

# 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

吴颐杭, 杨书慧, 刘奇缘, 屈雅静, 陈义祥, 赵文浩, 陈海燕, 马瑾\*

中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

**摘要:** 土壤环境基准与标准是开展土壤环境保护与管理的基础。荷兰是世界上较早开展污染土壤风险管控与土壤环境基准研究的发达国家之一, 本文以荷兰为例, 综述其土壤环境基准与标准研究, 以期为我国土壤环境基准制定提供参考。通过分析荷兰建立的有关土壤环境保护与管理的政策与法规, 系统梳理已经制定的基于保护人体健康的土壤环境基准与标准, 从人体毒理学基准、用地类型、暴露途径以及暴露参数四方面阐述荷兰土壤环境基准的制定方法, 最后提出对我国土壤环境基准研究的建议。荷兰较早制定了有关土壤修复的法案, 形成了以土壤修复和可持续管理为主的法律体系, 建立了以干预值和最大值为主的标准体系, 并确定了土壤环境基准推导的理论方法。我国应完善土壤污染防治的法规标准体系, 开展符合区域具体情况、多种用地方式下的精细化土壤环境基准研究, 加强本土化暴露评估模型研究, 建立土壤环境基准数据库与优控污染物名录。

**关键词:** 荷兰; 土壤环境基准; 土壤环境标准; 健康风险

中图分类号: X32 文章编号: 1001-6929(2022)01-0265-11

文献标志码: A DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.08.11

## Research on Soil Environmental Criteria and Standards for Human Health in the Netherlands and Its Enlightenment to China

WU Yihang, YANG Shuhui, LIU Qiyuan, QU Yajing, CHEN Yixiang, ZHAO Wenhao, CHEN Haiyan, MA Jin\*

State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

**Abstract:** Soil environmental criteria and standards are the bases for soil environmental protection and management. However, the research on soil environmental criteria in China is relatively insufficient. The Netherlands is one of the first developed countries in the world to carry out research on the risk control of contaminated soil and soil environmental criteria. The Netherlands was taken as an example and its soil environmental criterion system was studied in this work. It was hoped that this article could provide a reference for the formulation of soil environmental criteria in China. By analyzing the soil environmental protection and management policies and regulations in the Netherlands, systematically reviewing the soil environmental criteria and standards based on the protection of human health, and elaborating the formulation methods of soil environmental criteria from four aspects: human toxicology criteria, land use types, exposure pathways and exposure parameters, several suggestions for the study of soil environmental criteria in China were put forward. Compared with China, the Netherlands enacted the bill on soil remediation earlier, formed a comprehensive legal and standard system focusing on soil remediation and sustainable management, and established a theoretical method for deriving soil environmental criteria. In China, it's necessary to improve the legal and standard system for soil pollution and control. In addition, it is of great significance to carry out refined study of soil environmental criteria in accordance with the specific conditions of the region under various land use modes. Furthermore, research on localized exposure assessment models should be strengthened. Finally, a soil environmental criterion database and a list of optimally controlled pollutants need to be established.

**Keywords:** the Netherlands; soil environmental criteria; soil environmental standards; health risk

收稿日期: 2021-04-26 修订日期: 2021-08-02

作者简介: 吴颐杭(1998-), 女, 四川南充人, [yihangwu98@163.com](mailto:yihangwu98@163.com).

\* 责任作者, 马瑾(1978-), 男, 山西临汾人, 研究员, 博士, 博导, 主要从事土壤环境与健康研究, [majin@craes.org.cn](mailto:majin@craes.org.cn)

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2019YFC1804601)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2019YFC1804601)

土壤是人类赖以生存和发展的基础,能提供人类所需的营养物质与生存空间<sup>[1]</sup>。然而土壤污染已成为严重影响人类健康和环境安全的重要因素<sup>[2-4]</sup>,全球每年大约有 900 万人因水、空气和土壤污染而死亡<sup>[5]</sup>。环境基准是环境因子(污染物质或有害要素)对人体健康与生态系统不产生有害效应的剂量或水平,包括水环境基准、大气环境基准及土壤环境基准等<sup>[6]</sup>。在污染场地管理中通常使用土壤环境基准来评估是否需要采取进一步行动或提供土壤修复目标,从而保护环境和人体健康<sup>[7]</sup>。

