

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20201127001

王超, 李辉林, 胡清, 等. 我国土壤环境的风险评估技术分析与展望[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(1): 28-42

Wang C, Li H L, Hu Q, et al. Analysis and prospects on soil environmental risk assessment technology in China [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(1): 28-42 (in Chinese)

我国土壤环境的风险评估技术分析与展望

王超^{1,2}, 李辉林², 胡清^{2,*}, 高菁阳², 王宏²

1. 南方科技大学环境科学与工程学院, 深圳 518055

2. 南方科技大学工程技术创新中心(北京), 北京 100083

收稿日期: 2020-11-27 录用日期: 2021-02-17

摘要: 随着我国工业化、城镇化及农业高度集约化的快速发展, 耕地和场地土壤复合污染问题日益突出, 土壤污染的风险日趋显现。本文在总结国内外土壤污染健康风险评估技术发展历程的基础上, 探讨我国国内建设用地健康风险评估技术导则的异同点, 分析目前国内外有关土壤环境风险评估技术研究的热点与不足, 重点介绍了蒸气入侵模型的发展、土壤中有机污染物和重金属健康风险评估方面的研究工作。最后, 本文提出根据场地利用场景并结合考虑生物可给性的模型校正开展精细化的土壤环境人体健康风险评估, 同时也要加强土壤环境的生态风险评估以及地质高背景区的风险管控。本文为未来场地土壤环境的分级分类管理提供了前瞻性建议。

关键词: 土壤环境; 健康风险评估技术; 暴露模型; 蒸气入侵模型; 生物可给性

文章编号: 1673-5897(2021)1-028-15 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Analysis and Prospects on Soil Environmental Risk Assessment Technology in China

Wang Chao^{1,2}, Li Huilin², Hu Qing^{2,*}, Gao Jingyang², Wang Hong²

1. School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

2. Sustech Engineering Innovation Center (Beijing), Southern University of Science and Technology, Beijing 100083, China

Received 27 November 2020 accepted 17 February 2021

Abstract: With the rapid development of China's industrialization, urbanization and high agricultural intensification, the combined pollution of cultivated land and site soil has become increasingly prominent, and soil pollution risks have become increasingly urgent. This paper summarizes the development history on health risk assessment technology of soil contamination at home and abroad, discusses similarities and differences of domestic health risk assessment technology guidelines for construction land, analyzes the current hotspots and shortcomings of research on soil environmental risk assessment technology at home and abroad with focuses on the development of vapor intrusion models and the research work on health risk assessment of organic pollutants and heavy metals in soil. Finally, this paper proposes to carry out a refined health risk assessment of soil contamination based on site utilization scenarios and bioaccessibility model calibration. At the same time, it is necessary to strengthen the ecological risk

基金项目: 国家重点研发计划“粤港澳大湾区污染场地安全利用保障技术与集成工程示范”(2019YFC1803900)

第一作者: 王超(1982—), 女, 副研究员, 研究方向为土壤环境风险评估及新型污染物在环境中的检测、归趋、去除及人体和生态风险评估,
E-mail: wangchaoshirley@sustech.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: huq@sustech.edu.cn

assessment of soil contamination, and the risk management and control of high geological background areas. This paper provides forward-looking recommendations for the future hierarchical and classified management of site soil environment.

Keywords: soil environment; health risk assessment technology; exposure models; vapor intrusion models; bioaccessibility

随着我国城市化进程加快和工农业快速发展,土壤和地下水的污染问题日益凸显^[1]。而城市扩张、更新以及农用地转建设用地过程中存在的场地土壤和地下水污染将显著影响场地再开发后的人居健康安全、生态环境安全及饮用水安全。与此同时其他待转为建设用地的土地环境质量状况评价也是目前国内环保工作的重点。作为场地土壤环境质量调查与评估工作的重要支撑,土壤与地下水环境的健康风险评估技术标准制定,已成为我国环境管理部门工作的重中之重。

为更好地进行土壤环境健康风险管控,了解我国场地土壤环境质量状况,2014年7月,我国国家环境保护部正式颁布了《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3—2014)^[2](以下简称“导则”),为我国污染场地土壤环境风险评估工作提供了理论基础与执行依据。2018年6月我国生态环境部颁布了《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)^[3]和《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[4],为开展建设用地准入管理和农用地分类管控技术提供了技术支撑。针对如何规范污染场地的风险管控技术,我国生态环境部于2018年12月颁布了《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则(试行)》(HJ 25.5—2018)^[5]。为保障人体健康,保护生态环境,加强建设用地环境保护监督管理,规范建设用地土壤污染健康风险评估流程,我国生态环境部在《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3—2014)的基础上进行完善,并制定了《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)^[6]。北京市、浙江省、重庆市和上海市等地方环境管理部门根据自身发展需要制定了地方场地风险评估技术导则和土壤环境质量标准。国家导则和地方的技术导则在场地风险评估的工作内容和程序上大都分为危害识别、暴露评估、毒性评估、风险表征和控制值计算5个步骤,但是具体细节并不相同。

因此,分析土壤环境健康风险评价相关技术方法的研究历程,评述我国土壤环境健康风险评估技

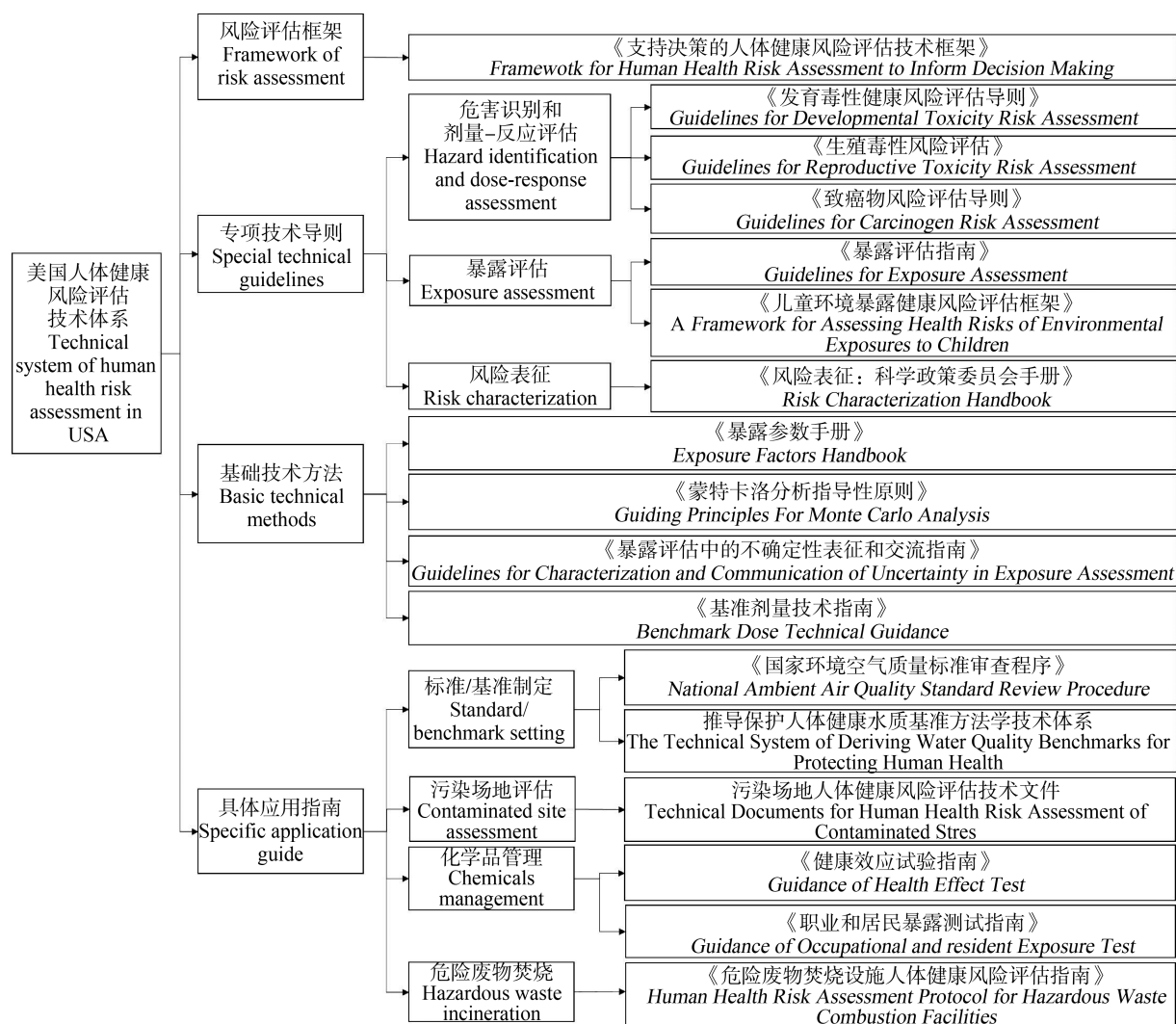
术导则标准的发展现状以及国内外相关方面的研究热点与不足,对于进一步开展土壤环境风险评估技术精细化研究与土壤环境分级分类管理体系构建具有重要意义。

