

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20220410001

孔坤, 张猛, 宁增平等. 国内外污染场地环境风险评估框架形成与发展[J]. 生态毒理学报, 2023, 18(1): 124-137

Kong K, Zhang M, Ning Z P, et al. A review of formation and development of domestic and foreign environmental risk assessment frameworks for contaminated sites [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2023, 18(1): 124-137 (in Chinese)

## 国内外污染场地环境风险评估框架形成与发展

孔坤<sup>1,4</sup>, 张猛<sup>1</sup>, 宁增平<sup>1,\*</sup>, 钟重<sup>2</sup>, 王国玉<sup>3</sup>, 张弛<sup>2</sup>, 孟博<sup>1</sup>, 刘承帅<sup>1</sup>

1. 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, 贵阳 550081

2. 浙江省生态环境科学设计研究院, 杭州 310007

3. 中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120

4. 中国科学院大学, 北京 100049

收稿日期: 2022-04-10 录用日期: 2022-07-18

**摘要:** 城市工业企业搬迁与退役遗留大量污染场地, 其潜在环境风险受到各国政府的高度重视。在化学品风险/毒性评估的基础上, 欧美等发达国家(地区)率先发展和形成了独具特色的环境风险评估框架。我国在借鉴吸纳国外先进经验的基础上, 逐步形成符合国情的场地环境风险评估框架。笔者系统梳理了我国和美国、欧盟、荷兰、英国等国家(地区)的污染场地环境风险评估框架形成与发展历程; 分析阐释了各框架的首要目标、决策与管理过程、科学定位、关键创新等要素及其内涵; 揭示了各个国家(地区)在特定历史时期关键法律法规、政策与技术文件等的推动、支撑及指导作用等。通过对比研究可为我国场地环境风险评估框架的完善与创新提供有益参考。

**关键词:** 环境风险; 污染场地; 风险评估; 框架

文章编号: 1673-5897(2023)1-124-14 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

## A Review of Formulation and Development of Domestic and Foreign Environmental Risk Assessment Frameworks for Contaminated Sites

Kong Kun<sup>1,4</sup>, Zhang Meng<sup>1</sup>, Ning Zengping<sup>1,\*</sup>, Zhong Zhong<sup>2</sup>, Wang Guoyu<sup>3</sup>, Zhang Chi<sup>2</sup>, Meng Bo<sup>1</sup>, Liu Chengshuai<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

2. Ecology and Environment Science Design Academy of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, China

3. China Urban Construction Design & Research Institute, Beijing 100120, China

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Received 10 April 2022 accepted 18 July 2022

**Abstract:** Many industrial contaminated sites have been left in urban areas, due to the relocation and retirement of industrial enterprises, and their potential environmental risks have attracted great attention all over the world. In such circumstance, some developed countries (regions) in Europe and America have formed their own characteristic environmental risk assessment frameworks (ERAF), based on the risk/toxicity assessment of chemicals. In China, the ERAF in line with current realistic situation is gradually developed, by integrating foreign experience. This pa-

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1801402)

第一作者: 孔坤(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为毒害元素地球化学与环境风险评估, E-mail: kongkun@mail.gyig.ac.cn

\* 通信作者 (Corresponding author), E-mail: ningzengping@mail.gyig.ac.cn

per systematically reviews the formulation and development of the ERAF for contaminated sites in China, the United States, the European Union, the Netherlands, the United Kingdom, etc. The primary objectives, decision-making and management process, scientific orientations, and key innovations of these ERAFs are summarized. In addition, the promotion, support and guiding roles of key laws, regulations, policies, and technical guidelines of each country (region) in specific historical period are outlined. This review can provide a useful reference for the development and improvement of ERAF for contaminated sites in China.

**Keywords:** environmental risk; contaminated sites; risk assessment; framework

风险评估是过去几十年环境政策发展的重要内容之一,既是环境科学深度发展的必然结果,也是保护环境和保障社会安定的迫切需求。人类活动会在不同的空间和时间尺度上对人类健康、经济和自然生态系统等产生影响<sup>[1]</sup>。而这种潜在影响评估需考虑诸多问题,如环境污染对人体及生态环境产生影响的发生、发展规律,以及相应的预防对策、风险控制手段和卫生防护要求等。由此推动了许多国家(地区)环境风险评估框架的制定与发展<sup>[2]</sup>,并通过对相关法律法规的修改完善、颁布相关指南和技术文件等手段来规范环境风险评估过程并提供标准方法。同时,随着社会经济和科学认知的不断发展,框架的形式和重点也在不断发生变化。

场地环境风险评估,是指在分析污染场地土壤及地下水污染等对现场人群的主要暴露方式基础上,评价污染物对人体健康的致癌和非致癌危害程度<sup>[3]</sup>。英美等发达国家均采用基于风险的多层次评估框架,通过污染物迁移转运机制分析模型及人体暴露评价模型量化风险评估<sup>[4]</sup>。美国以《联邦政府的风险评估:管理程序》(红皮书)作为纲领性文件<sup>[5]</sup>,首先构建了较为完善的风险评估制度,明确了健康风险评价的四步程序(危害识别、剂量-效应关系、暴露评估和风险表征),并被许多国家(地区)和环境组织参考与采用。我国针对污染场地的环境风险评估工作起步较晚,具体内容主要包括:危害识别、暴露评估、毒性评估、风险表征,以及土壤和地下水风险控制值的计算。

该文系统阐述了国内外污染场地环境风险评估框架的形成与发展历程,对不同时期不同国家(地区)环境风险评估框架要素及内涵的异同等进行了总结分析,以期为我国新时期污染场地环境风险评估工作的完善与发展提供有益参考。

## 1 美国风险评估框架的形成与发展 (Formation and developing process of risk assessment framework in USA)

随着“纽约州拉弗运河事件”“肯塔基州铁桶谷

事件”等大量恶性污染事件相继发生,促使美国率先发起对污染场地管理和环境风险评估的立法管理。1983年和1984年美国环境保护局(U.S. Environmental Protection Agency, US EPA)先后发布“红皮书”“风险评估和管理:决策框架”,由此确立了美国风险评估与管理的基本框架(图1)。同时,为保障风险评估工作的顺利开展与监管,US EPA先后建立风险评估论坛(Risk Assessment Forum)和风险评估委员会(Science Policy Council,现名科技政策委员会 Science and Technology Policy Council)。早期环境风险评估工作主要关注毒害物质产生的人体健康风险,美国国家研究委员会(National Research Council, NRC)相继发布系列指导文件<sup>[6-8]</sup>,进一步补充和拓展了风险评估的工作原则。1997年,总统与国会风险评估和管理委员会(简称风险委员会, The Presidential/Congressional Commission on Risk Assessment and Risk Management, CRARM)发布报告,详细论述了如何让利益相关者参与评估过程以改进风险评估,初步构建了“公众参与”的雏形<sup>[9]</sup>。同时,针对不同性质污染物与受体进一步丰富了评估方法与指南,还指出基础分析技术发展的滞后制约了风险评估结果的可信度。为此,美国国家科学院(National Academy of Sciences, NAS)在“科学与决策:推进风险评估”(银皮书)报告中强调:要进一步增强技术分析(科学技术进步与管理)在风险评估中的作用<sup>[10]</sup>。“银皮书”的发布也推动了“风险评估和管理:决策框架”的再修订,进一步明确了人体健康风险评估的程序与内容。US EPA于2006年后陆续发布“人类健康风险评估战略研究行动计划”,旨在推动人体健康风险评估与管理的科学发展<sup>[11]</sup>。

20世纪后半叶,美国各地频发场地危险废物泄露事故,严重污染环境并威胁居民健康。因此,美国国会于1980年出台“综合环境响应、补偿和责任(Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act, CERCLA)”(超级基金法)法案,