20 世纪 80 年代以来,美国、英国、荷兰和加拿大等国家陆续开展了基于风险的土壤环境基准研究<sup>[8-13]</sup>,形成了较为完备的土壤环境基准体系<sup>[14]</sup>。1996 年,美国制定了保护人体健康的土壤筛选值(Soil Screening Levels, SSLs)<sup>[15]</sup>。同年,加拿大也制定了保护人体健康的土壤质量指导值(Human Health soil Quality Guidelines, SQG<sub>HH</sub>)与保护生态受体的土壤质量指导值(Environmental Soil Quality Guidelines, SQG<sub>E</sub>),并取二者最小值为最终的 SQG<sup>[16]</sup>。1999 年,澳大利亚制定了健康调查值(Health Investigation Levels, HILs),并于 2013 年更新了制定 HILs 时考虑的用地类型与暴露途径等<sup>[17]</sup>。英国于 2009 年和 2014 年分别制定了土壤指导值(Soil Guideline Values, SGVs)与第 4 类筛选值(Category 4 Screening Levels, C4SLs)<sup>[18-20]</sup>。尽管不同国家制定 SSLs、SQG<sub>HH</sub>、HILs、SGVs 和 C4SLs 的具体方法有所差异,但推导的科学依据均是使污染物浓度低于这些值时,不会对人体产生有害的健康效应。此外,这些值均不具有强制性,且没有考虑其他政策或经济因素,因此在科学意义上等同于我国保护人体健康的土壤环境基准。

荷兰是欧盟成员国中率先开展土壤保护立法的国家之一<sup>[21]</sup>,在土壤环境基准研究方面处于领先地位。首先,荷兰较早地认识到土壤污染的严重性以及土壤环境标准的重要性,建立了完善的法规标准体系,并率先将土壤环境标准作为土壤立法的一部分<sup>[22]</sup>。其次,荷兰成立了多个组织机构以支持土壤环境基准的研究以及基准向标准的转化,研究机构(国家公共卫生与环境研究所)、专业组织(土壤保护技术委员会)与政府部门(基础设施与环境部)相辅相成,为土壤环境基准与标准的制定奠定了基础<sup>[23-24]</sup>。此外,荷兰制定土壤环境基准的理论方法也在不断改进,从基于背景浓度与专家判断转变为以风险评估为基本原则,使得其土壤环境基准保持先进性与科学性<sup>[25]</sup>。荷兰的土壤环境标准以及土壤环境基准推导方法也已经被斯洛伐

克、波兰、法国、智利、巴西等国家广泛采用<sup>[26-29]</sup>。

当前,我国土壤环境总体状况不容乐观,根据我国首次《全国土壤污染状况调查公报》,全国土壤调查点位的污染超标率为 16.1%<sup>[30]</sup>,对农业生产、食品安全以及人体健康产生威胁<sup>[31]</sup>。因此,我国高度重视土壤污染防治与污染场地管理<sup>[32]</sup>。土壤环境基准是土壤环境保护和管理的基石与根本,为土壤污染防治提供科学依据<sup>[33-34]</sup>,我国也在积极开展土壤环境基准与标准研究。21 世纪初,我国学者开始对基于风险的土壤环境基准研究进行初步探索,此后逐渐推导了铅、苯并[a]芘、镉等污染物的土壤环境基准<sup>[35-39]</sup>。国家层面上,原环境保护部于 2010 年和 2016 年分别启动了环保公益项目“环境基准制定预研究”与国家环境基准管理项目,提出我国应分别制定保护人体健康、生态受体、农产品安全以及地下水的土壤环境基准,并将基准研究上升为国家统一规范<sup>[34,40]</sup>。2018 年生态环境部首次发布了农用地与建设用地的土壤污染风险管控标准。然而,由于土壤环境介质的复杂性以及我国土壤类型的多样性,我国土壤环境基准研究基础仍十分薄弱,缺少系统的理论方法体系及本土参数等。因此,我国正在开展“场地土壤环境风险评估方法和基准”“场地土壤污染物环境基准制定方法体系及关键技术”等多个国家重点研发项目,以支持土壤环境基准研究。该文以荷兰为例,对其土壤环境基准与标准研究进行系统梳理,以期为我国土壤环境基准研究提供参考。

## 1 荷兰土壤环境管理政策与法规概述

20 世纪 70 年代末,荷兰莱克尔克发生住宅区土壤污染事件,该事件推动了荷兰制定土壤污染防治政策法规<sup>[22]</sup>。1983 年,荷兰政府颁布了《临时土壤修复法》(Interim Soil Remediation Act)及配套法规《土壤修复指南》(Soil Remediation Guideline)<sup>[41]</sup>。当时荷兰政府预计只有少数受污染场地,因此假定土壤污染问题可以完全解决并在《临时土壤修复法》中引入了“多功能”修复原则,即修复后的土地可适用于多种用途<sup>[22]</sup>。“多功能”原则也成为荷兰土壤政策和制定土壤质量标准的指导原则。1987 年,荷兰政府颁布了《土壤保护法》(Soil Protection Act)以防止土壤污染,并提出了污染者付费原则<sup>[22,41]</sup>。1995 年 1 月 1 日,有关土壤修复的内容被纳入到《土壤保护法》中,从而废止了《临时土壤修复法》<sup>[22]</sup>。

