

土壤污染风险评价研究进展

王立婷, 刘仁志*

(北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

【摘要】 随着工业化和城镇化快速发展, 土壤污染带来的人体健康和生态风险日益凸显。本文针对我国土壤污染环境风险评价体系在风险管控中的缺失问题, 系统总结了国内外土壤污染的风险研究发展成果, 按照土壤污染的人体健康风险和生态风险, 分别进行评价方法、评价标准和管理实践的总结与评述。文章着重指出: 土壤污染风险评价在生态系统水平及区域流域尺度上缺失, 评价方法未能与污染物存在形态完全匹配, 评价指标还不能覆盖大部分重金属和有机物, 健康风险与生态风险还没有实现综合评价。

【关键词】 土壤污染; 健康风险; 生态风险; 评价方法

【中图分类号】 X53; X820.4

【文献标识码】 A

【文章编号】 1674-6252(2020)02-0062-07

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2020.02.062

引言

土壤是生态系统的重要组成部分, 也是人类赖以生存的物质基础^[1]。随着我国城镇现代化、工业化进程的不断加快, 大量有毒、有害物质通过污水灌溉、大气沉降等多种方式进入土壤, 造成土壤结构和功能恶化, 给土壤生态环境、人体健康带来多种潜在风险^[2,3]。土壤污染已经成为全世界面临的难题^[4,5]。2014年《全国土壤污染状况调查公报》显示, 中国土壤总点位超标率16.1%, 其中耕地点位超标率是19.4%, 污染类型以重金属超标为主。

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^[6-8], 土壤环境风险评价是其重要组成部分。西方发达国家对污染土壤的风险评估做了大量工作, 目前已取得显著成就^[9]。土壤污染风险评价大致可分为健康风险评价和生态风险评价两大类^[6]。其中, 健康风险评价是把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^[10], 目前其理论框架与方法相对成熟, 已应用于我国建设用地风险管理实践^[11]。生态风险评价是指对生态系统中生物受人为活动影响效应大小的评价^[12], 美国最先将其引入土壤污染的评价研究中^[13]。由于土壤污染的隐蔽性和缓发性, 我国专门讨论土壤环境风险的研究相对较少, 近年才将土壤环境风险作为建设项目、区域开发和管理决策的重要组成

部分^[14]。因此, 评述土壤污染风险评价进展与内容, 识别我国土壤环境风险评价问题, 展望其发展趋势, 对于推进我国污染土壤风险评价具有重要指导意义。

1 土壤污染的健康风险评价研究进展

1.1 土壤污染的健康风险评价概况

1996年, 美国环保局(The U.S. Environmental Protection Agency, USEPA)发布了旨在保护人体健康的污染场地筛选值导则, 考虑不同土地利用方式下人体对土壤污染物的不同暴露途径和暴露参数, 结合人体的毒性临界值, 阐述了制定特定污染场地土壤污染筛选值(Soil Screening Levels, SSLs)的方法^[15]。随后, 美国环保局颁布了诸多技术性指南, 如《健康风险评估导则》《暴露风险评估指南》《暴露因子手册》《超级基金场地健康风险评估手册》等^[16], 并对典型污染场地开始了健康风险评价和治理工作。欧盟于1996年完成污染场地风险评价协商行动指南, 欧洲环境署(The 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^[17]。加拿大环境部(Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME)1996年在考虑生态物种和人体健康保护的基础上, 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^[18], 并于2001年初步制定了土壤中石油烃的相关标准^[19]。澳大利亚环境

资助项目: 国家自然科学基金项目(41271514)。

第一作者: 王立婷(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为环境风险管理, E-mail: 201821180087@mail.bnu.edu.cn。

*** 责任作者:** 刘仁志(1974—), 男, 副教授, 博士生导师, 研究方向为环境规划与管理, E-mail: liurenzhi@bnu.edu.cn。

保护委员会制定了基于人体健康的调查级别 (Health-based Investigation Levels, HILs) 和基于生态的调查级别 (Ecologically-based Investigation Levels, EILs) [20]。英国环境署 (Environment Agency, EA) 2002 年 [21] 制定了基于不同土地利用类型下人体健康暴露风险的土壤质量指导值。此外, 日本 [22]、越南 [23]、丹麦 [24] 也都相继制定了基于人体的健康暴露风险评估的土壤质量保护值。总体而言, 土壤污染健康风险评价的理论框架体系已经基本完善, 并逐步纳入风险评价实践中。但其评价结果主要以定性或半定量为主, 加之风险自身的不确定性, 往往使得风险评价结果过高或过低, 不利于指导风险管控。

