

中国污染土壤再利用的环境管理思路探讨*

钟 重¹ 张 弛¹ 冯一舰¹ 李 斐¹ 陆 婷¹ 宁增平² 王国玉³

(1.浙江省生态环境科学设计研究院,浙江 杭州 310007;

2.中国科学院地球化学研究所,环境地球化学国家重点实验室,贵州 贵阳 550081;

3.中国城市建设研究院有限公司,北京 100120)

摘要 在新型城镇化的驱动下,污染土壤再利用的问题逐步受到关注,对其环境管理思路开展探讨具有重要的现实意义。对目前中国污染土壤再利用环境管理现状进行了分析,剖析了中国污染土壤再利用方面存在的主要问题。通过总结美国、荷兰等发达国家在污染土壤再利用上采取的管理方法、管理流程和技术标准体系,探讨了中国污染土壤再利用的环境管理思路,即根据土壤的污染程度和再利用方式对污染土壤再利用实施分类管理,建立涵盖污染土壤再利用风险评估、污染土壤再利用分类和污染土壤再利用技术的标准体系,并构建污染土壤再利用全流程监管机制,为实现污染土壤安全再利用提供有效的政策和技术保障。

关键词 污染土壤 再利用 环境管理

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.01.021

Thoughts on the environmental management of contaminated soil reuse in China ZHONG Zhong¹, ZHANG Chi¹, FENG Yijian¹, LI Fei¹, LU Ting¹, NING Zengping², WANG Guoyu³. (1. Eco-Environmental Science Research & Design Institute of Zhejiang Province, Hangzhou Zhejiang 310007; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang Guizhou 550081; 3. China Urban Construction Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100120)

Abstract: Driven by new urbanization, the problem of contaminated soil reuse has gradually become evident. It has important practical significance to explore thoughts on the environmental management of contaminated soil reuse in China. The status of environmental management of contaminated soil reuse in China was analyzed, and the existing major problems were discussed. The management patterns, processes and technical standards system of contaminated soil reuse in several developed countries like America and Netherlands were summarized. Then thoughts for China was put forward. That was to implement classified management of contaminated soil reuse according to the degree of soil pollution and reuse methods, to establish a technical standards system including risk assessment, classification and technology, and to practice an whole-process supervision mechanism. The thoughts above was feasible to provide effective support on policy and technology for safe reuse of contaminated soil.

Keywords: contaminated soil; reuse; environmental management

随着我国城镇化历程的不断推进,工业退役地块的治理修复已经成为城市土地开发利用的重点任务之一^{[1]20-23}。自2016年国务院印发《土壤污染防治行动计划》以来,国家层面逐步构建了污染地块开发利用的调查、评估、治理修复程序和技术标准体系。为实现“住的安心”的目标,全国各地已开展了大量污染地块的调查评估和治理修复项目。特别是京津冀、长三角、珠三角和长江经济带等经济快速发展地区,由于工业经济的快速发展带来了较为严重的土壤污染问题,加上城市化进程的推进导致土地资源紧缺,使得这些地区的污染地块治理修复任务

尤为繁重。然而,现阶段污染地块的开发大多要求短时间内完成地块的治理修复,这就客观上要求将大量的污染土壤外运修复或处置后再利用。即使污染地块土壤已治理修复达到相应的开发利用标准,但若在后续开发过程中要用到地下空间,还需要外运大量土壤,而这些土壤可能仍然存在着污染物残留问题。因此,如何实现污染土壤的合理处置和安全再利用,已经成为经济发达地区土壤污染治理工作的难点。为此,总结国内污染土壤再利用的环境管理现状和问题,借鉴国外污染土壤再利用的环境管理经验,从而理出我国污染土壤再利用的环境管

第一作者:钟 重,男,1982年生,博士,高级工程师,研究方向为土壤与地下水污染防治。

*国家重点研发计划项目(No.2018YFC1801402)。

理思路,对后续建立适用于我国的污染土壤再利用环境管理模式和技术标准体系具有重要意义。

1 国内污染土壤再利用的环境管理现状和问题

1.1 国内污染土壤再利用的环境管理现状

在法律层面,《土壤污染防治法》第 33 条明确规定“禁止将重金属或者其他有毒有害物质含量超标的工业固体废物、生活垃圾或者污染土壤用于土地复垦”,第 41 条要求“修复施工单位转运污染土壤的,应当制定转运计划,将运输时间、方式、线路和污染土壤数量、去向、最终处置措施等,提前报所在地和接收地生态环境主管部门”。除此以外,我国法律层面没有其他对于污染土壤再利用的环境管理要求。