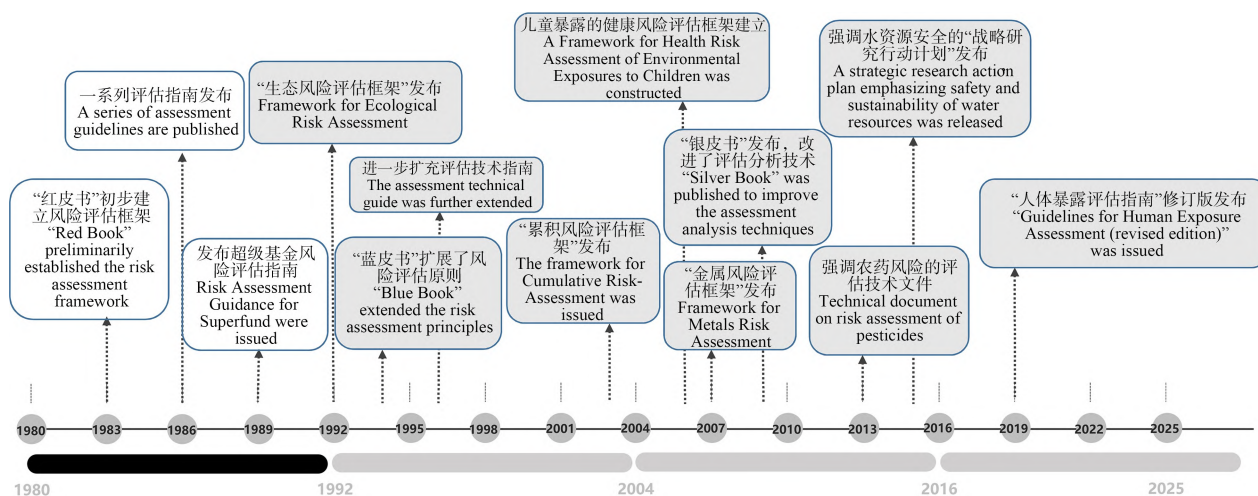


图 1 美国风险评估框架形成与发展历程

Fig. 1 Formation and developing process of environmental risk assessment framework in USA

基于已发布的评估指南与技术文件,指导污染场地环境风险评估与修复治理工作。然而,由于缺乏程序性的规定,“CERCLA”法案在出台后的实际执行过程中并未达到预期指导意义。因此,1986年的修正案,即“超级基金修正与再授权法(Superfund Amendments and Reauthorization Act, SARA)”,正式确立超级基金场地管理制度。SARA 不仅在环境监测、风险评估和场地修复等方面制定了标准管理体系,还将公众健康评价纳入场地修复可行性研究过程,为污染场地的管理提供了有力支持<sup>[12]</sup>。1989年起陆续发布的超级基金风险评估指南(Risk Assessment Guidance for Superfund, RAGS)主要包括评价指南、暴露因子等 6 个部分内容<sup>[13-18]</sup>。针对石油及其他化学品污染场地评估,美国试验与材料协会(ASTM)于 1995—2002 年间制定了相应的矫正行动标准指南(Risk-Based Corrective Action, RBCA)<sup>[19]</sup>。美国 GSI 公司(GSI Environmental Inc.)则根据 ASTM E2081-00 标准开发出“RBCA”模型,广泛用于污染场地环境风险分析、土壤风险筛选值与修复目标值的制定等<sup>[20]</sup>。

总体而言,美国风险评估框架对风险评估程序的启动(确定范围、制定计划与问题)、公众参与(风险评估的受众、沟通)、风险评估(危害识别、暴露评估、效果评估和风险表征)和支持决策等内容做了详细规定,并以“评估结果是否符合或达到预期目的(fit for purpose)”作为质量保证原则<sup>[21]</sup>。该框架的主旨是处理与评估实际问题,但在整个评估过程中,基础数据的核实和监测研究往往被忽视。因此在评估问题制定过程中,不仅需要明确目标,还要改善风险沟

通,以解决各种问题,如通过评估过程的迭代以消除民众疑虑<sup>[22]</sup>。

## 2 欧盟风险评估框架的形成与发展 (Formation and developing process of risk assessment framework in EU)

20 世纪 90 年代,欧盟先后发布“关于已有物质的风险评估和控制法规(793/93/EEC)”“新申报物质的风险评估指令(93/67/EEC)”“已有物质风险评估法规(1488/94/EEC)”等法规;1997 年确定以“欧盟风险评估系统(European Union System for the Evaluation of Substances, EUSES, 1997 年)”作为人体健康和生态环境风险的评价体系<sup>[23]</sup>;2003 年发布技术指导性文件 TGD (Technical Guidance Document, 2003 年),标志着欧盟初步建立了风险评估体系框架<sup>[24-25]</sup>。2007 年,欧盟发布“化学品注册、评估、许可和限制法规(1907/2006/EEC)”,表明在场地污染导致的健康风险评估方面,欧盟更关注化学品风险源。

与美国相比,欧盟的污染场地管理压力较轻。为有效管理场地污染的潜在人体健康与环境风险,于 1994 年成立欧盟污染场地公共论坛,并制定污染场地风险评价协商行动指南<sup>[26-27]</sup>。随后在 1996—1998 年的“污染场地风险评估集中行动”(Concerted Action on Risk Assessment for Contaminated Sites, CARACAS)中,总结了当时场地风险评估的科学理论与技术背景,最终确定了“污染源-污染途径-风险受体”的污染场地风险评估程序<sup>[28]</sup>。同时,为提高评估与决策的效率,欧盟学者基于 GIS,开发出

“DESYRE”(Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites)修复决策框架及软件<sup>[29-30]</sup>。

欧盟风险评估的整体框架(图 2)虽然与美国相似,但因为主要关注化学品的风险,因而更重视评估的数据收集,包括化学品的生产量、排放源与排放速率等,同时要求开展化学品的全生命周期评估;在效应评估方面,提倡采用基于结构效应关系与作用模式的毒性预测技术<sup>[24]</sup>。

荷兰是继美国后,欧盟成员国中率先开展土壤保护工作的国家之一<sup>[31]</sup>(图 3)。荷兰可耕作土地资源较少,对土壤保护的意识较强。为保护农用土壤资源,早在 1983 年即出台“土壤修复(暂行)法案”,并在配套发布的“土壤修复指南”中提出土壤环境

质量分类标准的 A、B、C 值(超过 A 值即为土壤污染,超过 C 值则被认为需要修复),A 与 C 值分别基于土壤背景值和专家判断,B 值为 A 与 C 值的平均值。1987 年颁布“土壤保护法案(Soil Protection Act)”(2006 年修订),规定了通过风险评估和毒理学信息来评估和调整 A、B、C 值<sup>[32]</sup>,并在该法案的补充文件(1994 年)中进一步明确了基于风险的目标值与干预值<sup>[33-34]</sup>。1989 年荷兰住宅、空间计划及环境部(Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu,VROM)发布风险评估框架,主张采用环境风险分析技术来制定“效果导向”的环境政策<sup>[35]</sup>,强调基础评估分析技术的重要性。1994 年发布 CSOIL 模型用以推导“干预值”<sup>[36]</sup>,其后又发布