1.2 土壤污染的健康风险评价方法研究

土壤污染健康风险评价过程中应用的模型主要分为两大类, 一类是风险管理模型, 一类是不确定性模型 [25]。

1.2.1 风险管理模型

污染物进入土壤后, 可能通过呼吸、直接摄入、皮肤吸收、饮水、沐浴以及食物链等暴露途径造成人体健康风险, 其中食物链是土壤健康风险评价中关注的重点暴露途径 [26]。20 世纪 90 年代中期, 污染物从土壤向地下水的迁移、挥发性有机物的扩散暴露以及皮肤的吸收作用引起关注 [27,28]。其中皮肤吸收系数和复合污染的拮抗或协同作用给人体健康的风险评估带来不确定性 [29,30]。随后, 很多风险管理模型被开发出来, 通过简化特定场地参数、暴露情景参数和生态毒理参数, 使得评价程序较为简单方便, 在世界各国风险评价中得到了广泛的应用。风险评价的综合管理模型包含很多模块, 如污染物传输模块、暴露模块、风险计算模块等 [25]。

荷兰构建 CSOIL (Contaminated Soil) 模型对污染土壤进行风险评价, 并在此基础上推导和拟定出土壤污染标准值 [31]。荷兰 Van Hall 研究所开发出的 RISC-Human 模型可以建立不同土地利用类型和不同暴露途径与风险水平之间的关系 [25]。英国环保署采用 CLEA (Contaminated Land Exposure Assessment) 模型对污染土壤的人体健康进行风险评价, 以此来制定土壤污染标准 [32]。此外还有丹麦的 CETOX 模型、德国的 UMS 模型、欧盟的 EUSES 模型以及美国 RBCA (Risk-Based Corrective Action) 模型等。在 USEPA 超级基金计划风险评估指南中, CalTOX 模型作为一种多介质暴露模型用于计算暴露剂量和 risk 的大小 [33,34], 也可以用来计算一定健康风险水平下土壤污染程度的控制范围 [35]。

不同的风险管理模型均具有各自的适宜性。

RBCA 与 CLEA 模型在基本原理和算法上有很多共同之处, 比如需要输入的基本参数相同, 包括场地参数、污染物的毒理学参数和暴露情景参数等, 也都考虑到类似的暴露途径, 但是后者仅考虑了表层土壤污染源, 前者则深入开发了深层土壤和地下水迁移模块; RBCA 模型是确定性分析, CLEA 模型中在参数值输入上进行了正态分布处理 [36]。CalTOX 模型输入的参数则包含各参数的平均值和变异系数, 可以直接在模型中进行敏感性和不确定性分析 [37]。CSOIL 模型虽与 RBCA 模型概念相似, 但其考虑的土地利用类型多达 7 种 [38], 而后者只考虑工业与商贸用地、农业用地和居住用地三种; 并且前者详细地分不同年龄段分别计算不同环境的暴露情况; 两者采用的挥发模型也不相同, 分别为 Volasoil 模型和 Johnson & Ettinger 模型 [39]。已有学者分别采用上述模型对土壤污染的健康风险进行了探讨 [40-44]。

管理模型通过简化输入参数提高了土壤污染健康风险评价的可操作性, 但也增大了计算误差, 难以准确地描述实际风险状况。比如农作物对土壤重金属的吸收值、人体对于农产品的吸收量等, 多选取一般性的均值, 还难以准确选取针对性强的局地参数; 又比如污染物在多介质中的迁移暴露、多种污染物的联合暴露、土壤中有有机物的挥发以及通过皮肤吸收暴露等过程, 由于缺乏内在机理研究, 其暴露计算往往采用经验值简化处理。此外, 管理模型尽管通过对不同土地利用方式下的暴露途径和敏感人群设定不同的参数标准, 但评价结果多为单一的定性或半定量描述, 未能对评价过程、结果进行不确定性分析与表述。

1.2.2 不确定性模型

当前主要的不确定性模型包括随机模拟模型和模糊理论模型 [25]。随机模拟模型中较为常见的是美国环保局推荐使用的蒙特卡罗模拟 (Monte Carlo Simulation) [45-47], 该模型可以对风险评价结果进行不确定性分析, 并对各种影响因子进行敏感性分析, 进而确定敏感性变量。比如 Batchelor 等利用随机模型对污染场地的多氯联苯风险进行评估 [48]; McKonel 采用蒙特卡罗模型分析了污染土壤通过食物链对农民造成的健康风险, 并强调具体场地要根据实际用途进行评价才能更好地减少模型带来的不确定性 [49]; Price 等人采用蒙特卡罗模型对 TCDD 对人体造成的健康风险进行了评价 [50]; Teresa 等采用蒙特卡罗模型与其他模型相结合的方法分析了有机物在地下水中的健康风险, 从而大大提高了风险评价的准确性 [51]。基于模糊