2016 年发布《土壤污染防治行动计划》后,我国开始在国家层面搭建土壤污染防治的政策和技术标准体系^[2]。但对于污染土壤再利用的环境管理探索和试点主要仍在地方层面。北京市 2015 年发布了地方标准《污染场地修复后土壤再利用环境评估导则》(DB11/T 1281—2015),广东省也于 2018 年发布了《广东省污染地块修复后土壤再利用技术指南(征求意见稿)》,分别针对北京市和广东省修复后污染土壤用于回填土、道路用土等提出了污染土壤再利用的评估工作程序和评估模型,但均未涉及建筑利用土,也未提出对不同风险等级下的修复后土壤进行差异化管理的要求。

虽然目前国内缺乏专门针对污染土壤再利用的标准,但部分行业标准有涉及污染土壤的再利用,也具有一定的指导性。《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016)对用于绿化种植土壤的重金属含量、有机质含量、pH、土层厚度和容重等进行了规定。《城镇道路工程施工与质量验收规范》(CJJ 1—2008)要求对路基土进行天然含水量、液限、塑限、标准击实、承载力等测试,必要时还需做颗粒分析、有机质含量、易溶盐含量、冻膨胀和膨胀量等试验。《水泥窑协同处置固体废物污染控制标准》(GB 30485—2013)和《通用硅酸盐水泥》(GB175—2007)对污染土壤建材化利用过程中应用材料、处理工艺、工程设施的安全利用指标提出了标准要求。

1.2 国内污染土壤再利用存在的问题

1.2.1 基础研究薄弱导致风险情况不清

由于我国对于污染地块的治理修复目标采用基于风险的目标确定模式,其修复目标通常宽于相应的土壤污染风险筛选值,因此外运的土壤往往不能

达到相应的标准。而目前对于这些未达标的土壤再利用的继发风险研究还相对欠缺。

当污染土壤作为下填土使用时,常常会对污染土壤进行固化稳定化处理,以降低污染土壤中的有毒有害污染物在土壤中的迁移能力、溶解度、扩散度和毒性等^{[3],[4]741-753}。但是,固化稳定化技术实质上并没有减少土壤中的污染物总量。污染土壤经固化稳定化处理作为路基使用时,特别是在路基下无防渗层时,长期的下渗雨水和地下水浸泡可促使固化稳定化的污染物释放,特别是在路基受压产生裂隙后,可能会形成淋溶效应^[5-6]。这些还尚需大量的基础研究来支撑。

当污染土壤作为绿化种植土使用时,也存在残留污染物可能发生淋溶效应的问题。此外,作为绿化种植土使用时,污染土壤还可能在一定程度上对植物、土壤内生物的生存产生危害。目前,绿化种植土标准大多只关注有机质、营养物质含量,对污染物的含量及其导致的风险关注较少,而将污染土壤修复后作为绿化种植土仍存在很大的环境风险。有研究表明,土壤中的重金属会通过根系吸收进入植物体内,可改变植物光合作用有关酶的活性,导致 DNA 变异和影响植物生长^[7-9]。另有研究表明,固化稳定化处理的污染土壤中重金属对土壤中的蚯蚓致死率和外部形态等都有影响,甚至对土壤微生物群落发展产生负面影响^[10-12]。因此,污染土壤作为绿化种植土使用时,可能会对土壤中生物产生影响,甚至对生态系统和人体健康产生影响,需要加强相关基础研究。

污染土壤进行建材化利用是近年来出现的新的污染土壤再利用思路,主要原理是利用建材化生产过程中的高温环境促使土壤中的有机污染物焚毁,重金属向稳定的氧化态转变。但是,常规的建材化生产工艺往往不适用于污染土壤中含有大量高浓度污染物的情况。目前,绝大多数开展污染土壤建材化利用的企业其原料仓库尚未达到存放污染土壤时进行污染防治的能力,甚至出现大量污染土壤在进行建材化生产之前长期露天堆放的情况;若含氯污染土壤进行砖头烧制,可能会产生二噁英类物质,而一般的砖瓦窑基本无任何二噁英治理能力;即使污染土壤烧制成了砖和水泥,这些产品中可能也含有二噁英和重金属^[13]。因此,污染土壤建材化利用过程中对人体、生态环境的影响也需要更多的深入研究。