1 土壤环境风险评价 (Environmental risk assessment of soil)

环境风险评价是指对人类经济活动所引发的一系列对人体健康、社会经济以及生态系统可能造成的损失进行评估、决策和管理的过程,其中土壤环境风险评价是其重要组成部分^[1]。土壤污染环境风险评价大致可分为两大类:基于人体健康风险的评价和基于生态环境风险的评价。基于人体健康的土壤环境风险评价是把土壤环境污染与人体剂量效应建立对应关系,定量描述污染物对于人体健康造成的风险^[7];基于生态的土壤环境风险评估采用概率方法对土壤污染物造成生态系统本身的破坏或生态系统中某些要素出现某种危害后果的可能性进行表征^[8-9]。基于人体健康的土壤环境风险评价,我国目前已有相对成熟的理论框架与方法,已应用于我国建设用地风险管理实践;而基于生态的土壤环境风险评价,我国目前还尚未有成熟的技术标准与导则。

1.1 国外基于人体健康的土壤环境风险评价技术体系

1983年,美国国家科学院(National Academy of Sciences, NAS)发布了红皮书《联邦政府的风险评估:管理过程》(*Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process*)^[10],提出了健康风险评估的定义与框架,包括危害识别、毒性评估、暴露评估和风险表征4个步骤,这对健康风险评估工作具有里程碑意义。基于健康风险评估的实践,美国建立了完善的人体健康风险评估技术体系(图1),从风险评估框架、专项技术导则、基础技术方法以及具体应用指南方面都出台了具体的文件。其中,《暴露评估指南》(*Guidelines for Exposure Assessment*)^[11]辨析了暴露和剂量的区别与联系,并给出了暴露定量估计的方法;《儿童环境暴露健康风险评估框架》

图 1 美国发展的人体健康风险评估技术体系^[15]Fig. 1 The technical system of human health risk assessment developed in USA^[15]

(A Framework for Assessing Health Risks of Environmental Exposures to Children)^[12]是专门针对敏感人群儿童;《暴露参数手册》(Exposure Factors Handbook)^[13]列出了众多风险评估参数的推荐值。这些文件已被许多国家的健康风险评估导则所采用。随后荷兰和英国等欧洲国家的健康风险评估体系也相继建立起来^[14]。

自 1978 年美国拉夫运河事件以来,美国已有 40 多年的场地风险管理经验,其中美国材料测试学会(American Society for Testing Material, ASTM)颁布的《基于风险的纠正行动标准指南》(Standard Guide for Risk-Based Corrective Action, E-2081)^[16]已在美国 40 多个州成功实施,基于该行动指南开发的 RBCA(Risk-Based Corrective Action)模型也开始广

泛用于污染场地的风险评估。此外美国环境保护局颁布了一系列技术性文件、导则和指南,系统介绍了土壤环境健康风险评估的方法和技术,包括《暴露风险评估指南》(Guidelines for Exposure Assessment)^[11]、《超级基金(RAGS)风险评估指南: A 部分》(Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS): Part A)^[17]、《土壤筛选指南》(Soil Screening Guidance: User's Guide)^[18]、《暴露因子手册》(Exposure Factors Handbook)^[13]、《蒸气入侵评估导则》(Guidelines for Vapor Intrusion Assessment)^[19]和《超级基金场地健康风险评估手册》(Site Risk Assessment Guidance for Superfund)^[17, 20-24]等。英国 1992 年开始研究污染场地暴露评估方法学,直到 2009 年才完善了污染场地相关暴露评估方法学^[25]、污染物理化参数^[26]及风险

评估导则,并在此基础上开发了 CLEA(Contaminated Land Exposure Assessment)模型^[27]。到目前为止,英国只公布了11种污染物的土壤指导值(soil guideline values, SGV)。由于土壤指导值过于保守,英国环境、食品及农村区域部(Department for Environment, Food and Rural Affairs, DEFRA)于2013年委托英国污染场地实用组织(Contaminated Land: Applications in Real Environments, CL: AIRE)制定了第四等级土壤筛选值(category 4 screening levels, C4SL)^[28]。加拿大环境部(Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME)于1996年在考虑保护生态物种和人体健康的基础上,分别制定了保护生态和人体健康的土壤质量指导值,并取较低值作为综合性土壤质量指导值^[29]。欧洲环境署(European Environment Agency, EEA)于1999年颁布了环境风险评估的技术性文件,系统介绍了健康风险评估的方法与内容^[29]。荷兰1994年修订了《土壤保护法》(*Soil Protection Act*),发布了《土壤保护导则》(*Soil Protection Guideline*)^[30],制定了基于风险的目标值和干预值,2000年更新目标值与干预值,2006年以土壤背景值(background values, BVs)取代目标值。德国颁布了《联邦土壤保护法》(*Federal Soil Protection Act*, BBodSchG)和《联邦土壤保护与污染场地条例》(*Federal Soil Protection and Contaminated Sites Ordinance*, BBodSchV),将土壤标准值划分为预防值(precautionary values)、触发值(trigger values)和行动值(action values)^[31-32]。

1.2 国内基于人体健康的土壤环境风险评价技术体系

与发达国家相比,我国对场地风险评估的研究起步较晚,相关技术文件正在逐步颁布执行且完善中。2009年,我国环境保护部起草了《工业污染场地风险评估技术导则》,并于2014年7月正式颁布实施了《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3—2014)^[2],该导则主要参照美国环境保护局颁布的《超级基金场地风险评估导则 第一卷 健康风险评估手册》(*Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS): Part A*)^[17]、美国材料测试协会颁布的《石油泄漏场地基于风险的纠正行动标准导则》(*Standard Guide for Risk-based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites*)^[33]及《建立污染场地概念暴露模型的标准导则》(*Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites*)^[34]。

《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3—2014)^[2]适用于制定基于人体健康风险的污染场地土壤及地下水筛选值,但没有考虑污染物向场外迁移的情景以及保护水环境或生态环境,对建立土壤环境基准的土地规划类型及相关暴露特征、暴露背景值、土壤性质、建筑物及气象因子等缺乏系统性的基础研究。因此,该导则在技术方法和模型方面还存在一些局限。近年来,我国部分省市针对污染场地健康风险评估也颁布了一些地方标准或技术导则,包括北京市颁布的《建设用地土壤污染状况调查与风险评估技术导则》(DB11/T 656—2019)^[35]和《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T 811—2011)^[36],上海市颁布的《上海市污染场地风险评估技术规范》^[37]和《上海市场地土壤环境健康风险评估筛选值(试行)》^[38],重庆市发布的《场地环境调查与风险评估技术导则》(DB50/T 725—2016)^[39],浙江省颁布的《污染场地风险评估技术导则》(DB33/T)^[40]等,为各地开展场地健康风险评估提供了技术支撑。在表1中总结了我国相关的污染场地健康风险评估技术规范。