理论的不确定性风险分析模型可以反映预测过程中的不确定性,但是无法确定风险的概率分布^[51],比如Chen等在模糊理论模型的基础上对石油污染场地进行的风险评估和非致癌风险预测^[52]。不确定性模型尤其是蒙特卡罗模型,实现了对土壤污染健康风险评价过程和结果的不确定性分析,进而提高了风险评价的准确性。但相比不确定性分析,在评价过程中通过参数厘定、暴露准确计算等方式减少风险评价的不确定性因素更为重要。

2 土壤污染的生态风险评价研究进展

2.1 土壤污染的生态风险评价概况

美国的生态风险评价是在健康风险评价的基础上发展起来的^[53]。美国环保局于1996年基于污染土壤评估方法确定了土壤筛选值的技术导则^[54],并于1998年颁布了《生态风险评价指南》;随后于2001年针对土壤筛选值的技术导则发布了补充性文件,完善了不同土地利用方式下的筛选值确定方法;2003年正式颁布了旨在保护生态环境的土壤生态筛选导则(Ecological-Soil Screening Guidance, Eco-SSG)^[55],美国各州相继制定土壤质量指导值。荷兰的房屋、自然规划和环境部于1989年提出生态风险管理框架,核心在于利用阈值来判断特定风险的接受程度^[56];并从1994年开始展开污染土壤相关的生态风险评价技术方法研究以便指导土壤基准值的制定^[57]。英国环境署于1995年建立以“预防为主”的风险评价与管理的可持续发展战略,在2002年发布了《污染土地管理的模型评估方法》并于2009年对其进行修订,最终确立了污染土壤生态风险评估的技术方法^[58]。此外,加拿大环境部^[59]和澳大利亚国家环保委员会等也都对污染土壤的生态风险评估制定了一系列技术和方法的规范。为了提高风险评价的效率,世界卫生组织国际化学安全计划、美国环保局、欧洲委员会、经济合作与发展组织提出了要建立综合健康和生态风险的评价框架^[60]。总体上,土壤污染的生态风险评估方法体系已经基本建立起来,但对生物的暴露和效应评估仍存在过程简化、参数不精确等问题,相关研究仍在不断推进中。比如随着分子生物学的不断探索,生态毒理学研究也从高等植物、无脊椎动物和微生物的试验逐渐过渡到生物标记物^[70],着重利用分子标记技术分析土壤污染暴露生物的遗传代谢。

2.2 土壤污染的生态风险评价方法研究

目前土壤污染生态风险评价方法主要分为三类:传统评价模型、综合评价模型和外推评价模型^[14,61]。其中传统评价模型主要是以指数法为基础,将土壤污染的程度用无量纲界限加以划分,如商值法和潜在危害指数法。商值法(Hazard Quotient, HQ)中的商值由生物可利用部分的暴露量(ADD)除以效应浓度(美国环保署提供的标准值, RfD)获得,并将所得结果与“1”比较从而进行评价,但是这种半定量方法不具有预测未来风险的能力^[62,63]。潜在危害指数法(the potential ecological risk index, RI)由瑞典科学家 Hakanson 在1980年建立,根据重金属的性质及环境行为,从沉积学的角度评价重金属污染程度及其生态危害^[64]。虽然这种方法针对沉积物污染,但近年也逐渐用于土壤重金属污染的生态风险评价^[65,66]。传统评价方法操作简便,但权重确定主观性较强,获得的商值或指数值都是确定性结果,并不能准确反映风险的不确定性本质。

综合评价模型是通过总结观测或实验数据、考虑土壤污染的模糊性和各污染因素的权重、采用数学统计方法建立起来的预测模型,包括模糊综合评价法^[67]、灰色聚类法^[68]、层次分析法^[69]、主成分分析法和物元分析法等。这些方法主要针对传统评价模型在不确定性表达上的局限以及权重确定中的主观性进行改进,比如尝试用模糊数学模型来解决土壤或沉积物中重金属的污染评价问题^[70,71],又比如将灰色聚类模型或层次分析法引入土壤污染生态风险评价^[72-75]等等。然而,综合评价模型并不能清楚反映风险形成机理和影响因素,因此评价结果很难说服管理者用于指导风险管控实践。

外推评价模型主要是指利用污染物对特定物种的暴露—效应数据,通过统计学等手段外推获取对其他物种的暴露—效应数据进而进行评价的模型。近年来随着计算机技术的发展,统计学逐渐被引入到土壤污染评价中^[76-78],这是因为受到人力、物力的限制,土壤污染物毒性暴露效应实验还不能大量提供陆地生态系统的生态毒理学数据,并且基于实验室中有限物种生态毒理学试验外推到整个生态系统同样面临很多困难^[79]。在这种背景下,统计学效应外推模型得到了大量应用,比如利用物种敏感曲线(SSD)推算土壤中受暴露影响的物种比例^[80,81],其他推算模型还包括专家模型和机理模型等,但将其运用到土壤的生态系统风险评价中尚需时日。