1.2.2 责任和考核制度缺失导致监管缺位

《土壤污染防治行动计划》提出了我国在土壤污

染防治领域的主要工作任务,其核心目标是要保证土壤环境的安全,对于污染地块主要考核其安全利用率,但仅针对污染地块内的原位土壤,而对于外运的污染土壤却没有相应的考核要求。对于外运作道路或绿化用的下填土目前还无法纳入风险管控名录进行长期监管;对于外运作建材化利用的土壤,其再利用过程及最终建材产品的安全利用定义仍然不明确。

在监管责任方面,污染土壤再利用的监管涉及多个政府相关部门,目前缺少明确的责任界定,导致相应的监管存在严重的缺位问题。在污染地块的治理修复阶段,生态环境部门需要承担最主要的监管责任。但在治理修复完成之后,若涉及建设用地的开发利用,则还需要规划和建设部门介入监管;若涉及建材化利用,其生产的建材产品质量还需要质检部门承担相关监管责任。

1.2.3 政策和规范不清导致再利用效率低下

由于我国未出台专门针对污染土壤再利用的相关管理办法,对于污染土壤再利用的政策和技术标准在国家层面也处于暂缺状态,但《土壤污染防治法》要求土壤污染责任人将修复方案报地方生态环境部门进行备案,当污染土壤需要外运和再利用时,还需要将相关计划报生态环境部门,而生态环境部门考虑到污染土壤再利用过程中存在的较大风险以及延伸责任,往往对于污染土壤再利用的方式选择趋于保守。地方生态环境部门对于污染土壤再利用作为下填土或进行建材化利用还存在较多的疑虑,目前仅能通过技术方案论证的方式来明确再利用方式是否能满足环保要求,但这种论证方式存在较大的不确定性,缺少规范性,使得污染责任人和生态环境部门间对污染土壤再利用去向有较大争议,部分项目甚至因此而搁置,导致再利用项目实施效率低下。

2 国外污染土壤再利用的环境管理经验

欧美发达国家在工业化和城市化的过程中较早地关注了土壤污染问题,也较早地开展了污染土壤的再利用工作。国外对污染土壤的再利用,总体可分为将土壤仍用作土壤使用和将土壤用作建材化利用两种情况;将污染土壤仍用作土壤使用是指将污染土壤回填至特定地块中,使其重新发挥土壤生态功能。将污染土壤用作建材化利用是根据污染土壤特性,将其作为原料应用于地基、沥青、水泥、砌块等的生产中^[14]。美国、荷兰是较早建立污染土壤再利用环境管理体系的国家。

2.1 美国的污染土壤再利用环境管理经验

美国在污染土壤再利用上已经发展出较为完善的技术标准体系,包括污染物扩散模型构建、安全利用方式划分、再利用情景设置、长期管理策略,以及毒性终点、参数变异性、模型不确定性、土壤性质变异和土地利用方式差异等因素的考虑和解决办法等。

美国的污染土壤再利用研究人员主要关注两大类问题:污染物的生物可利用性变化和土壤生态功能变化。针对固化稳定化处理后的污染土壤作为绿化种植土的情况,引入了实验室动物生物鉴定、实验室植物生物鉴定、植被覆盖率测定、pH 测试、植物营养元素和孔隙水测定、体外模拟试验、土壤盐分或土壤碱度和酸雨淋溶浸出试验等。根据污染土壤的再利用用途,选择相应指标判断毒性、生物可利用性或迁移性等,从而保护人体健康和生态环境安全。同时逐步建立起了相关指标的筛选数据库,但目前还未明确各类指标的标准限值^{[1]20-23}。