20 世纪 80 年代后期,荷兰政府认为污染场地的数量有限。在 1989 年和 1993 年发布的《国家环境政策规划》(National Environmental Policy Plans)中,荷

兰对污染场地管理的目标仍是在 2010 年之前修复所有严重污染土壤<sup>[22]</sup>。然而 20 世纪 90 年代初期, 污染场地名录显示, 污染场地数量较大<sup>[22]</sup>。由于污染土壤的清理停滞不前、财政问题以及国家与地方政策之间的关系存在一系列问题, 1997 年发布的《国家环境政策规划》中对土壤质量要求进行了修正, 废止了“多功能”原则, 并采用根据具体的土地用途进行修复的原则。但这只适用于 1987 年 1 月 1 日以前受到污染的土壤, 对于 1987 年 1 月 1 日以后新出现的土壤污染仍采用“多功能”原则<sup>[22-23]</sup>。2006 年, 新《土壤保护法》和《土壤修复通令》(Soil Remediation Circular) 生效, 重点阐述了确定土壤污染严重性以及修复紧迫性的具体方法<sup>[42]</sup>。

2008 年, 荷兰新《土壤质量法令》(Soil Quality Decree) 生效。作为《土壤保护法》的一部分, 《土壤质量法令》规定了污染土壤的使用与再利用, 并指出需要在重新安置受污染土壤与最大限度地再利用污染土壤之间寻求平衡<sup>[22]</sup>。《土壤质量法令》的发布标志着荷兰的土壤政策发生了重大转变, 从土壤保护转向土壤可持续利用, 土壤环境管理职权从国家层面转向地方层面<sup>[43]</sup>, 《土壤保护法》也囊括了《土壤修复通令》中有关土壤修复的法规, 以及《土壤质量法令》中有关污染预防与土地可持续管理的法规<sup>[22]</sup>。2014 年, 荷兰基础设施与环境部向议会提交了《环境规划法》(Environment and Planning Act), 旨在进一步强化土地利用与环境保护之间的关系<sup>[44]</sup>, 该法案将于 2022 年正式生效<sup>[45]</sup>。

## 2 荷兰土壤环境基准与标准概述

### 2.1 通用土壤质量标准

在 1983 年发布的荷兰《土壤修复指南》中, 荷兰政府首次提出了土壤环境标准, 即 A、B、C 值。A 值与 C 值分别基于土壤背景浓度和专家判断得出, 当污染物浓度超过 A 值时则认为土壤受到污染, 超过 C 值则需要对污染土壤进行修复。B 值为 A 值与 C 值的平均值, 当污染物浓度超过 B 值时则需要对场地进行进一步调查。1987 年, 为与国际上采取基于风险的标准相一致, 荷兰开始通过风险评估和毒理学信息来评估和调整 A、B、C 值<sup>[41]</sup>。1989 年, 荷兰原住房、空间规划和环境部 (VROM) 发布了《风险管理前提》, 奠定了基于风险建立环境标准的基础<sup>[46]</sup>。1994 年, VROM 在《土壤保护法》中正式提出了基于风险的目标值与第一批共 70 种化学物质的干预值<sup>[47]</sup>。目标值是基于污染物对生态系统的潜在风险推导出的, 干预值则同时考虑对人体健康与生态系统的潜在风

险<sup>[41]</sup>。荷兰国家公共卫生与环境研究所 (RIVM) 选择严重人体风险浓度 (serious risk concentration for human, SRC<sub>human</sub>) 与严重生态风险浓度 (serious risk concentration for ecological, SRC<sub>eco</sub>) 的最小值作为严重风险浓度 (SRC)。但当二者中的最小值存在较大不确定性时, 则选择不确定性较小的数值作为 SRC<sup>[25]</sup>。RIVM 制定 SRC 的过程仅是干预值正式发布的科学阶段, 荷兰土壤保护委员会 (TCB) 与荷兰卫生理事会将对 RIVM 推导出的 SRC 进行审查, 在考虑政策问题之后才能作为干预值加以执行<sup>[47]</sup>。SRC<sub>human</sub> 是指在带花园的住宅情景下人体暴露量等于人体毒理学最大允许限值 (human-toxicological maximum permissible risk, MPR<sub>human</sub>) 时的土壤污染物浓度, 在科学意义上等同于我国基于人体健康的土壤环境基准<sup>[48]</sup>。干预值是通用的土壤质量标准, 用于将 1987 年之前污染的土壤界定为严重污染土壤, 如果大于 25 m<sup>3</sup> 的土壤中污染物浓度超过干预值, 则土壤处于严重污染状态<sup>[47]</sup>。此时, 原则上需要对污染土壤进行修复, 但首先需要根据土壤污染物浓度超过干预值的程度确定修复紧急性<sup>[49]</sup>。根据荷兰《土壤保护法》, 土壤中污染物浓度超过干预值时可能会对人体健康或生态系统产生潜在风险, 但对人体健康影响的潜在风险仍然未知, 因而还需要进一步调查<sup>[50]</sup>。当污染物浓度未超过干预值时, 则需要对土地进行可持续管理。