3 我国土壤环境风险评价现状

20世纪90年代,我国对于健康风险评价的研究

才刚刚起步,并且主要集中于介绍和引用国外的研究成果。胡二邦等详细地介绍了土壤健康风险评估的技术和方法^[82];原环境保护总局于1999年颁布了《工业企业土壤环境质量风险评价基准》,用于指导对工业企业生产给土壤造成的污染进行风险评价^[83];部分学者对土壤污染健康风险评价的环境质量指导值与标准进行了研究,指出不同土地利用类型的污染对人群的暴露途径不尽相同,其中农田污染主要通过食物链危害人体健康,利用土壤与农作物之间污染物含量关系的模型可以推算出土壤污染物含量的临界值^[25];其他研究更多地是针对一定地域范围开展土壤污染的人群健康风险评价实践^[84-87]。原环境保护部于2014年颁布了第一部适应我国人群和污染情况的健康风险评价导则——《污染场地风险评估技术导则》,主要沿用了国外提出的健康风险评价模型,该导则指导了大量的污染土壤健康风险评价工作。后来生态环境部对该导则进行修正,2018年和2019年先后编制了《建设用地土壤污染风险管控标准》和《建设用地土壤污染风险评估技术导则》,为建设用地土壤污染带来的健康风险提供了官方的管控标准和评估技术。这套技术文件考虑的土壤污染物种类、毒性和理化参数更为齐全,暴露途径全面,但计算过程复杂,目前主要针对小尺度的建设用地地块进行健康风险评价,还不能便捷地适用于中、大尺度的建设用地健康风险评价。

相比健康风险,我国的生态风险评价起步更晚,而且主要集中在水生生态风险评价和区域生态风险评价。生态环境部至今还没有发布土壤污染生态风险评价的技术性文件,但在2018年颁布了《农用地土壤污染风险管控标准》,主要涉及的污染物指标包括8种重金属和2种有机氯农药,以保护农产品质量安全为主要目标,分别推导了农产品质量安全、农作物生长、土壤微生物的土壤污染物阈值,对耕地、园地和草地的土壤污染筛选值和管制值进行了规定。已有研究广泛探讨了土壤污染生态风险评估方法,比如采用概率风险评价方法对天津污灌区的多环芳烃进行生态风险评估^[88,89],以及对长江三角洲某地块土壤的复合型重金属污染进行评价^[90]。也有学者针对综合评价模型中的评价因子权重进行修正,试图更全面地反映土壤污染物的浓度水平和毒性作用^[70]。部分学者通过开展土壤污染生态风险评估,从土壤生态保护角度反推出了土壤环境质量的指导值与标准^[91]。这些研究侧重于重金属对场地的生态风险评价,包括利用潜在生态指数法对城市污染地区的土壤重金属的潜在生态风险进行分级评估^[92-95],利用生态风险分析开展对农田土

壤的肥力评价^[96]。值得注意的是,基于污染土壤重金属总量的风险评价方法往往会过高估计其潜在风险危害程度,因为残渣态的重金属一般情况下是不能被利用的,为此有学者提出了新的土壤重金属污染生态风险评价指标和方法^[97,98],更有学者将研究转向了土壤重金属污染的生物可利用性,以实际的暴露量为基础,计算污染物的生态风险值^[99-101]。可见,对农用地污染更侧重评估生态风险,尤其是对农产品和农作物的风险,这些污染土壤的生态风险评估还没有形成技术文件,也未能涵盖土壤中的更多生物,同样也较难适用于中、大尺度的风险评估。

4 总结与展望

(1) 鉴于以保护人类为最终目的的宗旨和生态毒理学数据的缺乏,土壤污染风险重点主要是人体健康和农产品安全。一些实验也是对某些生物个体或者种群水平的暴露—效应进行毒理学和可利用性实验,并没有扩展到群落或者生态系统的水平上进行风险评价研究,其中包括生态系统评价终点的选择问题、生态效应的评价问题;我国暂时也没有制定与土壤污染生态风险相关的完善、统一的评估方法与程序。未来应加强和完善生态毒理学资料,发展相应的土壤污染物迁移、暴露—效应评价模型,结合典型的土地利用方式,构建基于用地方式的多污染源在生态系统层次上的土壤风险评价,并编制我国土壤污染的生态风险评估技术导则。结合已有土壤污染健康风险导则,逐步建立全国范围内的土壤环境质量限值。

(2) 土壤污染风险评价中缺乏与污染物存在形态相匹配的评价方法与标准,已颁布的导则和技术指南多是基于污染物总量对污染场地进行风险评价,众多的研究案例集中在土壤污染水平评价和风险指数计算上。实际上要精确评价土壤污染风险,应对污染物的不同形态进行人体可给性和生物可利用性实验,明确他们在土壤介质中的迁移、食物链中的转化以及人体(生物)中的消化吸收过程,制定更为合理的评价方法和标准^[95]。