美国纽约州、新泽西州以及宾夕法尼亚州对于污染土壤安全再利用更是建立了较为完善的相关法律法规和技术标准体系,包括污染土壤的定义、安全再利用用途和场景的说明、监管程序要求等。纽约州颁布的《固体废物处置要求》明确提出了关于污染土壤安全再利用的管理程序和要求,同时还提出了污染土壤安全再利用的可利用性判定适用性及其适用场景的判断方法,能够与纽约州现行的《土壤清理指南》互相衔接和支撑;新泽西州的《地块修复技术要求》提出了填埋物替代品的定义,并给出了将填埋物替代品应用于地块修复项目的填埋材料指南,其中也涉及到了污染土壤再利用作填埋物替代品的环境管理;宾夕法尼亚州的《填埋管理规定》则主要就污染土壤作为下填土利用时的清洁填埋和基于监管的填埋提出了环境管理要求。

在污染土壤安全再利用标准方面,美国和绝大多数欧盟国家都是基于安全再利用的用途制定相应标准的,即根据每个地块的污染情况和特征,结合风险评估与治理修复技术路线,明确污染土壤安全再利用的目标,同时通过长期风险管控和修复效果评估等评价程序不断调整安全再利用的目标和标准,确保污染土壤始终处于安全再利用状态^[15]。美国宾夕法尼亚州的污染土壤安全再利用已经有了有机物、金属和无机物清洁填埋浓度限值作为安全填埋材料的标准^[16]。

2.2 荷兰的污染土壤再利用环境管理经验

荷兰早在 1995 年颁布的以保护土壤和地下水为主要目标的《建筑材料指令》就已经允许将符合要求的污染土壤用作建筑材料的生产。《建筑材料指令》规定了再生建筑材料使用 100 年内,土壤中累积污染物增量不能超过 1%;地表水中污染物浓度不能超过标准值的 1.1 倍。根据《建筑材料指令》,建筑材料中相关污染物的安全再利用标准制定过程见图 1。如果被判定为不适用于建筑材料再利用,则被认为是废弃物,需要按照特定要求进行处置^[17]。后来又发布了《建筑材料土壤粒径标准》,对用于建筑材料的土壤粒径范围也进行了详细规定。

2.3 其他国家的污染土壤再利用环境管理经验

英国早在 20 世纪 90 年代就兴建了日处理 1 000 t 受污染土壤的商业性玻璃制造工厂^[18],制成的块状或粒状玻璃可用于铺砌路面和制造工业用的玻璃管道,还可作研磨介质^{[4]741-743}。

德国就污染土壤再利用问题主要发布了《土壤区域规划法案》和《建设条例》,制定了污染土壤处置

后再利用的操作细则^[19]。

瑞典的污染地块治理修复目标也是采取基于风险的目标确定模式,修复目标是建立在污染地块或土壤再利用的基础上,通常住宅用地比非住宅用地的标准要严格得多。填埋是瑞典应用相对较多的污染土壤处置方法,但是随着近年来修复土壤量的不断增加,填埋压力越来越大。除填埋外,针对污染土壤,瑞典的做法主要包括两类:一类是修复后回填;另一类是让有资质的单位进行处置后再利用。近年来,瑞典环保部门颁布了一项关于固体废物在建材化利用方面的指南,将污染土壤再利用类型划分为一般用途和填埋覆盖土。一般用途主要包括沥青混合填料、路基、市政工程用土、砂浆、混凝土和铁路碎石等,该指南还规定了污染土壤再利用程序和环境影响评价方法。总体来看,瑞典的污染土壤再利用思路主要借鉴了荷兰的《建筑材料指令》。