1.3 国内污染场地健康风险评估技术导则比较

国内已发布的国家导则和地方技术导则在场地风险评估的工作内容和程序上大都分为危害识别、暴露评估、毒性评估、风险表征和控制值计算5个步骤。北京市导则未明确指出需进行毒性评估,仅在附件中列举了一些常见污染物的毒性参数;在风险评估阶段,除了健康风险评估外,仅北京市导则要求对污染地块可能造成地下水饮用水源污染的情形进行环境风险评估^[41-42]。接下来将从危害识别、暴露评估、毒性评估、风险表征和控制值计算这5个方面对我国国家与地方准则进行比较^[42]。

危害识别与筛选值:危害识别的内容主要是获取场地的详尽相关资料,开展土壤与地下水样品监测,结合各导则对应的筛选值标准确定场地关注污染物。我国地方导则与国家导则关于危害识别的内容基本保持一致。但北京市导则在危害识别阶段增加了污染识别,并在风险评价阶段明确要求确定污染源、未来用地方式和受体。筛选值选取则需根据国家 and 各地发布的筛选值标准。由于各地工业企业布局、社会经济发展水平、土层地质结构和对污染物认知等因素的差异,地方和国家的部分污染物筛选值标准在用地类型划分、指标选取和指标定值等均存在一定差异^[42-43](表2)。

暴露评估:国家导则、重庆市指南和上海市规范

均对暴露情景进行了明确的分类,基本可分为以住宅用地为代表的敏感用地和以工业用地为代表的非敏感用地;浙江省导则对暴露情景的分类则以敏感人群中是否涉及儿童来定;北京市导则暂未明确提及暴露情景这一说法。暴露途径主要在土壤淋溶至地下水、地下水皮肤接触以及土壤果蔬种植摄入上有部分差异,其他暴露途径地方与国家导则一致。暴露量计算方面,国家导则、浙江省导则和上海市导则中统计的暴露参数相对较为详细^[42]。

毒性评估:各导则中的暴露参数、毒性参数均采用美国环境保护局综合风险信息系统(integrated risk information system, IRIS)、临时性同行审定毒性数据(provisional peer reviewed toxicity values, PPRTVs)、美国环境保护局“区域筛选值总表”中的污染物毒性数据。由于地域差异,污染物理化参数有所不同,

例如国家导则、浙江省导则和上海市导则中的无量纲亨利常数(H)、水中扩散系数(D_w)、空气中扩散系数(D_a)、土壤-有机碳分配系数(K_{oc})和水溶解度(S)等存在差异,这也将导致采用不同导则计算得到的同一种污染物的风险控制值或修复目标值存在一定差异^[42]。

风险表征:国家导则要求分别计算土壤或地下水中单一污染物经单一途径的致癌风险和非致癌危害商,再计算单一污染物的总致癌风险和非致癌危害指数。国家和地方导则的不同之处在于,在进行单一污染物非致癌危害商的计算时,国家导则和上海市导则考虑了暴露于土壤和地下水的参考剂量分配系数,即土壤分配系数(soil allocation factor, SAF)和地下水分配系数(water allocation factor, WAF),北京市、浙江省和重庆市导则未考虑这一相关分配系数^[42]。

表 1 国家与地方污染场地健康风险评估技术规范总结

Table 1 Summary of technical specifications on national and local health risk assessment of contaminated sites			
发布时间 Issue time	地区 Place	名称 Name	执行情况 Implementation situation
2009 年 5 月 May 2009	北京市 Beijing	建设用地土壤污染状况调查与风险评估技术导则(DB11/T 656—2009) <i>Technical Guidance on Survey and Risk Assessment of Soil Pollution for Construction Land (DB11/T 656—2009)</i>	废止 Abolished
2013 年 6 月 June 2013	浙江省 Zhejiang	污染场地风险评估技术导则(DB33/T 892—2013) <i>Technical Guidance on Risk Assessment of Contaminated Sites (DB33/T 892—2013)</i>	现行 Currently in effect
2014 年 3 月 March 2014	全国 Nationwide	污染场地风险评估技术导则(HJ 25.3—2014) <i>Technical Guidance on Risk Assessment of Contaminated Sites (HJ 25.3—2014)</i>	废止 Abolished
2014 年 10 月 October 2014	上海市 Shanghai	上海市污染场地风险评估技术规范 <i>Technical Specifications on Risk Assessment of Contaminated Sites in Shanghai</i>	废止 Abolished
2016 年 12 月 December 2016	重庆市 Chongqing	场地环境调查与风险评估技术导则(DB50/T 725—2016) <i>Technical Guidance on Site Environmental Survey and Risk Assessment (DB50/T 725—2016)</i>	现行 Currently in effect
2019 年 9 月 September 2019	北京市 Beijing	建设用地土壤污染状况调查与风险评估技术导则(DB11/T 656—2019) <i>Technical Guidance on Survey and Risk Assessment of Soil Pollution for Construction Land (DB11/T 656—2019)</i>	现行 Currently in effect
2019 年 10 月 October 2019	浙江省 Zhejiang	污染场地风险评估技术导则(DB33/T) <i>Technical Guidance on Risk Assessment of Contaminated Sites (DB33/T)</i>	征求意见稿 Exposure draft
2019 年 12 月 December 2019	全国 Nationwide	建设用地土壤污染风险评估技术导则(HJ 25.3—2019) <i>Technical Guidance on Survey and Risk Assessment of Soil Pollution for Construction Land (HJ 25.3—2019)</i>	现行 Currently in effect
2020 年 4 月 April 2020	上海市 Shanghai	上海市建设用地土壤污染状况调查、风险评估、风险管控与修复方案编制、 风险管控与修复效果评估工作的补充规定(试行) <i>Supplemental Provisions on Survey, Risk Assessment, Risk Management and Control of Soil Pollution, and Strategies Compile, Risk Management and Control and Performance Assessment of Remediation for Construction Land in Shanghai (for Trial Implementation)</i>	现行 Currently in effect

风险控制值及修复目标值确定:国家导则、浙江省导则和上海市规范中计算污染物风险控制值时应用的模型基本一致。各导则在进行非致癌污染物的风险控制值计算时,国家导则考虑了暴露于土壤和地下水的参考剂量分配系数 SAF 和 WAF,而地方导则中未对其进行考虑^[37,39-40,42,44]。关于修复目标值的确定,浙江省导则特别要求:在经过风评计算得到的各关注污染物经对应暴露情境下所有暴露途径致癌风险的地下水风险控制值、经对应暴露情境下所有暴露途径的危害商的地下水风险控制值以及《地下水质量标准》(GB/T14848)^[45]中对应功能的地下水污染物浓度最大限值、地下水环境背景值基础上,对比结果大小来确定地下水修复建议目标值^[31];北京市导则要求根据场地地下水的不同使用功能参考不同的规范要求来确定地下水污染物的修复目标值;国家导则和重庆市导则都是根据单一污染物的所有地下水暴露途径计算地下水风险控制值,没有考虑地下水的使用功能及相应地下水指标问题^[40,42,44],由此将导致地下水目标污染物的风险控制值和修复目标值偏低,进而造成地下水的过度修复和非有效利用。