(3) 由于土壤污染具有不均匀性和空间异质性,以采样点本身很难准确反映区域土壤污染整体风险水平,所以研究对象多是部分监测点位和小范围污染场地,在区域和流域范围的土壤污染风险评价方法相对缺乏。未来应在全国范围土壤污染调查基础上,建立更加完整的基础数据库和科学的区域土壤污染风险评价模型,实现大尺度的土壤污染风险评估,从而为区域规划建设和全国土壤风险管控提供决策依据。

(4) 目前土壤污染风险评估导则关注的污染物相对较少。未来应逐步增加污染土壤监测项目指标, 关注更多的重金属和有机物的毒性效应和致癌机理, 结合环境医学和流行病学更好地完善复合污染物行为学, 以期有效指导土壤污染风险评估工作。

(5) 在土壤污染的风险评价体系中, 健康风险与生态风险相对独立存在, 由于评价终点和评价出发点的不同, 得出的结论往往不利于环境决策与管理。结合国际组织对于健康风险和生态风险合二为一框架的研究, 我国应该逐步建立统筹人体健康因素和生态系统因素的土壤污染风险评估方法, 提高土壤污染风险管理的有效性。

参考文献

- [1] 陈晶中, 陈杰, 谢学俭, 等. 土壤污染及其环境效应 [J]. 土壤, 2003, 35(4): 298-303.
- [2] 钟政林, 曾光明, 杨春平. 环境风险评估研究进展 [J]. 环境科学进展, 1996, 4(6): 17-21.
- [3] 李东艳, FRANCOIS M, 任玉芬, 等. 重金属污染土壤萃取方法选择及参数优化 [J]. 地学前缘, 2005, 12(S1): 189-192.
- [4] 姚保垒. 突发重金属污染事故的环境风险研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
- [5] 朱永官, 陈保冬, 林爱军, 等. 珠江三角洲地区土壤重金属污染控制与修复研究的若干思考 [J]. 环境科学学报, 2005, 25(12): 1575-1579.
- [6] WEEKS J M, COMBER S D W. Ecological risk assessment of contaminated soil[J]. Mineralogical magazine, 2005, 69(5): 601-613.
- [7] CARLON C, CRITTO A, MARCOMINI A, et al. Risk based characterisation of contaminated industrial site using multivariate and geostatistical tools[J]. Environmental pollution, 2001, 111(3): 417-427.
- [8] CRITTO A, TORRESAN S, SEMENZIN E, et al. Development of a site-specific ecological risk assessment for contaminated sites: Part I. A multi-criteria based system for the selection of ecotoxicological tests and ecological observations[J]. Science of the total environment, 2007, 379(1): 16-33.
- [9] 高瑞英. 土壤重金属污染环境风险评估方法研究进展 [J]. 科技管理研究, 2012, 32(8): 45-50.
- [10] National Research Council. Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process-Committee on the Institutional Means for Assessment of Risks to Public Health, Commission on Life Sciences, National Research Council[M]. Washington DC: National Academy Press, 1983.
- [11] European Environment Agency. Environmental Risk Assessment-Approaches, Experiences and Information Sources[R]. London: European Environment Agency, 1999.
- [12] 毛小苓, 倪晋仁. 生态风险评估研究述评 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2005, 41(4): 646-654.
- [13] USEPA. Framework for Ecological Risk Assessment[R]. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 1992.
- [14] 林晓峰, 蔡兆亮, 胡恭任. 土壤重金属污染生态风险评估方法研究进展 [J]. 环境与健康杂志, 2010, 27(8): 749-751.
- [15] USEPA. Soil Screening Guidance: User's Guide[M]. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 1996.
- [16] USEPA. An Examination of EPA Risk Assessment Principles and Practices[R]. Washington, DC: EPA, 2004.
- [17] European Environment Agency. Environmental Risk Assessment-Approaches, Experiences and Information Sources[R]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1998.
- [18] Canadian Council of Ministers of the Environment. A Protocol for the Derivation of Environmental and Human Health Soil Quality Guidelines[Z]. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 1996.
- [19] Canadian Council of Ministers of the Environment. Wide standards for petroleum hydrocarbons in soil[S]. Manitoba, Canada: CCME, 2001.
- [20] National Environmental Protection Council. Schedule B (1) Guideline on the Investigation Levels for Soil and Groundwater[Z]. National Environment Protection (Assessment of Site Contamination). Canberra, 1999.
- [21] POLLARD S J, YEARSLEY R, REYNARD N, et al. Current directions in the practice of environmental risk assessment in the United Kingdom [J]. Environmental science & technology, 2002, 36(4): 530-538.
- [22] Japanese Ministry of the Environment. Environmental Quality Standards for Soil Pollution[R]. Tokyo: Japanese Ministry of the Environment, 1994.
- [23] Directorate for Standards and Quality. TCVN5941-1995 Soil quality: maximum allowable limits of pesticide residues in the soils[S]. Vietnam: Directorate for Standards and Quality, 1995.
- [24] DEPA (Danish Environmental Protection Agency). Guidelines on Remediation of Contaminated Sites[R]. Copenhagen: Danish Ministry of the Environment, 2002.
- [25] 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.
- [26] KULHÁNEK A, TRAPP S, SISMILICH M, et al. Crop-specific human exposure assessment for polycyclic aromatic hydrocarbons in Czech soils[J]. Science of the total environment, 2005, 339(1-3): 71-80.
- [27] 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.
- [28] WALTZ 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]. RIVM, Bilthoven, Netherlands: RIVM, 1996.
- [29] KISSEL J C, RICHTER K Y, FENSKE R A, et al. Field measurement of dermal soil loading attributable to various activities: Implications for exposure assessment[J]. Risk analysis, 1996, 16(1): 115-125.
- [30] KISSEL J C, SHIRAI J H, RICHTER K Y, et al. Investigation of dermal contact with soil in controlled Trials[J]. Journal of soil contamination, 1998, 7(6): 737-752.
- [31] OTTE P F, LIJZEN J P A, OTTE J G, et al. Evaluation and Revision of the CSOIL Parameter Set[R]. The Netherlands: RIVM, 2001.
- [32] The Environment Agency. The Contaminated Land Exposure Assessment (CLEA) Model: Technical Basis and