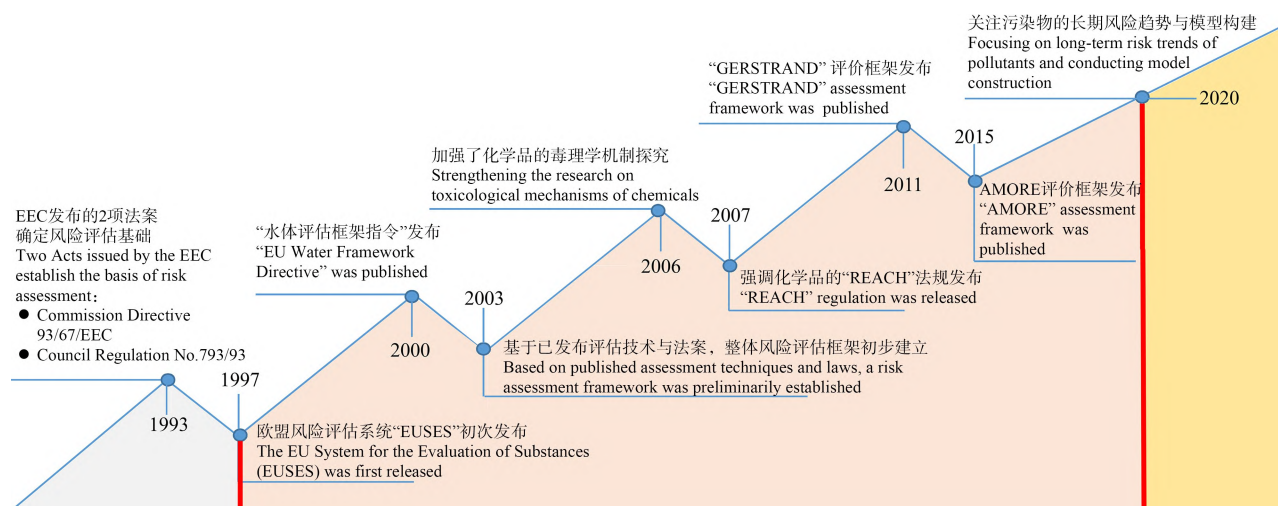


图 2 欧盟风险评估框架形成与发展历程

Fig. 2 Formation and developing process of environmental risk assessment framework in EU

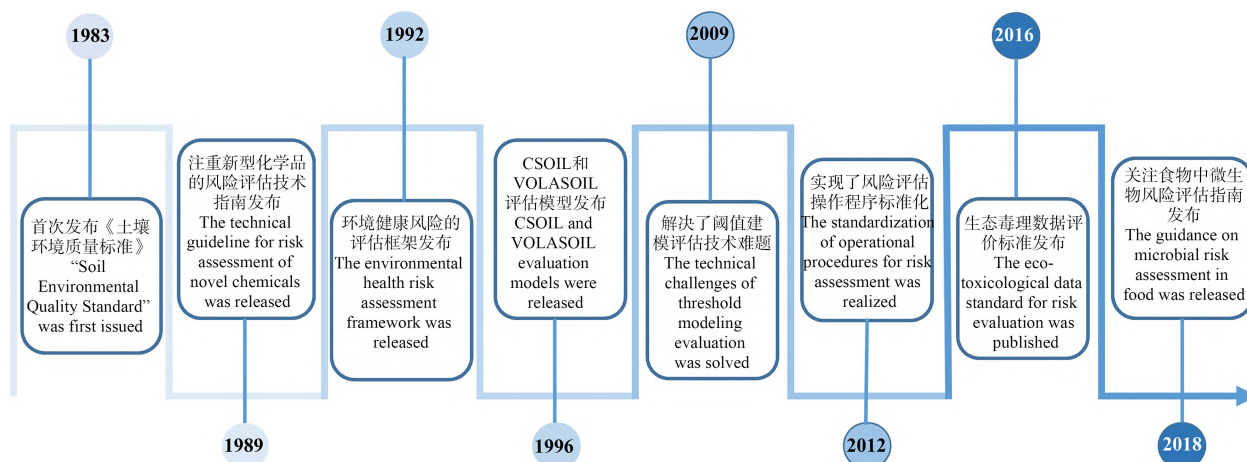


图 3 荷兰风险评估框架形成与发展历程

Fig. 3 Formation and developing process of environmental risk assessment framework in the Netherlands

VOLASOIL 模型评估不同类型场地挥发性污染物的室内蒸气入侵风险<sup>[37]</sup>,并进一步完善相关技术指南<sup>[34,38]</sup>。2013年修订的“土壤修复通令(Soil Remediation Circular)”中明确设定了标准化风险评估程序和场地风险评估程序<sup>[39]</sup>。

荷兰环境风险评估框架包括5个关键要素<sup>[40]</sup>:(1)确定危害源;(2)评估危害发生的概率和程度;(3)评估已识别风险的可接受性;(4)预防风险;(5)如果做不到上述几点,则维持可接受的风险水平。该框架的特点是:对受体、效应和应激因子等特定组合的风险进行了限制性定义。该框架的主要目标还包括提供评价准则、确定环境优先顺序、评估环境回报和确保不同污染源防护水平的可比性。该框架虽定义了极端风险可接受性的判断标准(保护生态系统中95%的物种),但没有为风险控制计划的实施制定明确方案。总体而言,荷兰的环境风险评估侧重于定量化和数字化表达,即将抽象的风险用具体数值表示并建立相应的管理标准。

### 3 英国风险评估框架的形成与发展 (Formation and developing process of risk assessment framework in UK)

英国对污染场地的管理是建立在风险管控的基础上,针对风险的不确定性,强调以预防为主的风险

管控。英国环境法(British Environmental Law)第57节中补充的Part IIA部分对污染土地的识别和修复作出规定<sup>[41]</sup>,并授权环境主管部门制定“法定指南”,要求根据土壤的当前用途,避免或减少对人体健康或环境带来不可接受的风险<sup>[42]</sup>。据此,1995年英国环境部(United Kingdom Department of the Environment)制定的风险评估和管理指南<sup>[43]</sup>(图4),要求所有环境风险评估和管理活动都要有助于国家的可持续发展战略,并提出了预防为主的原则。在该文件的要求与指导下,英国环境署(Environment Agency, EA)下属的环境、食品与农村事务部(Department of Environment, Food and Rural Affairs, DEFRA)于2002年公布了关于污染场地的系列技术文件(contaminated land report, CLR),旨在评估各种污染物对人体健康及生态环境的潜在风险,并开发出适用于英国的污染场地暴露评估模型(the contaminated land exposure assessment model, CLEA)<sup>[44]</sup>。基于已发布的指南与模型等进行污染场地风险评估,英国与欧盟均采用层级递进式的评估程序,该程序分四步进行(T0~T3):筛选级评估(T0~T1)、效应评估(T2)、暴露-效应关系分析(T3),均有详细的技术依据<sup>[45]</sup>。

应用实践数年后,英国环境部于2009年对风险评估导则(SR3)进行修订补充,并完善了CLEA评估模型,提高其适用性<sup>[4,46]</sup>。2012年DEFRA再次修订