筛选值是指土壤中目标污染物含量等于或低于特定值时,对人体健康的风险可以忽略;超过该特定值时,对人体健康可能存在风险^[3]。筛选值是作为启动风险评估的阈值,它的选取一般参考地方标准中规定的值,没有地方标准的选用国家标准。当场地目标污染物浓度超过筛选值时,需要进行风险评估并计算基于致癌效应和非致癌效应所对应的风险控制值,选取这两者较小的作为计算得出的风险控制值^[6],并将得出的风险控制值再与筛选值进行对比,选择较高的作为场地的建议风险控制值。当场地目标污染物浓度超过管制值时,则需进行土壤与地下水的修复,修复目标值的确定则需综合考虑风险评估模型计算结果,包括已有国内外相关标准,当前修复技术的可行性、经济性、公众可接受性,以及关注污染物的背景浓度等因素^[35]。

2 土壤环境健康风险评估技术方面的研究热点与不足 (Research hotspots and shortcomings of soil environmental health risk assessment techniques)

在土壤环境健康风险评估过程中,致癌风险和非致癌危害熵的准确计算受暴露途径、暴露量、污染物毒性参数、暴露模型优化等因素影响,因此,学者们在土壤污染暴露模型的研选与优化、人体对土壤中有机污染物和重金属暴露量的准确计算等方面开

展了一系列的研究。尽管如此,土壤环境健康风险评估技术方面仍存在各种不足,在模型应用场景的准确性及数值模型假设条件的多样性等方面有待进一步的提高。下文将对土壤环境健康风险评估技术方面的研究热点与不足展开论述。

2.1 土壤污染暴露模型研究

土壤污染的人体健康风险与污染物的暴露量成正相关关系。广大学者对土壤中重金属污染物的暴露量计算模型基本达成一致。但污染场地中挥发性有机物(VOCs)种类繁多,生物化学和物理化学性质等差异性较大,导致土壤中 VOCs 的暴露量计算存在较大差异性^[52]。

建设用地 VOCs 的人体健康风险评估中应用的蒸气入侵模拟过程包括 4 步:(1)VOCs 从污染源释放;(2)VOCs 在土壤包气带中迁移转化;(3)VOCs 进入建筑物室内;(4)VOCs 与室内空气混合稀释,最终产生人体暴露。这 4 步模拟大量借鉴了氡气入侵室内空气模拟和农药在土壤中迁移转化模拟的研究成果^[53]。

20 世纪 90 年代初美国相继开发出了几个专门针对 VOCs 蒸气入侵的数学模型,包括 Johnson 和 Ettinger 模型^[54](以下简称 J&E 模型)、Biovapor 模型^[55]、Jury 模型^[56]和 Little 模型^[57]。后期欧洲学者跟进研究,相继开发出了 Csoil 模型^[58]、Volasoil 模型^[59]、Vlier-Humaan 模型^[60]和 Ferguson 模型^[61]。在表 3 中详细比较了常用 VOCs 蒸气入侵模型的假设条件和适用的建筑物类型。

美国和加拿大等国家的土壤污染风险评估技术导则选用了 J&E 蒸气入侵模型。相对于 Biovapor 和 J&E 这 2 种简单的解析模型,ASU 模型^[62]和 Brown 三维数值模型^[63]既能模拟稳态又能模拟非稳态的情形。ASU 模型利用有限差分法求解偏微分方程组的数值解,可模拟实际场地的三维立体状况,可模拟任何形状的建筑物,也可模拟均相、层次化和三维非均相等不同场地的地质状况,以及可模拟好氧生物降解。因此 ASU 模型输出的内容比较丰富,包括包气带气压场分布、气流分布和 VOCs 浓度分布等。Brown 模型继承了 ASU 模型的全部数学公式,但需在 COMSOL Multiphysics 中编译与运行,且采用的是有限元的数值法求解。而荷兰选用的 Csoil 模型只适用于带管道空间的建筑物的情境^[58]。荷兰公共卫生与环境国家研究院(The Netherlands National Institute for Public Health and the Environment, RIVM)在

表 2 中国国家与地方土壤环境质量标准对照表

Table 2 Comparison table of national and local soil environmental quality standards in China

区域 Place	发布年份 Issue time	标准名称 Name of standard	污染物种类 Categories of pollutants	标准值名称 Name of standard values	适用范围 Scope of application
北京市 ^[36] Beijing ^[36]	2011	场地土壤环境风险评价筛选值* <i>Screening Values of Soil Environmental Risk Assessment at the Site*</i>	89 种 89 categories	污染场地筛选值 Contaminated site screening values	公园、居住、工业/商业用地 Parks, residential land, and industrial/commercial land
		土壤重金属风险评价 筛选值 珠江三角洲 <i>Screening Values of Soil Heavy Metal Risk Assessment in Pearl River Delta</i>	9 种 9 categories	土壤污染风险筛选值 Soil contamination risk screening values	农业用地、建设用 地 Agricultural land and construction land
		上海市市场地土壤环境健康 风险评估筛选值* <i>Screening Values of Soil Environmental Health Risk Assessment at the Site in Shanghai*</i>	116 种 116 categories	场地土壤健康风险筛选值 Site soil health risk screening values	敏感用地与非敏感用地 Sensitive and non-sensitive land
重庆市 ^[47] Chongqing ^[47]	2016	场地土壤环境风险评估筛选值* <i>Screening Values of Soil Environmental Risk Assessment at the Site*</i>	107 种 107 categories	场地土壤环境 风险评估筛选值 Site soil Environmental risk assessment screening values	居住用地、商服/ 工业用地、公园绿地 Residential land, commercial/ industrial land, and green land of parks
		按风险厘定的土壤污染整治 标准的使用指引 <i>Guidelines on the Use of Soil Pollution Remediation Standards Determined by Risk</i>	土壤 54 种, 地下水 29 种 54 categories in soil and 29 categories in groundwater	按风险厘定的土壤污染 整治标准值和按风险厘定 的地下水污染整治标准值 The standard value of soil pollution remediation determined by risk and the standard value of groundwater pollution remediation determined by risk	土壤(市区住宅、乡 郊住宅、工业、公园) Soil (urban residential land, rural residential land, industrial land, and land of parks)
香港 ^[48] Hong Kong ^[48]	2017				地下水(市区住宅、 乡郊住宅、工业) Groundwater (urban residential land, rural residential land, and industrial land)
国家 ^[3] Nationwide ^[3]	2018	土壤环境质量建设用地土壤 污染风险管控标准 <i>Soil Environmental Quality—Standards for the Control of Soil Pollution Risk in Construction Land</i>	85 种 85 categories	建设用地土壤污染风险 筛选值和管制值 Screening and control values of soil pollution risk for construction land	第一类用地和第二类用地 The first type of land and the second type of land
				污染场地风险评估技术导则· 表 A.1 部分关注污染物 的土壤风险评估筛选值 Technical guidance on risk assessment of contaminated sites— Table A.1 focuses on soil risk assessment screening values of contaminants	第一类用地和第二类用地 The first type of land and the second type of land
浙江省 ^[40] Zhejiang ^[40]	2019	污染场地风险评估技术导则 <i>Technical Guidance on Risk Assessment of Contaminated Sites</i>	87 种 87 categories	建设用地土壤污染 风险筛选值和管制值 Screening and control Values of Soil pollution risk for construction land	第一类用地和第二类用地 The first type of land and the second type of land
辽宁省 ^[49] Liaoning ^[49]	2019	污染场地风险评估筛选值 <i>The Screening Value of Contaminated Site Risk Assessment</i>	93 种 93 categories		第一类用地和第二类用地 The first type of land and the second type of land

续表2

区域 Place	发布年份 Issue time	标准名称 Name of standard	污染物种类 Categories of pollutants	标准值名称 Name of standard values	适用范围 Scope of application
深圳市 ^[50] Shenzhen ^[50]	2020	深圳市建设用地土壤污染 风险筛选值和管制值 <i>The Selection Value and Control Value of Soil Pollution Risk for Construction Land in Shenzhen</i>	66 种 66 categories	建设用地土壤污染风险 筛选值和管制值 Screening and control values of soil pollution risk for construction land	第一类用地和第二类用地 The first type of land and the second type of land
澳门 ^[51] Macao ^[51]	2019	土壤污染评估指引 <i>Guidelines on soil Pollution Assessment</i>	土壤 42 种, 地下水 23 种 42 categories in soil and 23 categories in groundwater	土壤浓度参考值和 地下水浓度参考值 Soil concentration reference values and groundwater concentration reference values	土壤(商住、工业、公园绿地) 地下水(市区住宅、工业) Soil (commercial land, industrial land, and green land of parks) Groundwater (urban residential land, and industrial land)

注: * 表示有对应的地方风险评估技术标准

Note: * indicates that there are corresponding local risk assessment technical standards.