- Algorithms[R]. London: DEFRA (Department of Environment, Food and Rural Affairs), 2002.
- [33] MCKONE. CalTOX, A Multimedia Total Exposure Model for Hazardous-waste Sites[R]. Sacramento, California: California Environmental Protection Agency, 1993.
- [34] EISENBERG J N S, MCKONE T E. Decision tree method for the classification of chemical pollutants: incorporation of across-chemical variability and within-chemical uncertainty[J]. *Environmental science & technology*, 1998, 32(21): 3396-3404.
- [35] HERTWICH E G, MATELES S F, Pease W S, et al. Human toxicity potentials for life-cycle assessment and toxics release inventory risk screening[J]. *Environmental toxicology and chemistry*, 2001, 20(4): 928-939.
- [36] 施烈焰, 曹云者, 张景来, 等. RBCA 和 CLEA 模型在某重金属污染场地环境风险评价中的应用比较 [J]. *环境科学研究*, 2009, 22(2): 241-247.
- [37] 贾晓洋, 姜林, 夏天翔, 等. RBCA、CLEA 及 CalTOX 模型在苯并 [a] 芘污染场地健康风险评估中的应用比较 [J]. *生态毒理学学报*, 2012, 7(3): 277-284.
- [38] 吴以中, 唐小亮, 葛滢, 等. RBCA 和 Csoil 模型在挥发性有机物污染场地健康风险评价中的应用比较 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(12): 2458-2466.
- [39] 1,2-Dichloropropane (CASRN78-87-5)[EB/OL]. [2010-08-20]. https://cfpub.epa.gov/ncea/iris2/chemicalLanding.cfm?&substance_nmbr=601.
- [40] 杨思言, 段宁, 魏婉婷. 基于蒙特卡罗方法的铅酸蓄电池厂土壤健康风险评价 [J]. *工业安全与环保*, 2016, 42(12): 98-102.
- [41] 吴迪, 蒋能辉, 王宇, 等. 沈抚污灌区农田土壤生态健康风险评价 [J]. *山东科学*, 2017, 30(2): 95-105.
- [42] 徐亚, 朱雪梅, 刘玉强, 等. 基于随机 - 模糊耦合的污染场地健康风险评价及案例 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34(10): 2692-2700.
- [43] 黄瑾辉, 李飞, 曾光明, 等. 污染场地健康风险评价中多介质模型的优选研究 [J]. *中国环境科学*, 2012, 32(3): 556-563.
- [44] 陈鸿汉, 谏宏伟, 何江涛, 等. 污染场地健康风险评价的理论和方法 [J]. *地学前缘*, 2006, 13(1): 216-223.
- [45] 曾光明, 钟政林, 曾北危. 环境风险评价中的不确定性问题 [J]. *中国环境科学*, 1998, 18(3): 252-255.
- [46] USEPA. Guiding Principles for Monte Carlo Analysis[R]. Washington: EPA, 1997.
- [47] TRESSOU J, CRÉPET A, BERTAIL P, et al. Probabilistic exposure assessment to food chemicals based on extreme value theory. Application to heavy metals from fish and sea products[J]. *Food and chemical toxicology*, 2004, 42(8): 1349-1358.
- [48] BATCHELOR B, MEMBER A, VALDÉS J, et al. Stochastic risk assessment of sites contaminated by hazardous wastes[J]. *Journal of environmental engineering*, 1998, 124(4): 380-389.
- [49] MCKONE T E. Uncertainty and variability in human exposures to soil contaminants through home-grown food: a Monte Carlo assessment[J]. *Risk analysis*, 1994, 14(4): 449-463.
- [50] PRICE P S, SU S H, HARRINGTON J R, et al. Uncertainty and variation in indirect exposure assessments: an analysis of exposure to tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin from a beef consumption pathway[J]. *Risk analysis*, 1996, 16(2): 263-277.