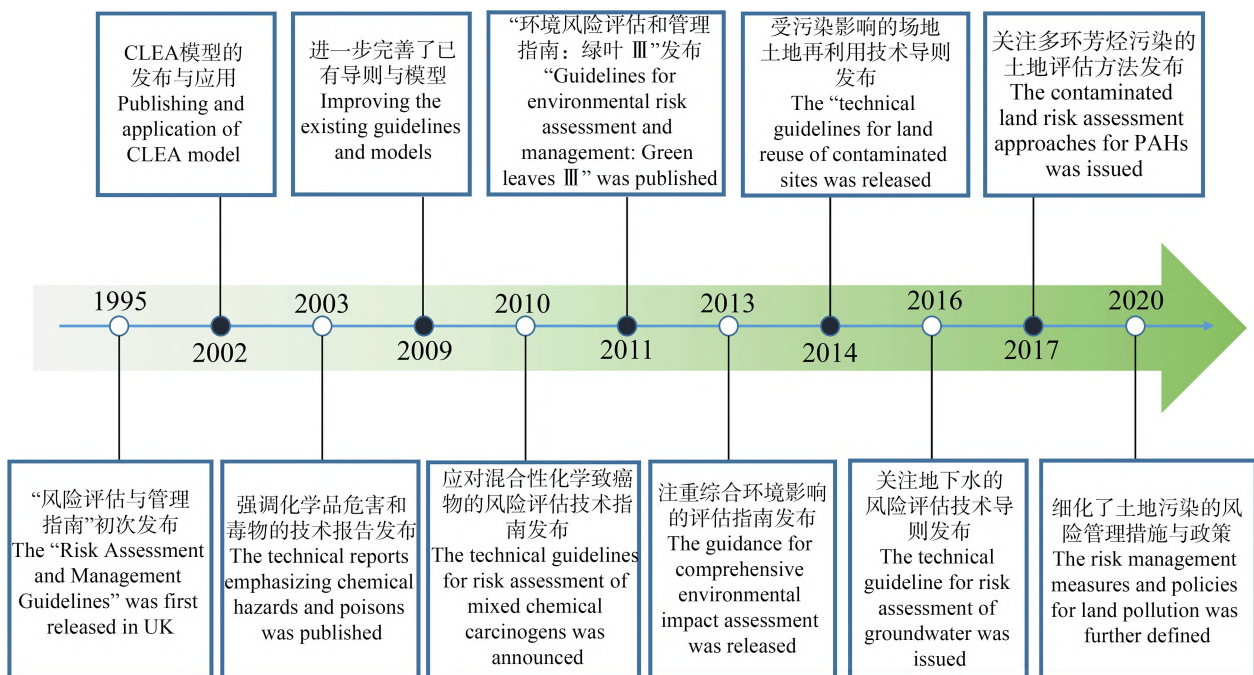


图4 英国风险评估框架形成与发展历程

Fig. 4 Formation and developing process of environmental risk assessment framework in UK

“法定指南”,不仅对污染场地的定义、风险评估、责任排除和分摊、成本回收等概念和技术细则作出了更全面详细的规定<sup>[47]</sup>,还针对风险评估的“事前、事中、事后”3个环节<sup>[48-49]</sup>对风险评估制度进行了补充。在该框架体系下,通过分析场地污染的风险程度,根据评估结果判断是否进行下一阶段的风险评估(监测与咨询),然后将调查结果与“法定指南”的可接受程度进行比较,制作风险摘要、识别污染。

#### 4 中国风险评估框架的形成与发展 (Formation and developing process of risk assessment framework in China)

我国的场地环境风险评估研究起步相对较晚,相关标准、导则与技术文件的制定也处在不断健全和完善阶段。近年来工业企业搬迁与退役遗留大量污染场地,由此推动我国人体健康与生态风险评价相关政策、研究与实践的快速发展。纵观各时期国家及各部委发布的法律法规、标准、政策性文件与技术导则等,可大致将我国的环境风险评估框架的形成与发展历程分为3个阶段(图5)。

##### 4.1 第一阶段:基准探索阶段(1981—1999年)

我国于“六五”“七五”期间组织开展了“土壤背景值”“土壤环境容量”的调查工作,并针对部分污染物开展了基于生态环境效应的土壤环境基准研究工作。1989年,原国家环境保护总局成立有毒化学品管理办公室,标志着我国环境风险评价和管理工作的正式启动<sup>[50]</sup>。1995年颁布实施《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)<sup>[51]</sup>,制定的标准值是基于污

染物在土壤中的生态环境效应推导得出<sup>[52]</sup>。随着时间的推移,场地污染对周边人群健康及环境介质产生了潜在风险,对此,1999年原国家环境保护总局颁布实施《工业企业土壤环境质量风险评价基准》(HJ/T 25—1999)<sup>[53]</sup>,要求工矿企业对其生产活动可能造成的土壤污染进行风险评价,提出用风险评价方法确定基准值,并制定了“土壤基准——直接接触”(保护可能存在不当摄入或皮肤接触土壤的工作人员)和“土壤基准——迁移至地下水”(保证化学物质不会通过土壤沥滤危害工业企业下方饮用水源)2套基准数据库<sup>[54]</sup>。然而,该阶段我国场地环境风险评估的研究工作比较有限,对于污染物的筛选值与控制值、风险评价模型与模型参数、修复目标值等关键因素的选择与确定仍没有明确的规范和标准可循,多数工作主要参考欧美发达国家(地区)的管理和技术文件及相关案例等,因此亟待探索适合国情的场地环境风险评估技术体系。

##### 4.2 第二阶段:框架构建阶段(2000—2014年)

进入21世纪后,我国环境风险评估工作得到快速发展。2000年,北京市环境保护科学研究院姜林研究员主持完成国内第一个场地调查与风险评估项目“北京化工集团七厂及北京市第一建筑构件厂等用地性质改变的环境风险调查与分析”,首次引入场地风险评估技术,开展场地土壤砷和汞污染风险评估及修复目标值推导<sup>[55]</sup>。2004年原国家环境保护总局发布《关于切实做好企业搬迁过程中环境污染防治工作的通知》(环办〔2004〕47号),要求产生危险废物的单位对其场地和土壤使用前后,均进行

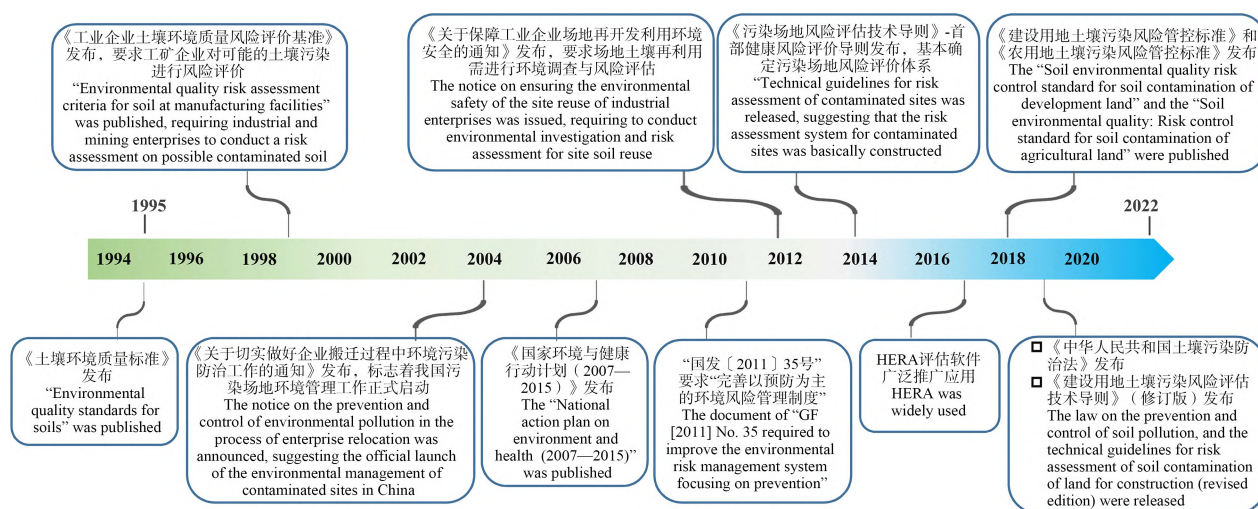


图 5 中国风险评估框架形成与发展历程

Fig. 5 Formation and developing process of environmental risk assessment framework in China

环境评价工作,这也标志着我国污染场地环境管理工作正式启动<sup>[54]</sup>。2007年,当时的卫生部等部委联合发布了《国家环境与健康行动计划(2007—2015)》,确立了“预防优先”的基本原则,提出我国应进一步开展环境与健康风险评估工作,建立健全环境与健康风险管理机制,完善生态环境与健康风险评估技术方法、评估程序的行动策略,对我国环境风险评估的后续工作提供了指导。为回应该计划,2009年原环境保护部发布《国家污染物环境健康风险名录》,不仅是对“预防优先”原则的具体落实,还是一项非常重要的基础性工作。

