, 逐步考虑增加土壤其他重金属及无机物和有机物标准值, 加强对土壤污染物的生物有效性考虑, 尝试建立标准使用的土壤归一方程, 建立基于提取剂的有效态指标, 作为总量指标的补充.

(3) 针对国家标准未能完全覆盖土壤区域性特征污染物, 鼓励制定适用于不同地域的地方标准, 作为国家标准的补充. 同时, 在制定地方标准条件未充分的情况下, 可优先鼓励建立区域土壤背景值作为筛选值的补充.

参考文献:

- [1] Perrodin Y, Boillot C, Angerville R, *et al.* Ecological risk assessment of urban and industrial systems: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(24): 5162-5176.
- [2] 王国庆, 邓绍坡, 冯艳红, 等. 国内外重金属土壤环境标准值比较: 镉[J]. *生态与农村环境报*, 2015, **31**(6): 808-821.
Wang G Q, Deng S P, Feng Y H, *et al.* Comparative study on soil environmental standards for heavy metals in China and other countries: cadmium [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, **31**(6): 808-821.
- [3] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(9): 1689-1692.
Chen N C, Zheng Y J, He X F, *et al.* Analysis of the report on the national general survey of soil contamination [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(9): 1689-1692.
- [4] 袁国军, 卢绍辉, 梅象信, 等. 农用地土壤污染风险管控标准延伸理解及其评价标准现状分析[J]. *中国农学通报*, 2020, **36**(2): 84-89.
Yuan G J, Lu S H, Mei X X, *et al.* Extended understanding of soil pollution risk management standards for agricultural lands and the status of evaluation standards [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, **36**(2): 84-89.
- [5] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [6] BBodSchV. Federal soil protection and contaminated sites ordinance[Z]. 1999.
- [7] 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.
- [8] Japanese Ministry of the Environment. Environmental quality standards for soil pollution [EB/OL]: <http://www.env.go.jp/en/water/soil/sp.html>. 1991-08-23.
- [9] Jeffries J, Martin I. Updated technical background to the CLEA model [R]. Rio House: Environment Agency (EA), 2009.
- [10] Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). A protocol for the derivation of environmental and human health soil

- quality guidelines[R]. Ottawa: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2006.
- [11] ÖNORM S 2088- 2. Contaminated sites Part 2: Application-specific evaluation of soil pollution of old sites and old waste dumps (in German)[S]. 2000.
- [12] Carlon C, D'Alessandro M. Derivation methods of soil screening values in Europe. A review and evaluation of national procedures towards harmonization[R]. Ispra: European Commission, Joint Research Centre, 2007.
- [13] Decree No. 13/1994 Sb. Decree of the Ministry of the Environment of the Czech Republic specifying some details of agricultural land resources protection[S]. 1994.
- [14] Official Journal of Laws No 165, item 1359. Decree of the Minister of Environment of 9 September 2002 on soil quality standards and earth quality standards[S]. 2002.
- [15] Korean Presidential Decree No. 29292, Nov. 20, 2018. Enforcement decree of the soil environment conservation act[Z]. 2018.
- [16] Open Development Thailand. Thailand board of investment guide on environmental regulations[R]. Bangkok: Thailand Board of Investment, 2014.
- [17] The Government of the Hong Kong Special Administrative Region Environmental Protection Department. Guidance manual for use of risk-based remediation goals for contaminated land management [R]. Hong Kong, China: The Government of the Hong Kong Special Administrative Region Environmental Protection Department, 2007.
- [18] 环署土字第0970031435 号令, 土壤污染监测标准[S].
- [19] 环署土字第1000008485 号令, 土壤污染管制标准[S].
- [20] 徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 等. 不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1667-1678.
- Xu M, Yan Z G, He M M, *et al.* Human health risk-based environmental criteria for soil: a comparative study between countries and implication for China[J]. Environmental Science, 2013, **34**(5): 1667-1678.
- [21] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 农用地土壤重金属生态安全阈值确定方法的研究进展[J]. 生态毒理学报, 2019, **14**(4): 54-64.
- Dou W Q, An Y, Qin L, *et al.* Research progress in determination methods of ecological safety thresholds for heavy metals in agricultural land[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, **14**(4): 54-64.
- [22] 李勛之, 郑丽萍, 张亚, 等. 应用物种敏感分布法建立铅的生态安全土壤环境基准研究[J]. 生态毒理学报, 2021, **16**(1): 107-118.
- Li X Z, Zheng L P, Zhang Y, *et al.* Derivation of ecological safety based soil quality criteria for lead by species sensitivity distribution[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, **16**(1): 107-118.
- [23] 夏家淇. 土壤环境质量标准详解[M]. 中国环境科学出版社, 1996.
- [24] 王小庆, 马义兵, 黄占斌. 痕量金属元素土壤环境质量基准研究进展[J]. 土壤通报, 2013, **44**(2): 505-512.
- Wang X Q, Ma Y B, Huang Z B. Research and prospect on soil quality benchmark for trace elements[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, **44**(2): 505-512.
- [25] 宋静, 骆永明, 夏家淇. 我国农用地土壤环境基准与标准制定研究[J]. 环境保护科学, 2016, **42**(4): 29-35.
- Song J, Luo Y M, Xia J Q. Study of the development of environmental criteria and standards for agricultural lands in China[J]. Environmental Protection Science, 2016, **42**(4): 29-35.
- [26] 周启星, 滕涌, 展思辉, 等. 土壤环境基准/标准研究需要解决的基础性问题[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(1): 1-14.
- Zhou Q X, Teng Y, Zhan S H, *et al.* Fundamental problems to be solved in research on soil-environmental criteria/standards [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(1): 1-14.
- [27] 夏家淇. 农用地块土壤污染分类标准制订方法探讨[J]. 生态与农村环境学报, 2019, **35**(3): 405-408.
- Xia J Q. Methods for derivation of site specific standard for management of contaminated agricultural soil [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, **35**(3): 405-408.
- [28] 郎笛, 王宇琴, 张芷梦, 等. 云南省农用地土壤生态环境基准与质量标准建立的思考及建议[J]. 生态毒理学报, 2021, **16**(1): 74-86.
- Lang D, Wang Y Q, Zhang Z M, *et al.* The establishment of soil eco-environmental criteria and environmental quality standards for agricultural land in Yunnan province [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, **16**(1): 74-86.

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i> (577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo (586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li (597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i> (608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i> (619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> (629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i> (639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming (649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i> (663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i> (675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i> (686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i> (696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i> (707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i> (714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i> (723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i> (735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao (743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun (752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i> (762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i> (782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i> (826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i> (847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i> (859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong (867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i> (878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i> (887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i> (907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i> (920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i> (928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i> (936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song (946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei (957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing (965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i> (975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i> (985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i> (995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i> (1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i> (1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i> (1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i> (1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i> (1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i> (1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i> (1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i> (1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i> (1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i> (1108)