后续开发的 Volasoil 模型在 Csoil 模型基础上扩展了可适用的建筑物类型,包括带管道空间的建筑物、带地下室的建筑物和混凝土板式基础建筑物^[59]。

目前,中国国家导则中对于室内 VOCs 健康风险评估使用的是 J&E 模型。J&E 模型假设气体在土壤中是均匀扩散的,而实际扩散是不均匀的;此外 J&E 模型还假设所有从污染源释放的 VOCs 都进入室内,从而导致计算中使用的室内 VOCs 浓度偏大,计算出的土壤环境基准值过于保守。因此我国生态环境部发布的《人体健康土壤环境基准制定技术指南(征求意见稿)》中对石油烃类污染物及氯代烃类污染物的基于人体健康的土壤环境基准值推算时推荐使用 PVI2D 模型^[64]和 CVI2D 模型^[65]。这 2 个模型都在 J&E 模型基础上考虑了 VOCs 在气相、水相和吸附相的平衡,VOCs 在含氧环境中受好氧微生物作用而降解等因素。PVI2D 模型是可以模拟好氧生物降解的二维解析模型,适用于带地下室和混凝土板式基础的 2 类建筑物^[64]。而 CVI2D 模型主要适用于不可生物降解的 VOCs(如氯代烃),计算公式与 J&E 模型一致,计算室内空气中 VOCs 浓度直接使用美国环境保护局蒸气入侵数据库中实测的底板衰减因子(subslab attenuation factor),而不需要使用公式推导^[53,65]。

蒸气入侵模型的研究关键在于所建立的数学模型只能将评价的对象进行数据化、简单化以至于推算的污染物浓度接近真实值,但并不能完全反映 VOCs 在室内造成健康风险的真相。所以在不同的水文地质环境、不同的建筑设计和不同的污染物类

型的情境下,模型的选取与优化尤为重要,解决 VOCs 蒸气入侵模型的适用性问题也将是未来土壤环境风险评估技术体系研究的重要方向。

2.2 土壤中有有机污染物的健康风险评估技术研究

土壤中有有机污染物的种类繁多,并且不断有新的有机污染物在土壤环境中被检出。罗泽娇等^[1]通过对美国环境保护局的综合风险信息系统、临时性同行审定毒性数据、健康影响评估汇总表(health effects assessment summary tables, HEAST)中的毒性参数进行分析,发现这些数据库中部分常见有毒有机化合物没有经口摄入致癌斜率因子(SF₀)、经口摄入参考剂量(RfD₀)、单位致癌因子(URF)和参考浓度(RfC)等重要参数的参考数据,导致在对含有这些污染物的地块进行全面风险评估时,无法计算致癌效应。因此,国内外开展了大量毒理学研究来收集新型有机污染物的毒理学和理化性质参数数据。

目前,国内外导则仅仅是针对单个化学污染物的风险评估,虽然地方标准对总石油烃(< C16 脂肪族和> C16 脂肪族)规定了污染场地的土壤筛选值,但是针对石油烃这一种复杂混合物如何开展风险评估,目前国内外导则中没有相应的方法^[1]。为此,有学者利用分段的方法开展了一系列的研究来探讨针对总石油烃的土壤环境健康风险评估方法^[66-70]。例如,韩国的学者^[68]参考美国总石油烃标准工作组(Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group, TPHCWG)发布的针对石油污染场地土壤风险评估的方法,将石油烃分为脂肪族石油烃和芳香族石油烃,再分别对它们按照碳的数目进行细分,最

表 3 几种常见挥发性有机物 (VOCs) 蒸气入侵模型的假设条件和适用建筑物类型对照表

Table 3 Comparison table on hypothetical conditions and applicable building types for several common volatile organic compounds (VOCs) intrusion models

模型 Model	选用国家 Countries applying the model	假设条件 Hypothetical conditions	适用的建筑物类型 Applicable building types
J&E 蒸气 入侵模型 J&E model	美国、加拿大和英国 United States of America, Canada, and United Kingdom	①系统处于稳态;②VOCs 蒸气只有扩散 一种传质途径;③忽略 VOCs 的降解;④污染源无限大, 浓度不会删减;⑤VOCs 进入室内, 室内空间作为一个混合反应容器 ①The system is in a steady state; ②VOCs vapor has only one mass transfer way through diffusion; ③Ignore the degradation of VOCs; ④The pollution source is infinite, and the concentration will not be reduced; ⑤VOCs enter the room, and the indoor space serves as a mixed reaction vessel	带地下室的建筑和 混凝土板式基础建筑 Buildings with basements and concrete slab foundation buildings
Biovapor 模型 Biovapor model	美国(适用石油 烃蒸气) United States of America (applicable to petroleum hydrocarbon steam)	①系统处于稳态;②VOCs 蒸气只有扩散一种传质途径; ③忽略 VOCs 的降解;④污染源无限大,浓度不会删减; ⑤VOCs 进入室内,室内空间作为一个混合反应容器; ⑥当氧气浓度达到一定阈值将发生好氧生物降解 ①The system is in a steady state; ②VOCs vapor has only one mass transfer way through diffusion; ③Ignore the degradation of VOCs; ④The pollution source is infinite, and the concentration will not be reduced; ⑤VOCs enter the room, and the indoor space serves as a mixing reaction vessel; ⑥Aerobic biodegradation will only occur when the oxygen concentration reaches a certain threshold	带地下室的建筑和 混凝土板式基础建筑 Buildings with basements and concrete slab foundation buildings
Csoil 模型 Csoil model	荷兰 the Netherlands	①系统处于稳态;②污染源无限大; ③地下无非水相液体(NAPL)存在;④土壤是均质的; ⑤忽略土壤对 VOCs 的吸附作用;⑥忽略 VOCs 的降解; ⑦忽略 VOCs 的侧向迁移与淋溶作用 ①The system is in a steady state; ②The pollution source is infinite; ③There is no non-aqueous phase liquid (NAPL) existing underground; ④The soil is homogeneous; ⑤Ignore the adsorption of VOCs by soil; ⑥Ignore the degradation of VOCs; ⑦Ignore the lateral migration and leaching effects of VOCs	带管道空间的建筑物 Buildings with duct space
Volasoil 模型 Volasoil model	荷兰 the Netherlands	①系统处于稳态;②包气带为均质; ③VOCs 在包气带靠扩散传质; ④忽略 VOCs 的降解;⑤污染源无限大 ①The system is in a steady state; ②The vadose zone is homogeneous; ③VOCs rely on diffusion for mass transfer in the vadose zone; ④Ignore the degradation of VOCs; ⑤The pollution source is infinite	带管道空间的建筑物、 带地下室的建筑和混凝土 板式基础建筑 Buildings with duct space, buildings with basements and concrete slab foundation buildings