欧美等发达国家的风险评估框架,是经历了系列重大环境污染事件并付出惨痛代价才逐步建立与完善起来的。我国充分借鉴已有国内外经验和教训,将污染场地作为我国风险评价和环境管理的重点<sup>[56]</sup>。国务院于2011年印发《关于加强环境保护重点工作的意见》(国发〔2011〕35号),提出要完善以预防为主的环境风险管理制度。遵照该意见的要求,多部委于2012年联合发布《关于保障工业企业场地再开发利用环境安全的通知》(环发〔2012〕140号),要求已关停并转、破产企业场地土壤的再开发利用,需要企业组织开展相关的环境调查和风险评估工作;同年“全国重点地区环境与健康专项调查”启动,旨在建立我国环境与健康基线信息数据库,并评估环境污染对人体的健康风险<sup>[57]</sup>。2014年,我国自主编写的《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3—2014)<sup>[58]</sup>正式颁布实施,对开展污染场地人体健康风险评估的原则、内容、程序、方法和技术要求等方面都作出明确规定,可用于指导污染场地人体健康风险评估和污染场地土壤和地下水风险控制值的确定,是首部适用于我国人群和污染状况的健康风险评估技术导则<sup>[59]</sup>。截至2014年,污染场地系列技术指南修订发布,我国的污染场地风险评价与管理框架体系基本确立,标志着我国以自主探索为主、吸纳借鉴为辅的污染场地风险评估工作进入了规范快速发展阶段。

#### 4.3 第三阶段:吸纳融合、完善成熟的新时期发展阶段(2015至今)

在这一阶段,我国已有框架体系与新时期场地污染特征、技术补充等不断结合并完善成熟。2017年实施的《污染地块土壤环境管理办法(试行)》首次对污染场地管理的基本程序与内容作出明确规定。截至2017年底,各部委发布的场地污染相关人体健

康风险评估标准共计12项,技术文件3项<sup>[60]</sup>,环境风险评估框架不断完善成熟。陈梦舫<sup>[60]</sup>在国外评估模型基础上,结合我国国情与需求,研发出首套污染场地健康与环境风险评估软件“HERA”。2019年发布实施的《中华人民共和国土壤污染防治法》对土壤污染风险管控标准制定、建设用地风险评估等工作的细则作出了明确的规定;同年《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019代替HJ 25.3—2014)<sup>[61]</sup>发布,更新了建设用地土壤污染健康风险管控标准和评估技术。此外,我国早期的污染场地风险评估主要聚焦于末端受体(生态环境或人体),而对于污染物或化学物质本身(源头与过程)的环境风险评估缺乏框架性指南;因此,2019年,我国生态环境部发布了《化学物质环境风险评估技术方法框架性指南(试行)》(环办固体〔2019〕54号),并于2020年配套发布了《化学物质环境与健康危害评估技术导则(试行)》《化学物质环境与健康暴露评估技术导则(试行)》《化学物质环境与健康风险表征技术导则(试行)》3项技术导则。这为科学确定化学物质对生态环境与人体健康的风险水平和针对性地制定与实施风险管控措施提供了评估指南与决策依据。

相对于欧美发达国家,我国的场地环境风险评估框架注重实用性,且每一项导则与指南等技术文件均是基于科学性、实用性与可操作性原则制定,力求在应用中获得最佳的效果。无论是框架规定的评估与修复程序,或是评估的技术依据,都非常明确、详细与全面。在实际应用过程中,基本能达到有理可循,有据可依。虽然我国污染场地环境风险评估框架及技术规范体系已基本确立,但是仍存在不足。例如在如何更科学地确定场地土壤安全值<sup>[62-63]</sup>及暴露参数选择等方面仍有待完善和深入研究。同时,我国框架的早期发展主要受环境事件推动,因而缺乏一定的普适性。环保部门发布的相关文件对于污染场地人体健康风险评估而言相对完善,但关注污染物的范围及其毒理学数据仍有待补充和完善;当出现新型污染事件与污染物时,仍需借鉴国外标准、评估方法与参数等。此外,在长期累积性暴露的健康风险评估方面仍需开展深入研究。

## 5 国内外风险评估框架的比较分析(Comparative analysis of domestic and foreign risk assessment frameworks)

环境风险评估框架的建设初衷是预防或降低人体健康和生态环境风险,并为风险管控提供支撑信

息。世界各国(地区)的社会经济结构、环境基础数据(人口暴露、风险源和环境质量等)等差异会导致风险描述、决策或管理本身的差异。综合比对分析我国与世界主要发达国家(地区)的环境风险评估框架(表1),结果表明,所有框架都强调科学的首要地位或将科学与政策分开,且多数国家(地区)只涉及“科学”在风险估计中的作用(仅用于向管理层提供信息)。其他关于“科学”定位,如美国风险委员会将“科学”置于社会决策背景之下,是驱动基于风险的决策的众多因素之一;而一些国家的框架则认为“科学”会影响并被其所处的社会环境所影响,因此不是完全客观的。

US EPA 早期环境风险评估框架为典型的“科学”“管理”分离的框架,不重视利益相关者的协商以及评估范围内除技术信息以外的其他内容,对如何识别公众和选择代表仍缺乏明确和系统规定<sup>[64-65]</sup>。在参照发达国家经验的基础上,我国以2007年国务院颁布的《政府信息公开条例》为开端,到2014年修订版《环境保护法》发布,正式确立了环境风险评估的公众参与法律制度,明确了公众参与的重要性与参与方法。2019年国务院发布的《重大行政决策程序暂行条例》,强调通过公众参与来增强各类行政决策的正当性。然而,公众参与协商的本质是动态的,包括信息交换、观点细化和共识发展,因此应在各分析阶段之间包含反馈循环。英、美框架都允许从风险评估/管理过程的任何阶段开始无限迭代循环。英国更是要求风险决策决不能基于对事实、成本或潜在危险的单一看法去制定,而是需要综合多方利益寻求最佳的风险决策,以最大限度地减小对各相关方利益的损害。我国虽已提出并逐步健全公众参与制度,但目前公众在环境评估与决策方面的参与度还有所欠缺。在该方面可参考国外的优秀案例,并结合我国国情进一步优化完善,如美国在2004年实行的“多方合作解决问题范例”确保所有居民都能参与环境的监督管理,以提高评估过程与决策的正当性<sup>[66]</sup>。

当前的环境风险已不再是简单的定量评估,而是需要平衡多种社会利益以达成共识的问题。这种共识不仅涉及风险最小化,还涉及以恰当方式和合理成本实现风险降低。因此,环境风险规制既是技术问题,也是公共政策问题,同时还存在科学不确定性问题<sup>[67]</sup>。US EPA 框架倾向于用复杂的数学方式来表达不确定性,但框架本身却采用证据权重法来

进行风险表征,而美国国家研究委员会和风险委员会框架都倾向于描述性的不确定性表达。鉴于风险评估不可避免的主观性,英国框架强调基于假设的敏感性分析。我国则更加关注环境风险评估过程的不确定性分析,强调定性与定量相结合的方法。2017年发布的《环境污染物人群暴露评估技术指南》(HJ875—2017)<sup>[68]</sup>提出可通过模型参数敏感性分析、蒙特卡罗模拟等方法对暴露评估的不确定性进行分析;《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)<sup>[69]</sup>给出了暴露风险贡献率分析及模型参数敏感性分析方法;《化学物质环境风险评估技术方法框架性指南(试行)》(环办固体〔2019〕54号)则进一步提出通过迭代的方式减小风险评估过程的不确定性。然而,造成污染场地环境风险评估结果不确定性的因素很多,如暴露情景假设、评估模型适用性和模型参数取值等,但我国目前还没有专项技术指南针对上述所有的不确定性分析给出明确的规定。美国与荷兰等国家的评估模型在污染物暴露情景及暴露参数取值上,都有较为详细的说明,可为我国在该方面提供参考。在污染场地环境风险评估过程中,我国虽然也采用定量的评估方法,但更多体现在风险值计算方面。在评估环境回报与风险发生的概率与程度等方面,可参考荷兰的数字化表达方式,以更直观地表述评估结果。