- [51] BOWERS T S, GAUTHIER T D. Use of the output of a lead risk assessment model to establish soil lead cleanup levels[J]. *Environmental geochemistry and health*, 1994, 16(3): 191-196.
- [52] CHEN Z, HUANG G H, CHAKMA A. Integrated environmental risk assessment for petroleum-contaminated sites-A North American case study[J]. *Water science and technology*, 1998, 38(4-5): 131-138.
- [53] 阳文锐, 王如松, 黄锦楼, 等. 生态风险评价及研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1869-1876.
- [54] USEPA. Soil Screening Guidance: User's Guide[R]. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 1996.
- [55] USEPA. Guidance for Developing Ecological Soil Screening Levels[R]. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 2003.
- [56] VAN BEELEN P, VERBRUGGEN E M J, PEIJNENBURG W J G M. The evaluation of the equilibrium partitioning method using sensitivity distributions of species in water and soil[J]. *Chemosphere*, 2003, 52(7): 1153-1162.
- [57] VERBRUGGEN E M J, POSTHUMUS R, VAN WEZEL A P. Ecotoxicological Serious Risk Concentrations for Soil, Sediment and (Ground) Water: Updated Proposals for First Series of Compounds[R]. Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), 2001.
- [58] WEEKS J M, SOROKIN N, JOHNSON I J, et al. Biological Test Methods for Assessing Contaminated Land. Stage 2-A Demonstration of the Use of a Framework for the Ecological Risk Assessment of Contaminated Land. Environment Agency[R]. UK: Environment Agency, 2004.
- [59] CCME. A Framework for Ecological Risk Assessment: General Guidance[M]. Manitoba, Canada: CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment), 1996.
- [60] 刘晶, 滕彦国, 崔艳芳, 等. 土壤重金属污染生态风险评价方法综述 [J]. *环境监测管理与技术*, 2007, 19(3): 6-11.
- [61] 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 土壤重金属污染评价方法进展 [J]. *中国农学通报*, 2010, 26(17): 310-315.
- [62] WILBUR S B, HANSEN H, POHL H, et al. Using the ATSDR guidance manual for the assessment of joint toxic action of chemical mixtures[J]. *Environmental toxicology and pharmacology*, 2004, 18(3): 223-230.
- [63] FORBES V E, CALOW P. Applying weight-of-evidence in retrospective ecological risk assessment when quantitative data are limited[J]. *Human and ecological risk assessment: an international journal*, 2002, 8(7): 1625-1639.
- [64] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [65] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价 [J]. *地理科学*, 2005, 25(1): 108-112.
- [66] 方晓明, 刘哲哲, 刘中志, 等. 沈阳市丁香地区土壤重金属污染及生态风险评价 [J]. *环境保护科学*, 2005, 31(4): 45-47.
- [67] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. *Information and control*, 1965, 8(3): 338-353.
- [68] 张松滨, 朱静. 土壤重金属污染的灰色模糊评价 [J]. *干旱环境监测*, 2002, 16(1): 31-33.
- [69] SAATY T L. Decision making with the analytic hierarchy process[J]. *International journal of services sciences*, 2008,