续表3

模型	选用国家	假设条件	适用的建筑物类型
Model	Countries applying the model	Hypothetical conditions	Applicable building types
PVI2D 模型	中国	①系统处于稳态;②污染源无限大;③污染源浓度不变; ④包气带是均质的;⑤VOCs 三相平衡且可逆; ⑥VOCs 浓度符合线性分配;⑦扩散是 VOCs 在土壤中 唯一传质途径;⑧当氧气浓度达到一定阈值将发生好氧生物降解	带地下室的建筑和 混凝土板式基础建筑
PVI2D model	China	①The system is in a steady state; ②The pollution source is infinite; ③The concentration of the pollution source remains unchanged; ④The vadose zone is homogeneous; ⑤VOCs are three-phase balanced and reversible; ⑥VOCs concentration conforms to linear distribution; ⑦Diffusion is the only way for mass transfer of VOCs in soil; ⑧Aerobic biodegradation occurs when the oxygen concentration reaches a certain threshold	Buildings with basements and concrete slab foundation buildings
CVI2D 模型	中国(适用于 不可降解 VOCs)	①系统处于稳态;②污染源无限大;③污染源浓度不变; ④包气带是均质的;⑤VOCs 三相平衡且可逆; ⑥VOCs 浓度符合线性分配; ⑦扩散是 VOCs 在土壤中唯一传质途径	带地下室的建筑和 混凝土板式基础建筑
CVI2D model	China (applicable to non-degradable VOCs)	①The system is in a steady state; ②The pollution source is infinite; ③The concentration of the pollution source remains unchanged; ④The vadose zone is homogeneous; ⑤VOCs are three-phase balanced and reversible; ⑥VOCs concentration conforms to linear distribution; ⑦Diffusion is the only way for mass transfer of VOCs in soil	Buildings with basements and concrete slab foundation buildings

后得出在 13 个总石油烃组分中,脂肪族石油烃组分 EC₈₋₁₆ 和芳香族石油烃组分 EC₁₀₋₂₁ 是引起人体健康风险的主要贡献污染物。

国内导则中推荐的风险评估模型往往很难反映真实的土壤环境质量状况、暴露场景等,有时计算得出的污染物风险控制值过于保守,影响后续场地修复与管理的决策。杜红花^[71]考虑了居住环境的室内地基不与污染土壤接触的实际情况,并根据 Fick 扩散定律将下层土壤中的气态污染物扩散过程分为两部分计算,通过对室内蒸气入侵模型的修正使得最终计算的暴露量比使用中国国家导则推荐方法计算的结果低 55%,因此通过修正室内蒸气入侵模型后计算的修复目标值明显提高,大大减少了需修复的土壤方量。毛芳^[72]认为中国国家导则中推荐的模型不能充分还原实际应用场景,只在模型中设置污染源的位置和浓度,未能详细地对不同污染源中毛细管层水分连续分布、水位线位置以及污染物降解特性等相关参数进行设置,为此毛芳等研究了非水相液体和溶解相 2 种污染源中污染物的迁移变化,构建表征 2 种污染源差异的 PVI(Petroleum Vapor Intrusion)模型,研究土壤质地、水分分布变化和污染

源深度等变量对 PVI 模型的影响,为场地石油烃类污染物的风险评估提供了更好的技术指导。

2.3 土壤中重金属的健康风险评估技术研究

目前土壤污染物测定都是以总量来反映污染水平,特别是有些重金属离子很大一部分赋存于土壤矿物晶格中,例如测定土壤中铜、锌、铅、铬和镉时需“硝酸-氢氟酸-过氧化氢”三酸消化体系和密封高压消解罐对土壤样品进行消解才能测定总量^[73]。实际污染土壤颗粒进入人体后,重金属不能完全析出;此外,重金属在消化道中被人体吸收的量也存在一定的差异性。张玉等^[74]通过模拟场地土壤中重金属在胃和小肠阶段的吸收,认为土壤中的重金属在胃与小肠的消化阶段不会完全被人体吸收。因此采用未经生物可给性校正的暴露量计算出的修复目标值偏小^[75]。

关于铅的风险评估,国际上通用的模型为 IEUBK 模型,我国部分学者探讨了 IEUBK 模型在我国使用的可行性。王波等^[76]运用 IEUBK 模型研究环境铅对婴儿血铅的影响,6 月龄婴儿实测的血铅几何均值为 54.7 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;环境介质引起的婴儿血铅浓度升高的几何均值为 12.4 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,与实测值比

较,发现当地环境铅对婴儿血铅的贡献率为22.7%。徐松^[77]利用IEUBK模型对我国儿童血铅预测效能进行了研究,收集了44名儿童的实测血铅值和详细的环境铅暴露资料,实测值和模型预测值的几何均值分别为 $74.9 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $128.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,95%置信区间(CI)分别为 $65.6\sim 85.4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $100.0\sim 164.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;实测值和预测值 $>100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的儿童分别占27.3%和61.8%,对应的95%置信区间为15.0%~43.0%与42.2%~81.4%。结果表明,实测值与预测值存在较大差异,并指出这可能与模型外部参数的选取以及模型内部参数的限制有关。我国有关IEUBK模型本地化参数的研究较少,若完全采用文献推荐参数计算铅的风险控制值则与国家推荐筛选值相差过大^[78-79],因此,目前国内场地风险评估中污染物铅的风险不单独计算。

除此之外,中国很多城市的土地属于重金属高背景区,土壤中的重金属含量往往超过国家标准的筛选值,甚至大于管制值。刘爽^[80]对珠三角地区地质高背景区农田质量进行风险评价,采用单因子污染指数法和反距离插值法对研究区土壤中的重金属分布特征进行统计分析,利用单因子污染指数法和生物富集系数对水稻中的重金属分布特征进行分析研究,通过综合质量指数评价法确定地质高背景区重金属污染农田的安全利用等级,依据安全利用等级对重金属污染农田进行分级、分区,提出了不同安全利用分区的合理性管控建议。大多数学者目前仅对地质高背景区农用地土壤进行土地质量风险评价,但对于地质高背景区建设用地的风险评估技术体系以及分类分级管理的研究尚未开展。

3 总结与建议 (Conclusions and recommendations)

(1)目前土壤环境风险评估多从人体健康的角度考虑,旨在保护人体健康和农产品安全,国内关于土壤污染的生态风险评价仅停留于理论研究阶段,未能形成具体的环境管理体系。因此,未来应加强完善土壤污染物生态毒理学的相关研究,发展典型的污染场地和典型土壤利用的人体健康风险及生态风险的综合研究方向,构建生态环境安全、人体健康风险管控相结合的技术体系。

(2)我国污染场地健康风险评估技术体系多是借鉴国外的成功经验,开展模型应用和土壤污染风险管控。在我国国家导则和地方导则中推荐的方法过于笼统,对于多样化污染场地无法做到更加精细

化的风险评估和管控。基于污染物生物可给性校正评估人体健康风险后,制定的修复目标值比未经校正计算的修复目标值更为宽松,能有效解决基于总量评估造成的土壤修复目标过严的问题,也能更加有效制定和实施对应的风险管控措施。未来的研究方向应着重于污染物的分类、污染物风险评估模型使用场景的精细化分类及基于污染物生物可给性的健康风险评估研究,使得污染修复目标值的计算更加精确。同时政策导向上应加强场地土壤污染风险管控的疏导,避免过度修复。

(3)在暴露评估和毒性评估阶段,国内的研究主要参考和学习美国的成果,在暴露模型的构建、污染物毒理学和理化性质参数的研究方面不足,从而制约风险评估模型本地化研究的发展。首先,由于建设用地实际分类较多,每种土地利用方式的暴露途径和暴露参数不同,应该结合实际用地情况来确定土壤筛选值。目前国内导则大多以敏感和非敏感用地来划分用地类型,过于笼统,实际场地风险评估的参数敏感性与污染因子所涉及的暴露途径有较大关系。因此基于用地类型的暴露模型的建立可以细化风险评估过程,促使风险评估更加精准。此外,应加强蒸气入侵模型研究,构建本地化的暴露模型数据库,分类研究不同暴露情境下受体的暴露参数。