日本具有将核污染土壤处理后用于道路建设和建筑材料的经验^[20]。2016 年 6 月,日本环境省决定,在考虑控制辐射量的基础上,将放射性铯在

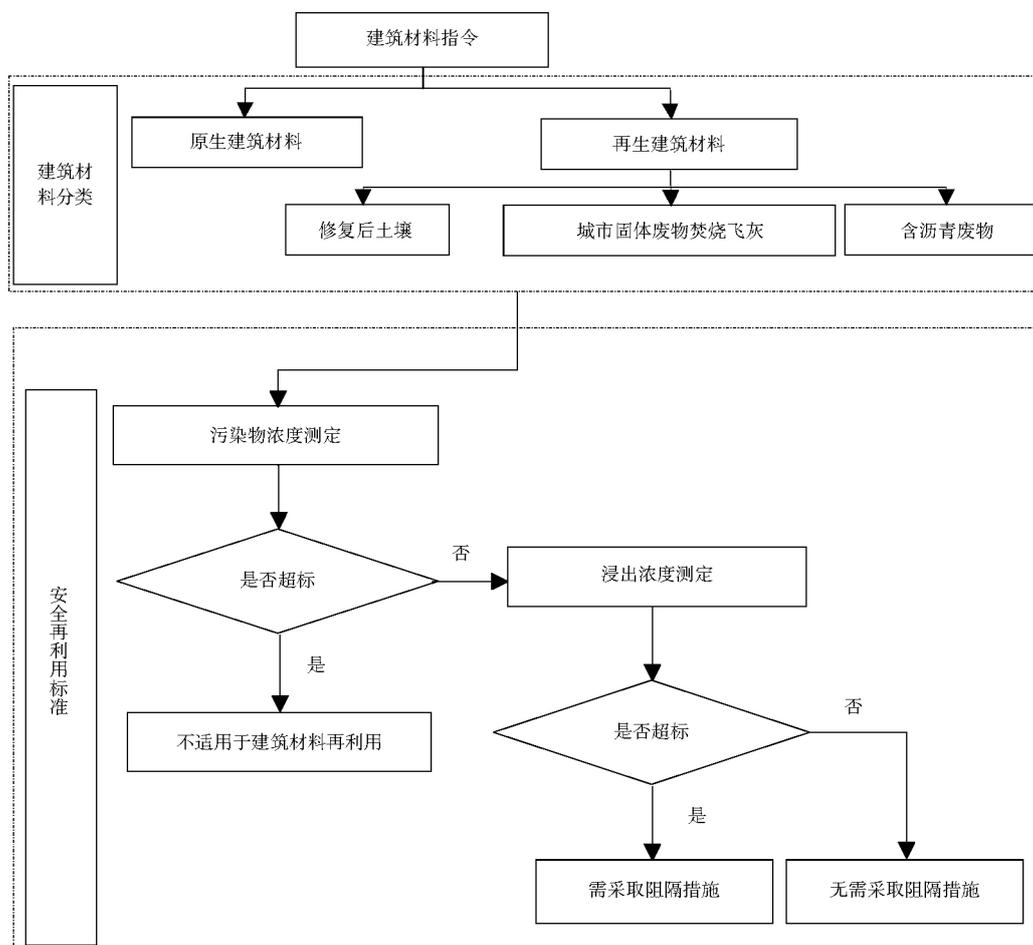


图 1 荷兰建筑材料安全再利用标准制定过程

Fig.1 Establishing process for safe reuse standards of building materials in Netherlands

5 000~8 000 Bq/kg以下的污染土壤用于全国的道路建设等公共事业,并于2018年制定发布了相关指导文件。日本环境省在福岛县南相马市小高区的临时保管场已正式启动了使用污染土壤的实证试验,主要目的在于确认再利用的安全性。

3 我国污染土壤再利用的环境管理思路

通过制定污染土壤再利用分类管理流程,建立系统的污染土壤再利用技术标准体系,并构建污染土壤再利用全流程监管,能够为我国污染土壤的安全再利用提供有效保障,是我国污染土壤再利用的总体环境管理思路。

3.1 制定污染土壤再利用分类管理流程

我国对于污染地块的环境管理主要采取了“分类管理、风险管控”的思路。借鉴荷兰的经验,对于通过污染状况调查确定地块内土壤污染物浓度均小于《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)中一类用地筛选值的地块,其开发利用不受限制,为无限制开发地块;对于地块内土壤有污染物浓度高于一类用地筛选值的地块,但其风险评估结果满足特定开发利用情景的风险可接受范围,这类地块为受限制开发地块;对于经风险评估确认地块内土壤有污染物浓度可导致不可接受的风险,其开发利用需要修复或风险管控,为需修复或风险管控地块。《土壤污染防治法》《污染地块土壤环境管理办法(试行)》等法律、法规的实施,以及GB 36600—2018、《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)等标准的出台,说明我国已经针对污染地块形成了初步的分类程序和分类标准。由于污染地块管理和污染土壤管理的相关性,在污染土壤的再利用分类环境管理上可以借鉴污染地块的分类管理思路,通过针对污染土壤的调查评估实现对污染土壤再利用的分类,从而实现对污染土壤再利用的有效风险管理。我国污染土壤再利用的分类管理流程可遵循如下思路:对于通过调查确定土壤中污染物浓度小于一类用地筛选值的土壤,其再利用不受任何的限制,为无限制利用土壤;对于土壤内有污染物浓度高于一类用地筛选值的土壤,但其风险评估结果满足特定再利用方式的风险可接受范围或低于再利用的污染物限值标准,这类土壤为受限制利用土壤;对于经过风险评估确认土壤内有污染物浓度处于风险不可接受的范围或高于再利用的污染物限值标准,则需要通过治理修复手段降低土壤中的污染物浓度以满足特定再利用方式