环境风险源种类繁多,且与风险受体之间的作用机制交错复杂。因此,风险级别和管控优先顺序的辨识与确定,能够最大限度地为环境管理决策提供科学依据<sup>[70-71]</sup>。比较风险评价作为一项重要的政策分析工具,是连接风险评价和风险管理、决策之间的纽带,能够对一定区域内不同环境问题所产生环境风险的评估结果进行比较与排序,最终确定优先管控的环境风险类型<sup>[72]</sup>。US EPA 于1987—1993年先后发布关于比较风险评价的技术报告与指南,系统地介绍了比较风险评估方法及其确定的风险管理排序对降低环境风险的作用,解释了项目风险分析和风险管理机制,并介绍了在国际上的应用案例。US EPA 利用比较风险评价方法管理风险的模式,能有效地应对与管理突发环境事件。而我国环境风险管理决策主要基于事件驱动型的优先管理模式,被动识别环境风险管理优先级,进而采取管控措施降低或消除环境风险,在一定程度上能有效控制突发环境事件,但仍存在局限性。要实现向以风险预防与控制为目标导向的环境管理模式转变,尚有较



表1 国内外环境风险评估框架异同分析<sup>a</sup>  
Table 1 Analysis of similarities and differences of domestic and foreign environmental risk assessment frameworks

内容 Issue	荷兰 (1989年) The Netherlands (1989)	美国环境保护局 (1992年) U.S. EPA (1992)	美国国家研究委员会 (1996年) U.S. National Research Council (1996)	美国风险委员会 (1997年) U.S. Risk Commission (1997)	英国环境部 (1995年) U.K. Department of the Environment (1995)	加拿大 (1996年) Canadian Standards Association (1996)	中国 (2012年) China (2012)
首要目标 Framework's prime objective	降低风险 Risk reduction	风险分析 Risk analysis	风险表征 Risk characterization	风险管理 Risk management	风险管理 Risk management	环境决策制定 Environmental decision making	预防风险 Risk prevention
评估 VS 管理 Assessment VS management	含蓄的管理导向 Implicitly management-orientated	明确的管理导向 Explicitly assessment-oriented	明确的管理导向 Explicitly assessment-oriented	明确的管理导向 Explicitly assessment-oriented	评估植入管理 Assessment embedded in management	评估植入管理 Assessment embedded in management	评估植入管理 Assessment embedded in management
决策制定 Decision making	决策导向, 包括具体监管目标 Decision-oriented, includes specific regulatory objectives	决策导向, 决策遵从于问题排解 Decision-oriented, decision making used for problem solving	决策导向, 对原则和技术评论 Decision-oriented, comments on principles and techniques	隐含的决策导向, 在做决策时需要平衡 Implicitly decision-oriented, requires balance in decisions making	决策导向, 确定特定的决策点 Decision-oriented, identifies specific decision points	决策导向, 确定特定的决策点 Decision-oriented, identifies specific decision points	非决策导向, 风险评估结果是决策的重要依据 Not decision-oriented, the result of risk assessment is important basis for decision-making
公众参与 Stakeholder input	含蓄强调公众参与 Implicit emphasis on input	强烈强调公众参与 Strong emphasis on input	强烈强调公众参与 Strong emphasis on input	含蓄强调公众参与 Implicit emphasis on input	不重视公众参与 Weak emphasis on input use	不重视公众参与 Weak emphasis on input use	强调公众参与 Emphasis on input use
科学的作用 Role of science	风险评估的必要条件 Necessary for risk assessment	是必要的, 但不足以单独支撑 Necessary for risk assessment, but insufficient alone	风险管理决策所必需 Necessary for risk management decision making	风险管理决策所必需 Necessary for risk management decision making	风险评估的必要条件 Necessary for risk assessment	风险评估的必要条件 Necessary for risk assessment	风险评估的必要条件 Necessary for risk assessment
社会经济评估 Socioeconomic valuation	成本习惯于在监管选项中 Costs used to select among regulatory options	用于扩大对风险的理解 Used to broaden risk understanding	被认为对决策有用 Viewed as useful in decision making	用于因资源限制而作出的决策 Used in decision making due to resource limitations	被排除在决策之外 Excluded in decision making	没有包括在内 Not included	没有包括在内 Not included

续表1	荷兰 (1989年) The Netherlands (1989)	美国环境保护局 (1992年) U.S. EPA (1992)	美国国家研究委员会 (1996年) U.S. National Research Council (1996)	美国风险委员会 (1997年) U.S. Risk Commission (1997)	英国环境部 (1995年) U.K. Department of the Environment (1995)	加拿大 (1996年) Canadian Standards Association (1996)	中国 (2012年) China (2012)
不确定性分析 Uncertainty analysis	要求定量方法 Requires quantitative methods	要求定量方法 Requires quantitative methods	更倾向于定性方法而不是定量方法 Prefers qualitative to quantitative methods	强调定性和定量方法 Stress quantitative and qualitative methods	要求定量方法 Requires quantitative methods	强调定量方法 Emphasize quantitative methods	强调定量与定性相结合的方法 Stress the combination of qualitative and quantitative methods
风险表征 Risk characterization	强调定量方法 Emphasize quantitative approaches	强调定量方法 Emphasize quantitative approaches	要求既定定量和定性方法 Should be both quantitative and qualitative	由于信息差将导致部分定性 Will be partially qualitative due to information gaps	强调定量方法 Emphasize quantitative approaches	强调定量方法 Emphasize quantitative approaches	强调定量方法 Emphasize quantitative approaches
风险优先次序 Risk prioritization	通过比较风险和标准来完成 Completed by comparing risks to standards	重复评估的衍生特征 A derivative property of repeated assessment	隐含于风险管理中 Implicit in risk management	必要但并不是一直准确 Necessary but not always precise	使用定性的极小值和极大值排序 Use qualitative <i>de minimus</i> and <i>de maximus</i> ranking	事件驱动型优先管理模式, 被动识别环境风险管理优先级 Event-driven priority management model, passive identification of environmental risk management priorities	事件驱动型优先管理模式, 被动识别环境风险管理优先级 Event-driven priority management model, passive identification of environmental risk management priorities
线性 vs 迭代 Linear versus iterative	线性的隐含反馈 Linear with implicit feedbacks	评估和管理之间的迭代 Iterative between assessment and management	所有阶段都是迭代的 Iterative at all stages	所有阶段都是迭代的 Iterative at all stages	评估和管理之间的迭代 Iterative between assessment and management	评估和管理之间的迭代 Iterative between assessment and management	评估和管理之间的迭代 Iterative between assessment and management
关键创新 Key innovation	具体阐述了数字管理标准 Specifically state numerical management standards	认识到基于风险的决策的分析-审议性质 Recognize the analytic-deliberative nature of risk-based decision making	在风险分析中包括社会、伦理和经济价值 Include social, ethical and economic values in risk analysis	在面队不确定性时明确使用预防原则 Explicit use of the precautionary principle in the face of uncertainty	认识到管理高于评估 Recognize the primacy of management over assessment	以预防为主, 实行环境应急分级、动态和全过程管理 Focus on prevention, implement environmental emergency classification, dynamic and whole-process management	以预防为主, 实行环境应急分级、动态和全过程管理 Focus on prevention, implement environmental emergency classification, dynamic and whole-process management

注: a.表1 是在 Power 和 McCarty (1998)<sup>[40]</sup>的研究基础上修订补充完成的。  
Note: a. Table 1 is revised and supplemented based on the research by Power and McCarty (1998)<sup>[40]</sup>.