(4)目前我国对于地质高背景区建设用地的风险评估无特殊要求,但重金属高背景带来的健康风险无法忽视,未来管理研究应朝着分类分级的管控方向发展,由政府主导地质高背景区域的划定、土地利用类型的建设规划,制定单独的风险评估和管控体系,尽量降低高背景重金属土壤带来的人体健康风险和生态风险。

通讯作者简介:胡清(1964—),女,教授,主要研究方向为大数据与环境、城市环境工程及污染场地绿色可持续修复与管理等。

参考文献 (References):

- [1] 罗泽娇,贾娜,刘仕翔,等.我国污染场地土壤风险评估的局限性[J].安全与环境工程,2015,22(5):40-46,58
Luo Z J, Jia N, Liu S X, et al. Limitations of risk assessment on contaminated site soil in China [J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22 (5): 40-46, 58 (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国环境保护部.污染场地风险评估技术导则(发布稿):HJ 25.3—2014[S].北京:中华人民共和国环境保护部,2014

- [3] 中华人民共和国生态环境部. 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[S]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2018
- [4] 中华人民共和国生态环境部. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2018
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则(试行): HJ 25.5—2018[S]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2018
- [6] 中华人民共和国生态环境部. 建设用地土壤污染风险评估技术导则: HJ 25.3—2019[S]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2019
- [7] 王立婷, 刘仁志. 土壤污染风险评价研究进展[J]. 中国环境管理, 2020, 12(2): 62-68
Wang L T, Liu R Z. Research progress on soil pollution risk assessment [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(2): 62-68 (in Chinese)
- [8] 王蕊, 陈明, 陈楠, 等. 基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比: 以龙岩市适中镇为例[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4348-4359
Wang R, Chen M, Chen N, et al. Comparison of ecological risk assessment based on the total amount and speciation distribution of heavy metals in soil: A case study for Longyan City, Fujian Province [J]. Environmental Science, 2017, 38(10): 4348-4359 (in Chinese)
- [9] 王美娥, 丁寿康, 郭观林, 等. 污染场地土壤生态风险评估研究进展[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3946-3958
Wang M E, Ding S K, Guo G L, et al. Advances in ecological risk assessment of soil in contaminated sites [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(11): 3946-3958 (in Chinese)
- [10] National Research Council. Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process [M]. Washington DC: National Academies Press, 1983: 1-205
- [11] Epa U U. Guidelines for exposure assessment [J]. Risk Assessment Forum, 1992, 57(104): 22888-22938
- [12] United States Environmental Protection Agency (US EPA). A Framework for Assessing Health Risks of Environmental Exposures to Children [R]. Washington DC: US EPA, 2006
- [13] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Exposure Factors Handbook [R]. Washington DC: US EPA, 1997
- [14] 李志博, 骆永明, 宋静, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究 II·污染土壤的健康风险评估[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 142-151
Li Z B, Luo Y M, Song J, et al. Study on soil environmental quality guidelines and standards II. Health risk assessment of polluted soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(1): 142-151 (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国生态环境部. 《环境健康风险评估技术指南总纲(征求意见稿)》编制说明[S]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2018
- [16] International Association for Testing Materials (ASTM International). Standard Guide for Risk-Based Corrective Action [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2000
- [17] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS): Part A: Human health evaluation manual [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, US EPA, 1989
- [18] United States Hazardous Site Control Division, United States Environmental Protection Agency (US EPA). Soil Screening Guidance: User's Guide [M]. Washington DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, US EPA, 1996: 1-92
- [19] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Draft guidance for evaluating the vapor intrusion to indoor air pathway from groundwater and soils (subsurface vapor intrusion guidance) [J]. Federal Register, 2002, 67(230): 71169-71172
- [20] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS): Part B: Development of risk-based preliminary remediation goals [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, US EPA, 1991
- [21] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS): Part C: Risk-evaluation of remedial alternatives [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, US EPA, 1991
- [22] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS): Part D: Standardized planning, reporting, and review of superfund risk assessments [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, US EPA, 2001
- [23] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS): Part E: Supplemental guidance for dermal risk assessment [R]. Washington DC: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, US EPA, 2004
- [24] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS): Part F: Supplemental guidance for inhalation risk assess-

- ment [R]. Washington DC: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, US EPA, 2009
- [25] Martin I, Cowie C. Compilation of data for priority organic pollutants for derivation of soil guideline values [R]. London: Environment Agency, 2008
- [26] Hosford M. Human Health Toxicological Assessment of Contaminants in Soil [M]. London: Environment Agency, 2009: 1-79
- [27] Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA) and Environment Agency (EA). The Contaminated Land Exposure Assessment (CLEA) Model: Technical Basis and Algorithms [M]. R&D Publication CLR, 2002: 1-200
- [28] Canadian Council of Ministers of the Environment, Subcommittee on Environmental Quality Criteria for Contaminated Sites. A protocol for the derivation of environmental and human health soil quality guidelines [R]. Ottawa: Canadian Council of Ministers of the Environment, 1996
- [29] 陈梦舫, 韩璐, 罗飞. 污染场地土壤与地下水风险评估方法学[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 5-10
- [30] Piet O, Lijzen J, Swartjes F, et al. Evaluation and revision of the CSOIL parameter set. Proposed parameter set for human exposure modelling and deriving Intervention Values for the first series of compounds [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), 2001
- [31] D'Aprile L, Tatàno F, Musmeci L. Development of quality objectives for contaminated sites: State of the art and new perspectives [J]. International Journal of Environment and Health, 2007, 1(1): 120-141
- [32] 骆永明, 夏家洪, 章海波, 等. 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: 13-20
- [33] American Society for Testing and Materials. Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites [S]. Washington DC: American Society for Testing and Materials, 1995
- [34] American Society for Testing and Materials. Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites [M]. Washington DC: American Society for Testing and Materials, 1995: 1-200
- [35] 北京市生态环境局. 建设用地土壤污染状况调查与风险评估技术导则: DB11/T 656—2019[S]. 北京: 北京市市场监督管理局, 2019
- [36] 北京市生态环境局. 场地土壤环境风险评价筛选值: DB11/T 811—2011[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2011
- [37] 上海市环境保护局. 上海市污染场地风险评估技术规范[S]. 上海: 上海市环境保护局, 2014
- [38] 上海市环境保护局. 上海市场地土壤环境健康风险评估筛选值(试行)[S]. 上海: 上海市环境保护局, 2015
- [39] 重庆市环境保护局. 重庆场地环境调查与风险评估技术导则: DB50/T 725—2016[S]. 重庆: 重庆市质量技术监督局, 2016
- [40] 浙江省生态环境厅. 污染场地风险评估技术导则(征求意见稿): DB33/T [S]. 杭州: 浙江省市场监督管理局, 2019
- [41] 林晓峰, 蔡兆亮, 胡恭任. 土壤重金属污染生态风险评价方法研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2010, 27(8): 749-751
- Lin X F, Cai Z L, Hu G R. Research progress on ecological risk assessment methods for heavy metal contamination in soil [J]. Journal of Environment and Health, 2010, 27(8): 749-751 (in Chinese)
- [42] 李春平, 张峰, 马烈. 污染场地风险评估技术方法比较分析[J]. 中国资源综合利用, 2015, 33(7): 47-52
- Li C P, Zhang F, Ma L. Comparative analysis of risk assessment technical methods for contaminated sites in China [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2015, 33(7): 47-52 (in Chinese)
- [43] 中华人民共和国生态环境部. 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)(征求意见稿)编制说明[S]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2018
- [44] 刘德成, 李玉倩, 郑纯静, 等. 土壤重金属污染风险评价方法对比研究[J]. 河北农业科学, 2020, 24(4): 89-95
- Liu D C, Li Y Q, Zheng C J, et al. Comparative study on risk assessment methods of heavy metal pollution in soil [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2020, 24(4): 89-95 (in Chinese)
- [45] 中华人民共和国国土资源部, 中华人民共和国水利部. 地下水质量标准: GB/T14848[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国国家标准化管理委员会, 2017
- [46] 广东省环境保护厅. 土壤重金属风险评价筛选值 珠江三角洲[S]. 广州: 广东省质量技术监督局, 2014
- [47] 重庆市环境保护局. 场地土壤环境风险评估筛选值[S]. 重庆: 重庆市质量技术监督局, 2016
- [48] 香港环境保护署. 按风险厘定的土壤污染整治标准的使用指引[S]. 香港: 香港环境保护署, 2007
- [49] 辽宁省生态环境厅. 辽宁省污染场地风险评估筛选值[S]. 沈阳: 辽宁省市场监督管理局, 辽宁省生态环境厅, 2019
- [50] 深圳市生态环境局. 深圳市建设用地土壤污染风险筛选值和管制值(试行)[S]. 深圳: 深圳市市场监督管理局, 2020
- [51] 澳门环境保护局. 土地污染评估指引[S]. 澳门: 澳门环