的要求,为需处置再利用土壤。

根据再利用方式的不同,作为土壤再利用主要包括作为下填土的再利用,其利用区域则需要开展持续的环境监管;作为建材化利用则还需要满足固体废物管理的相关要求。

3.2 建立污染土壤再利用技术标准体系

为使污染土壤再利用的分类管理有效落实,则必须建立适用于污染土壤再利用的技术标准体系。在环境风险评估标准方面,虽然已有HJ 25.3—2019的存在,但由于自然作用(如风化、淋溶等)和人为作用(如磨损、挤压等)不同,土壤再利用的载体结构及其性质,以及污染物的形态结构和转化过程都可能与原有污染土壤或污染地块存在很大差异,同时模型参数及其数值的选定、再利用情景等均会存在较大差异,因此需要建立适用于污染土壤不同再利用情景的环境风险评估方法。在土壤再利用的分类标准方面,需要提出针对下填土的环境和人体健康风险再利用限值标准,以及针对不同建材化利用的土壤或建材产品的污染物限值标准。在污染土壤再利用的技术标准方面,需要充分考虑污染土壤的各种再利用途径,从而制定安全再利用流程,明确各类土壤再利用的适用性及其技术实施要求,同时对技术实施过程中的环境监测和监管提供指导。

3.3 构建污染土壤再利用全流程监管机制

基于风险评估,将再利用污染土壤分为无限制利用土壤、受限制利用土壤和需处置再利用土壤,其中无限制利用土壤需要确保其在再利用过程中不再受到污染;受限制利用土壤需根据其所受限制有针对性地进行相应监管,以确保其利用方式符合相应的要求;对于需处置再利用土壤,需要将其治理修复到符合再利用的要求,重点应落实治理修复过程的监管。因此,对于污染土壤再利用需要构建全流程监管机制,确保污染土壤再利用管理各环节能够相互衔接。从职责分工来看,生态环境部门主要应关注土壤的污染程度,通过建立污染土壤再利用的分类标准及实施调查评估,明确污染土壤的分类等级和受限程度,同时对于治理修复过程实施监管;规划和建设部门需要针对污染土壤再利用用于下填土的情况进行监管,确保其用途符合规划要求;质检部门则需要针对污染土壤建材化利用所生产的建材产品进行质量监管,确保建材产品的使用安全性。

参考文献:

[1] 臧文超,王芳,张俊丽,等.污染场地环境监管策略分析——基于我国污染场地环境监管试点与实践的思考[J].环境保护,2015,43(15).

[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.

[3] XIA W Y,DU Y J,LI F S,et al.In-situ solidification/stabilization of heavy metals contaminated site soil using a dry jet mixing method and new hydroxyapatite based binder[J].Journal of Hazardous Materials,2019,369:353-361.

[4] LI W,NI P,YI Y.Comparison of reactive magnesia, quick lime, and ordinary Portland cement for stabilization/solidification of heavy metal-contaminated soils[J].Science of the Total Environment,2019,671.

[5] LIU J,ZHA F,XU L,et al.Effect of chloride attack on strength and leaching properties of solidified/stabilized heavy metal contaminated soils[J].Engineering Geology,2018,246:28-35.

[6] WANG F,WANG H,AL TABBAA A.Leachability and heavy metal speciation of 17-year old stabilised/solidified contaminated site soils[J].Journal of Hazardous Materials,2014,278:144-151.

[7] SHAHID M,DUMAT C,KHALID S,et al.Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: a comparison of foliar and root metal uptake[J].Journal of Hazardous Materials,2017,325:36-58.

[8] SYCHTA K,DUBAS E,YAMADA K,et al.Papain-like cysteine proteases are involved in programmed cell death in plants under heavy metal stress[J].Environmental and Experimental Botany,2020,174:104041.