多技术问题有待解决<sup>[73]</sup>。目前,我国学者通过参照学习国外先进经验,在区域环境风险评价与优先管理、风险源识别与分级和各环节风险分析等方面已经开展了一系列的研究<sup>[72]</sup>,但仍需进一步拓展和深入。

## 6 结语与展望(Conclusion and prospects)

欧美发达国家(地区)已于20世纪80—90年代建立起完善的环境风险评估框架,并制定了独具特色的框架性文件和管理文件。相比而言,我国的环境风险评估框架并没有以专项文件形式发布且成型较晚,主要基于国家及各部委制定的环境/健康风险评估和管理的法规、政策、规范和指南开展相应工作,逐步实现职业健康风险评估与环境风险评估的剥离,建设用地土壤污染风险评估与污染场地环境管理的剥离。同时实现了由健康风险评估向环境风险评估和生态风险评估发展,并逐渐从健康风险管理(风险控制为目标导向)向环境管理模式转变。

随着人民生活高质量需求和生态环境保护意识的不断提高,我国污染场地环境风险评估框架正处于新的发展时期,环境风险评估框架及风险管理过程的改进与优化不可避免,对评估方法的精细化、本土化和精准化要求进一步提高,框架结构仍需进一步完善与补充以适应时代要求。首先,在原有基础上需进一步拓展建设用地土壤污染风险管控目标污染物的范围,基于土壤环境基准制定相应的污染风险筛选值与管控值,并完善相关污染物的基础毒理学信息数据库。其次,要改变事件驱动型的优先管理模式,实现向以风险预防与控制为目标导向的环境管理模式,在制定污染场地环境风险评估导则与技术规范等文件时,应从健康与环境2个方面进行考虑,在污染范围确定、不同场景的针对性评估技术和暴露参数手册等方面进行补充与完善。最后,亟待深化累积性环境风险相关研究与管理实践,完善、细化环境风险评估相关技术标准与导则,以有效识别优先控制对象;同时,在污染场地环境风险评估过程中增加社会经济影响评估环节,可为环境风险优先管控顺序与影响程度的确定提供重要依据。

通信作者简介:宁增平(1980—),男,博士,研究员,主要研究方向为毒害元素环境地球化学与环境风险。

## 参考文献(References):

[1] Baram M S. Technology assessment and social control [J]. *Jurimetrics Journal*, 1973, 14(2): 79-99

- [2] Beanlands G E, Duinker P. An ecological framework for environmental impact assessment in Canada [J]. *Journal of Environmental Management*, 1984, 18: 267-277
- [3] 周琼. 场地环境风险评估方法探究——以上海市某场地为例[D]. 上海: 上海交通大学, 2018: 12-14  
Zhou Q. Research on assessment method of site environment— A site in Shanghai as an example[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018: 12-14(in Chinese)
- [4] 陈梦舫, 骆永明, 宋静, 等. 中、英、美污染场地风险评估导则异同与启示[J]. *环境监测管理与技术*, 2011, 23(3): 14-18  
Chen M F, Luo Y M, Song J, et al. Comparison of USA, UK and Chinese risk assessment guidelines and the implications for China [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2011, 23(3): 14-18(in Chinese)
- [5] Division on Earth. Risk assessment in the federal government: Managing the process [R]. Washington DC: The National Academies Press, 1983
- [6] Light L, Rodgers A. Pesticides in the diets of infants and children: Should you be concerned? [R]. Washington DC: The National Academies Press, 1993
- [7] US National Research Council. Science and judgment in risk assessment [R]. Washington DC: The National Academies Press, 1994
- [8] Stern E, Fineberg H. Understanding risk: Informing decisions in a democratic society [R]. Washington DC: The National Academies Press, 1996
- [9] The US Presidential/Congressional Commission on Risk Assessment and Risk Management. Framework for environmental health risk management, final report volume 1 and risk assessment and risk management in regulatory decision making, final report volume 2 [R]. Washington DC: Government Printing Office, 1997
- [10] US National Research Council. Science and decisions: Advancing risk assessment [R]. Washington DC: The National Academies Press, 2009
- [11] US Environmental Protection Agency. Human health risk assessment multi-year plan (FY 2007-2012) [R]. Washington DC: Office of Research and Development, 2006
- [12] US Environmental Protection Agency. Superfund public health evaluation manual [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1986
- [13] US Environmental Protection Agency. Risk-assessment guidance for Superfund. Volume 1. Human health evaluation manual. Part A [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989

- [14] US Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for Superfund Volume I: Human health evaluation manual supplemental guidance “standard default exposure factors” [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1991
- [15] US Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for Superfund Volume 1: Human health evaluation manual. Part C [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1991
- [16] US Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for Superfund Volume 1: Human health evaluation manual (Part D, standardized planning, reporting, and review of Superfund risk assessments) [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 2001
- [17] US Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for Superfund Volume 1: Human health evaluation manual (Part E supplemental guidance for dermal risk assessment) [R]. Washington DC: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, 2004
- [18] US Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for Superfund Volume 1: Human health evaluation manual part F, supplemental guidance for inhalation risk assessment [R]. Washington DC: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, 2009
- [19] Sager S L, Philip W. Risk Based Corrective Action [M]. 2nd ed. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 2005: 733-736
- [20] 张斌, 邹卉, 肖杰, 等. RAG-C 和 RBCA 模型中场地特征参数的差异及其启示[J]. 环境工程, 2015, 33(9): 130-133, 99  
Zhang B, Zou H, Xiao J, et al. Comparison of site-specific parameters in RAG-C and RBCA model and the implication for China [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(9): 130-133, 99(in Chinese)
- [21] US Environmental Protection Agency. Framework for human health risk assessment to inform decision making [R]. Washington DC: Office of the Science Advisor, Risk Assessment Forum, 2014
- [22] Menzie C A, Freshman J S. An assessment of the risk assessment paradigm for ecological risk assessment [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 1997, 3(5): 853-892
- [23] Jager T, Vermeire T G, Rikken M G, et al. Opportunities for a probabilistic risk assessment of chemicals in the European Union [J]. Chemosphere, 2001, 43(2): 257-264
- [24] 李潍, 于相毅, 史薇, 等. 欧盟健康风险评估技术概述[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(4): 43-53  
Li W, Yu X Y, Shi W, et al. Overview of EU human health risk assessment technology [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(4): 43-53(in Chinese)
- [25] European Chemicals Bureau. Technical guidance document(TGD) on risk assessment of chemical substances [R]. Ispra: European Chemicals Bureau, 2003
- [26] European Environment Agency. Environmental risk assessment—Approaches, experiences and information sources [R]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1998
- [27] Ferguson C. Assessing risks from contaminated sites: Policy and practice in 16 European countries [J]. Land contamination and Reclamation, 1999, 7(2): 33-54
- [28] Smith R, Pollard S, Weeks J, et al. Assessing significant harm to terrestrial ecosystems from contaminated land [J]. Soil Use and Management, 2005, 21(2): 527-540
- [29] Critto A, Nadali N, Samiolo M, et al. DESYRE-decision support system for rehabilitation of contaminated sites: Objectives and the international environmental modelling and software society. Integrated assessment and decision support (3) [C]. Manno, Switzerland: The International Environmental Modelling and Software Society, 2002: 211-216
- [30] Carlon C, Critto A, Ramieri E, et al. DESYRE: DEcision support sYstem for the REhabilitation of contaminated megasites [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2007, 3(2): 211-222
- [31] Rodrigues S M, Pereira M E, da Silva E F, et al. A review of regulatory decisions for environmental protection: Part I—Challenges in the implementation of national soil policies [J]. Environment International, 2009, 35(1): 202-213
- [32] 吴颐杭, 杨书慧, 刘奇缘, 等. 荷兰人体健康土壤环境基准与标准研究及其对我国的启示[J]. 环境科学研究, 2022, 35(1): 265-275  
Wu Y H, Yang S H, Liu Q Y, et al. Research on soil environmental criteria and standards for human health in the Netherlands and its enlightenment to China [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(1): 265-275(in Chinese)
- [33] Swartjes F A. Risk-based assessment of soil and groundwater quality in the Netherlands: Standards and remediation urgency [J]. Risk Analysis, 1999, 19(6): 1235-1249
- [34] Lijzen J P A, Baars A J, Otte P F, et al. Technical evaluation of the intervention values for soil/sediment and groundwater. Human and ecotoxicological risk assessment and derivation of risk limits for soil, aquatic sediment and