- 境保护局, 2019
- [52] 肖庆文. 蒸气入侵国内外研究现状与展望[J]. 环境科技, 2018, 31(2): 74-78
- Xiao Q W. Research advances in vapor intrusion of contaminated sites [J]. Environmental Science and Technology, 2018, 31(2): 74-78 (in Chinese)
- [53] 马杰. 污染场地 VOCs 蒸气入侵风险评估与管控[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 210-250
- [54] Johnson P C, Ettinger R A. Heuristic model for predicting the intrusion rate of contaminant vapors into buildings [J]. Environmental Science & Technology, 1991, 25(8): 1445-1452
- [55] DeVaul G E. Indoor vapor intrusion with oxygen-limited biodegradation for a subsurface gasoline source [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(9): 3241-3248
- [56] Jury W A, Russo D, Streile G, et al. Evaluation of volatilization by organic chemicals residing below the soil surface [J]. Water Resources Research, 1990, 26(1): 13-20
- [57] Little J C, Daisey J M, Nazaroff W W. Transport of subsurface contaminants into buildings [J]. Environmental Science & Technology, 1992, 26(11): 2058-2066
- [58] Van den Berg R. Human exposure to soil contamination: A qualitative and quantitative analysis towards proposals for human toxicological intervention values (partly revised edition) [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), 1994
- [59] Waitz M F W, Freijer J I, Kreule P, et al. The VOLASOIL risk assessment model based on CSOIL for soils contaminated with volatile compounds [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), 1996
- [60] Provoost J, Bosman A, Reijnders L, et al. Vapour intrusion from the vadose zone—Seven algorithms compared [J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, 10(3): 473-483
- [61] Ferguson C C, Krylov V V, McGrath P T. Contamination of indoor air by toxic soil vapours: A screening risk assessment model [J]. Building and Environment, 1995, 30(3): 375-383
- [62] De Abreu L D V. A transient three dimensional numerical model to simulate vapor intrusion into buildings [D]. Phoenix: Arizona State University, 2005: 1-517
- [63] Pennell K G, Bozkurt O, Suuberg E M. Development and application of a three-dimensional finite element vapor intrusion model [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2009, 59(4): 447-460
- [64] Yao Y J, Verginelli I, Suuberg E M. A two-dimensional analytical model of petroleum vapor intrusion [J]. Water Resources Research, 2016, 52(2): 1528-1539
- [65] Yao Y J, Verginelli I, Suuberg E M. A two-dimensional analytical model of vapor intrusion involving vertical heterogeneity [J]. Water Resources Research, 2017, 53(5): 4499-4513
- [66] Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). Canada-wide standard for petroleum hydrocarbons (PHC) in soil [S]. Ottawa: CCME, 2008
- [67] Feniak N A, Sigal E A, Miller P A, et al. Development of a health-based total petroleum hydrocarbon (TPH) method [R]. Washington DC: Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 1995
- [68] Park I S, Park J W. A novel total petroleum hydrocarbon fractionation strategy for human health risk assessment for petroleum hydrocarbon-contaminated site management [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 179(1-3): 1128-1135
- [69] Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group (TPHCWG). Human health risk based evaluation of petroleum release sites: Implementing the working group approach [R]. Amherst: Amherst Scientific Publishers, 1999
- [70] Ascary K, Pollard S. The UK approach for evaluating human health risks from petroleum hydrocarbons in soils, Science Report P5-080/TR3 [R]. London: Environment Agency, 2005
- [71] 杜红花. 基于居住用地规划室内蒸汽入侵模型修正的污染场地健康风险评估研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2019: 57-59
- Du H H. Health risk assessment of contaminated sites based on modification of indoor vapor invasion model in residential land planning [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2019: 57-59 (in Chinese)
- [72] 毛芳. 基于数值模型研究污染源类型、土壤质地和毛细管作用对石油烃蒸气入侵风险评估的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 53-55
- Mao F. Investigating the influence of source type, soil texture and capillary fringe in petroleum vapor intrusion risk assessment based on numerical model [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019: 53-55 (in Chinese)
- [73] 王北洪, 马智宏, 付伟利. 密封高压消解罐消解-原子吸收光谱法测定土壤重金属[J]. 农业工程学报, 2008, 24(S2): 255-259
- Wang B H, Ma Z H, Fu W L. Determination of heavy metal in soil by high pressure sealed vessels assisted digestion-atomic absorption spectrometry [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(S2): 255-259 (in Chinese)
- [74] 张玉, 熊杰, 唐翠梅, 等. 某污染场地土壤重金属生物可给性及其对修复目标的影响研究[J]. 中国氯碱,

- 2019(6): 41-47
- Zhang Y, Xiong J, Tang C M, et al. Bioaccessibility of heavy metals in soil of a contaminated site and its impact on determination of clean-up levels [J]. *China Chlor-Alkali*, 2019(6): 41-47 (in Chinese)
- [75] 陈奕. 基于生物可给性分析工业场地土壤重金属污染的人体健康风险[J]. *生态毒理学报*, 2020, 15(5): 319-326
- Chen Y. Bioaccessibility and human health risk assessment of heavy metals in industrial sites [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, 15(5): 319-326 (in Chinese)
- [76] 王波, 邵迪初, 项张华, 等. 基于 IEUBK 模型研究环境铅对婴儿血铅的影响[J]. *卫生研究*, 2011, 40(4): 478-480
- Wang B, Shao D C, Xiang Z H, et al. Contribution of environmental lead exposure to blood lead level among infants based on IEUBK model [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2011, 40(4): 478-480 (in Chinese)
- [77] 徐松. IEUBK 模型结合流行病学调查的儿童环境铅暴露健康风险评估研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010: 1-5
- [78] 李灿, 曾云, 刘淑运, 等. 基于儿童和成人血铅模型的土壤环境铅基准值研究[J]. *环境与健康杂志*, 2017, 34(9): 789-793
- Li C, Zeng Y, Liu S Y, et al. Lead benchmarks for soils based on blood lead model for children and adult in China [J]. *Journal of Environment and Health*, 2017, 34(9): 789-793 (in Chinese)
- [79] 杨珂玲, 张宏志, 张志刚, 等. 铅暴露的环境健康风险评估模型的本土化研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(2): 163-169
- Yang K L, Zhang H Z, Zhang Z G, et al. Localization study of environmental health risk assessment model for lead exposure [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(2): 163-169 (in Chinese)
- [80] 刘爽. 地质高背景区重金属污染农田质量评价及分区管控研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020: 39-45
- Liu S. Research on quality evaluation and zoning management of heavy metal contaminated farmland in high geological background area [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020: 39-45 (in Chinese) ◆