[9] LIU N,LIAO P,ZHANG J,et al.Characteristics of denitrification genes and relevant enzyme activities in heavy-metal polluted soils remediated by biochar and compost[J].Science of the Total Environment,2020,739:139987.

[10] 刘馥雯,罗启仕,王漫莉,等.铬污染土壤稳定化处理对蚯蚓的毒性效应[J].环境科学学报,2019,39(3):952-957.

[11] ZHANG X,LOU X,ZHANG H,et al.Effects of sodium sulfide application on the growth of *Robinia pseudoacacia*, heavy metal immobilization, and soil microbial activity in Pb-Zn polluted soil[J].Ecotoxicology and Environmental Safety,2020,197:110563.

[12] DI CESARE A,PJEVAC P,ECKERT E,et al.The role of metal contamination in shaping microbial communities in heavily polluted marine sediments[J].Environmental Pollution,2020,265:114823.

[13] ZHU J,HAO Q,CHEN J,et al.Distribution characteristics and comparison of chemical stabilization ways of heavy metals from MSW incineration fly ashes[J].Waste Management,2020,113:488-496.

[14] HASSAN H F,AL RAWAS A,HAGO A W,et al.Investiga-

tion of permeability and leaching of hot mix asphalt concrete containing oil-contaminated soils[J].Construction and Building Materials,2008,22(6):1239-1246.

[15] 姜林,钟茂生,张丽娜,等.基于风险的中国污染场地管理体系研究[J].环境污染与防治,2014,36(8):1-10.

[16] 王虹,马娜,叶露,等.国外土壤污染防治进展及对我国土壤保护的启示[J].环境监测管理与技术,2006,18(5):51-53.

[17] 宋云,李培中,郝润琴.我国土壤固化/稳定化技术应用现状及建议[J].环境保护,2015,43(15):28-33.

[18] 徐美君.利用污染土壤制造玻璃[J].砖瓦世界,1995(14):10.

[19] 温丹丹,解洲胜,鹿腾.国外工业污染场地土壤修复治理与再利用——以德国鲁尔区为例[J].中国国土资源经济,2018,31(5):52-58.

[20] 宋颍,林慧颖,王士君.国外棕地再利用的经验与启示[J].世界地理研究,2015,24(3):65-74.

编辑:陈锡超 (收稿日期:2020-08-25)

(上接第 114 页)

[5] SJERPS R M,KOOIJ P J,VAN LOON A,et al.Occurrence of pesticides in Dutch drinking water sources[J].Chemosphere,2019,235:510-518.

[6] JIN X,LIU Y,QIAO X,et al.Risk assessment of organochlorine pesticides in drinking water source of the Yangtze River [J].Ecotoxicology and Environmental Safety,2019,182:109390.

[7] 唐肖.湖库型饮用水水源地保护研究——以天目湖水源地为例[D].苏州:苏州科技学院,2011.

[8] 王大才.关于湖库型饮用水水源保护现状及环境管理策略研究[J].环境与发展,2018,30(6):199-200.

[9] 李云祯,赵希锦,佟洪金.基于二维水质模型的饮用水水源保护区划分[J].水资源与水工程学报,2013,24(1):181-184.

[10] 焦军丽,马巍,裴倩楠,等.基于精细模拟的河流型饮用水水源保护区划分研究[J].水电能源科学,2018,36(7):33-36.

[11] 周训华,姜海萍.赤田水库饮用水水源保护区划分与保护措施[J].水资源保护,2009,25(6):8-11.

[12] 汪洋,李娟,席北斗,等.基于数值模拟的岩溶地下水源地保护区划分技术研究[J].中国岩溶,2018,37(6):799-809.

[13] 迟万清,刘艳玲,刘建强,等.不同风向作用下莱州湾水交换规律数模研究[J].海洋科学进展,2018,36(3):384-393.

[14] 任杰,董增川,徐伟,等.基于 MIKE21 FM 模型的河道防浪林行洪影响分析[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):420-424.

[15] 王欢,陈江海,陈翔,等.基于 MIKE21 FM 模型的厦门筼筮湖水水质提升方案[J].水电能源科学,2019,37(2):43-46.

[16] 王春玲,武雅洁,董启涛,等.日照豪迈码头港池布局对泥沙输移影响研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2019,49(7):110-117.

编辑:徐婷婷 (收稿日期:2020-03-03)