- groundwater [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 2001
- [35] Directorate General for Environmental Protection, Ministry of Housing, Physical Planning and Environment. Premises for risk management: Risk limits in the context of environmental policy [R]. The Hague: Directorate General for Environmental Protection, Ministry of Housing, Physical Planning and Environment, 1989
- [36] Van B P, Quik J T K, Brand E, et al. CSOIL 2020: Exposure model for human health risk assessment through contaminated soil. Technical description [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 2020
- [37] Bakker J, Lijzen J P A, Van W H J, et al. Site-specific human risk assessment of soil contamination with volatile compounds [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 2009
- [38] Breemen E M, Lijzen J P A, Otte P F, et al. National land use specific reference values: A basis for maximum values in dutch soil policy [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 2007
- [39] 魏旭. 荷兰土壤污染修复标准制度述评[J]. 环境保护, 2018, 46(18): 73-77
- Wei X. Review of soil pollution remediation standards of Netherlands [J]. Environmental Protection, 2018, 46(18): 73-77(in Chinese)
- [40] Power M, McCarty L S. A comparative analysis of environmental risk assessment/risk management frameworks [J]. Environmental Science & Technology, 1998, 32(9): 224A-231A
- [41] UK Department for Environment Food & Rural Affairs. Environmental Protection Act 1990: Part II A [R]. London: Environment and Forestry Directorate, 1990
- [42] Luo Q S, Catney P, Lerner D. Risk-based management of contaminated land in the UK: Lessons for China? [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90 (2): 1123-1134
- [43] UK Department of the Environment. Guide to risk assessment and risk management for environmental protection [R]. London: Department of the Environment, 1995
- [44] UK Environment Agency. Contaminated land exposure assessment (CLEA) tool [EB/OL]. (2015-09-07) [2022-02-26]. <https://www.gov.uk/government/publications/contaminated-land-exposure-assessment-clea-tool>
- [45] 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)
- [46] UK Environment Agency. Updated technical background to the CLEA model [R]. London: Environment Agency, 2009
- [47] 翁孙哲. 英国污染场地修复的立法与实践研究[J]. 云南大学学报(法学版), 2016, 29(3): 98-104
- [48] 王迪. 中英土壤污染防治法律制度比较研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2020: 8-20
- Wang D. Comparative study on Chinese and British legal systems for soil pollution prevention[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2020: 8-20 (in Chinese)
- [49] UK Department for Environment Food & Rural Affairs. Environmental Protection Act 1990: Part II A contaminated land statutor guidance [R]. London: The Controller of Her Majesty's Stationery Office, 2012
- [50] 张红振, 骆永明, 夏家淇, 等. 基于风险的土壤环境质量标准国际比较与启示[J]. 环境科学, 2011, 32(3): 795-802
- Zhang H Z, Luo Y M, Xia J Q, et al. Some thoughts of the comparison of risk based soil environmental standards between different countries [J]. Environmental Science, 2011, 32(3): 795-802(in Chinese)
- [51] 国家环境保护局. 土壤环境质量标准: GB15618—1995 [S]. 北京: 国家环境保护局, 1995
- [52] 可欣, 周燕, 张飞杰, 等. 污染场地修复药剂安全利用问题及对策[J]. 环境科学研究, 2021, 34(6): 1473-1481
- Ke X, Zhou Y, Zhang F J, et al. Problems and strategies of safe utilization of agents for contaminated sites [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34 (6): 1473-1481(in Chinese)
- [53] 国家环境保护总局. 工业企业土壤环境质量风险评价基准: HJ/T 25—1999 [S]. 北京: 国家环境保护总局, 1999
- [54] 姜林, 梁竞, 钟茂生, 等. 复杂污染场地的风险管理挑战及应对[J]. 环境科学研究, 2021, 34(2): 458-467
- Jiang L, Liang J, Zhong M S, et al. Challenges and response to risk management of complex contaminated sites [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34 (2): 458-467(in Chinese)
- [55] 周友亚, 姜林, 张超艳, 等. 我国污染场地风险评估发展历程概述[J]. 环境保护, 2019, 47(8): 34-38
- Zhou Y Y, Jiang L, Zhang C Y, et al. Development of risk assessment of contaminated sites in China [J]. Environmental Protection, 2019, 47(8): 34-38(in Chinese)

- [56] 《环境健康风险评估技术指南总纲》编制组.《环境健康风险评估技术指南总纲(征求意见稿)》编制说明[EB/OL]. (2019-04-19) [2021-10-27]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/201904/t20190425\\_700961.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/201904/t20190425_700961.html)
- [57] 耿海清, 任景明. 决策环境风险评估的重点领域及实施建议[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(11): 40-44  
Geng H Q, Ren J M. Key areas and corresponding proposals of decision-making for environmental risk evaluation in China's mainland [J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(11): 40-44 (in Chinese)
- [58] 国家环境保护部. 污染场地风险评估技术导则:HJ 25.3—2014 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014
- [59] 王超, 李辉林, 胡清, 等. 我国土壤环境的风险评估技术分析与发展[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)
- [60] 陈梦舫. 污染场地健康与环境风险评估软件(HERA) [J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3): 344, 335, 399
- [61] 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: 中国环境出版集团, 2019
- [62] 姜林, 钟茂生, 梁竞, 等. 层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1034-1043  
Jiang L, Zhong M S, Liang J, et al. Application and benefit evaluation of tiered health risk assessment approach on site contaminated by benzene [J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 1034-1043(in Chinese)
- [63] 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(in Chinese)
- [64] 张晏. “公众”的界定、识别和选择——以美国环境影响评价中公众参与的经验与问题为镜鉴[J]. 华中科技大学学报(社会科学版), 2020, 34(5): 83-93  
Zhang Y. The definition, identification and selection of the public in public participation—Taking the experience and problems of public participation in environmental impact assessment in the United States as reference [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Social Science Edition), 2020, 34(5): 83-93(in Chinese)
- [65] 毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙. 环境基准向环境标准转化的机制探讨[J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4422-4427  
Bi C C, Wang T Y, Lv Y L. Mechanism for transformation of environmental criteria into environmental standards in China [J]. Environmental Science, 2012, 33(12): 4422-4427(in Chinese)
- [66] 程思莹. 中美公众参与环境影响评价法律制度的比较研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014: 8-42  
Cheng S Y. A comparative study of public participation on the environmental impact assessment legal system between Chinese and American [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014: 8-42(in Chinese)
- [67] 陈廷辉, 林贺权. 环境健康风险规制的法律路径——以科学不确定性为视角[J]. 中国环境管理, 2021, 13(3): 153-158  
Chen T H, Lin H Q. Legal path for environmental health risk regulation: Perspective on the scientific uncertainty [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(3): 153-158(in Chinese)
- [68] 国家环境保护部. 环境污染物人群暴露评估技术指南:HJ 875—2017 [S]. 北京: 中国环境出版集团, 2017
- [69] 中国生态环境部. 建设用地土壤污染风险评估技术导则:HJ 25.3—2019 [S]. 北京: 中国环境出版集团, 2019
- [70] Baccarini D, Archer R. The risk ranking of projects: A methodology [J]. International Journal of Project Management, 2001, 19(3): 139-145
- [71] Ward S. Assessing and managing important risks [J]. International Journal of Project Management, 1999, 17(6): 331-336
- [72] 杨蕾, 马宗伟, 毕军. 比较风险评价在环境风险管理中的应用[J]. 中国环境管理, 2019, 11(3): 94-99  
Yang L, Ma Z W, Bi J. Application of comparative risk assessment in environmental risk management [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019, 11(3): 94-99(in Chinese)
- [73] 冯霞. 环境风险管理中比较风险评价法的应用[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(2): 24-26  
Feng X. Application of comparative risk evaluation in environmental risk management [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(2): 24-26(in Chinese) ◆