- 1(1): 83-98.
- [70] 窦磊,周永章,王旭日,等. 针对土壤重金属污染评价的模糊数学模型的改进及应用[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 101-105.
- [71] 杨西飞,周涛发,张鑫,等. 基于 Matlab-FIS 的土壤中重金属污染模糊综合评价[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2007, 30(10): 1245-1249.
- [72] SHAO X Y, LI X T. Soil heavy pollution evaluation using grey relational analysis[J]. Energy procedia, 2011, 11: 4878-4882.
- [73] 黄彩霞,张江山,李小梅. 宽域灰色聚类法在土壤环境质量评价中的应用[J]. 环境科学导刊, 2009, 28(4): 61-64.
- [74] 李雪梅,王祖伟,汤显强,等. 重金属污染因子权重的确定及其在土壤环境质量评价中的应用[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2281-2286.
- [75] 王祖伟,张辉. 天津污灌区土壤重金属污染环境质量与环境效应[J]. 生态环境, 2005, 14(2): 211-213.
- [76] 王利东,李朝奎,李吟. 基于地统计学模型的惠州市土壤重金属污染评价[J]. 矿业工程研究, 2011, 26(1): 65-70.
- [77] 王明国,师荣光,李晓华. 重金属污染的土壤安全评价与蔬菜健康研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(24): 11705-11708.
- [78] 李静. 重金属和氟的土壤环境质量评价及健康基准的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- [79] ÖBERG T, BERGBÄCK B. A review of probabilistic risk assessment of contaminated land (12 pp)[J]. Journal of soils and sediments, 2005, 5(4): 213-224.
- [80] 徐湘博,马中,王瑛莹,等. 湖南长株潭中度污染区土壤镉概率生态风险评价[J]. 环境保护科学, 2017, 43(4): 115-121.
- [81] 陈波宇,郑斯瑞,牛希成,等. 物种敏感度分布及其在生态毒理学中的应用[J]. 生态毒理学报, 2010, 5(4): 491-497.
- [82] 胡二邦. 环境风险评价实用技术和方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.
- [83] 国家环境保护总局. HJ/T 25-1999 工业企业土壤环境质量风险评价基准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.
- [84] 赵肖,周培疆. 污水灌溉土壤中 As 暴露的健康风险研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 926-929.
- [85] 任慧敏,王金达,张学林. 沈阳市土壤铅的空间分布及风险评价研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(S1): 429-433.
- [86] 李正文,张艳玲,潘根兴,等. 不同水稻品种籽粒 Cd、Cu 和 Se 的含量差异及其人类膳食摄取风险[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 112-115.
- [87] 郭淼,陶澍,杨宇,等. 天津地区人群对六六六的暴露分析[J]. 环境科学, 2005, 26(1): 164-167.
- [88] 杨宇,石璇,徐福留,等. 天津地区土壤中萘的生态风险分析[J]. 环境科学, 2004, 25(2): 115-118.
- [89] WANG X L, TAO S, DAWSON R W, et al. Characterizing and comparing risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in a Tianjin wastewater-irrigated area[J]. Environmental research, 2002, 90(3): 201-206.
- [90] 申荣艳,骆永明,孙玉焕,等. 长江三角洲地区城市污泥的综合生物毒性研究[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(2): 54-58, 70-70.
- [91] 章海波,骆永明,李志博,等. 土壤环境质量指导值与标准研究 III. 污染土壤的生态风险评估[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 338-349.
- [92] 卢聪,李涛,付义临,等. 基于生物可利用性与宽浓度范围的 Hakanson 潜在生态风险指数法的创建——以小秦岭金矿区农田土壤为例[J]. 地质通报, 2015, 34(11): 2054-2060.
- [93] 何东明,王晓飞,陈丽君,等. 基于地积累指数法和潜在生态风险指数法评价广西某蔗田土壤重金属污染[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(2): 126-131.
- [94] 赵小健. 基于 Hakanson 潜在生态风险指数的某垃圾填埋场土壤重金属污染评价[J]. 环境监控与预警, 2013, 5(4): 43-44, 49-49.
- [95] 赵沁娜,徐启新,杨凯. 潜在生态危害指数法在典型污染行业土壤污染评价中的应用[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2005(1): 111-116.
- [96] 李维德,李自珍,石洪华. 生态风险分析在农田肥力评价中的应用[J]. 西北植物学报, 2004, 24(3): 546-550.
- [97] SINGH K P, MOHAN D, Singh V K, et al. Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments-a tributary of the Ganges, India[J]. Journal of hydrology, 2005, 312(1-4): 14-27.
- [98] JAIN C K. Metal fractionation study on bed sediments of river Yamuna, India[J]. Water research, 2004, 38(3): 569-578.
- [99] 邵孝侯,邢光熹,侯文华. 连续提取法区分土壤重金属元素形态的研究及其应用[J]. 土壤学进展, 1994, 22(3): 40-46.
- [100] 冯素萍,梁亮,朱英,等. 河流底泥沉积物的形态分析(II)—Tessier 形态分类法[J]. 山东大学学报(理学版), 2004, 39(6): 101-104, 107-107.
- [101] 杨永强. 珠江口及近海沉积物中重金属元素的分布、赋存形态及其潜在生态风险评价[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2007.

Research Progress on Soil Pollution Risk Assessment

WANG Liting, LIU Renzhi*

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: With the rapid development of industrialization and urbanization, the human health and ecosystem risks brought by soil pollution become increasingly concerned. In view of the lack of soil pollution risk assessment methodologies in risk control in China, this paper systematically over viewed the research progress on soil pollution risk assessment at home and abroad. According to the human health risk and ecological risk of soil pollution, it summarized and commented the assessment methods, assessment criteria, and a great deal of assessment cases of soil pollution risk. It pointed out that the soil pollution risk assessment is deficient in ecosystem level and at regional/ watershed scale, the assessment methods do not completely match the existing forms of pollutants, the assessment indexes can't cover most of heavy metals and organics, and the integrated assessment of health risk and ecological risk has not been realized.

Keywords: soil pollution; health risk; ecological risk; assessment method