1997 年和 1999 年, 荷兰《土壤保护法》纳入了第 2、3、4 批次化学物质的土壤环境标准<sup>[41]</sup>。RIVM 为第 2、3、4 批次的化学物质提出了干预值建议, 但荷兰政府并未全部制定干预值, 而是给部分物质提出了严重污染指示水平 (indicative levels for severe contamination)<sup>[51]</sup>。这是因为部分化学物质还没有可用的标准化的测量和分析法规, 或是 RIVM 推导这些物质的建议干预值时所采用的生态毒理学数据很少。自干预值公布以来, 荷兰污染土壤管理政策已经发生改变, 科学数据也在不断更新, 因此, 为基于最新的政策与科学依据制定干预值, 1999 年荷兰环境评估局委托 RIVM 开展了“土壤污染干预值技术评估”项目。2001 年, 根据该项目的结果, RIVM 发布了一系列关于评估 CSOIL 模型与 MPR<sub>human</sub> 的报告, 并提出了第 1 批次化学物质经评估后的干预值建议<sup>[47, 52-54]</sup>。

2006 年, 荷兰以土壤背景值取代目标值<sup>[21, 55]</sup>。土壤背景值是根据未污染的自然和农业土壤中化学物质的含量确定的<sup>[56]</sup>。当土壤中化学物质的浓度低于背景值, 则土壤是未受污染且可持续利用的, 适合于任何用地类型。背景值与健康风险没有科学关系, 但在

背景值浓度以下,土壤污染物产生的健康风险是可以忽略的,并能够保证食品的安全生产<sup>[50]</sup>.2012年,RIVM对第2、3、4批次中16种优先控制化学物质的干预值进行评估,并提出了干预值建议<sup>[57]</sup>.2013年,荷兰政府对部分干预值进行了更新<sup>[22]</sup>.

## 2.2 可持续管理的土壤环境基准与标准

由于土壤管理政策的转变,1999年,RIVM根据风险评估方法确定了8种金属、PAHs及DDT等难迁移污染物的特定土地用途的修复目标(soil-use-specific remediation objectives, SRO)<sup>[58]</sup>.由于2008年《土壤质量法令》的生效,SRO被背景值和最大值代替<sup>[42]</sup>.《土壤质量法令》中引入了可持续管理原则并纳入了针对不同土地用途制定的通用最大值(generic maximal values, GMV).GMV包括居住用地最大值以及工业用地最大值<sup>[25,59]</sup>,其用途是管理土壤的再利用、改善污染土壤质量以及设定特定土地用途的修复目标<sup>[42,50]</sup>.如果土壤中污染物的浓度高于工业用地最大值,则该土地不适合再利用<sup>[25]</sup>.

原则上,荷兰地方政府可以使用GMV对轻度污染土壤的再利用进行评估,并作为表层污染土壤的修复目标.但当受到轻度污染的土壤范围较大,或当地土壤的背景浓度高于全国范围的背景浓度时,GMV并不适用,此时地方政府可以自行制定地方最大值(local maximal values, LMV)<sup>[25]</sup>.LMV的用途与背景值和GMV相同.如果地方政府制定了LMV,则LMV将取代住宅和工业用地的通用最大值.在确定LMV时,可以对用地方式进行更详细的划分,而不是仅考虑住宅和工业用地<sup>[50]</sup>.LMV的保护级别有3种选择:①保护水平以及土壤污染物浓度均严于GMV;②保护水平与GMV的保护水平一致,但由于可将生物可利用性纳入考虑而导致污染物限值更为宽松;③保护水平低于GMV的保护水平且土壤污染物限值更宽松<sup>[60]</sup>.GMV和LMV应确保在相应用地类型下土壤是可持续利用的,重点是保护人体健康以及防止对生态系统的结构和功能产生不良影响<sup>[50]</sup>.

GMV或LMV均是以参考值(reference values, RV)为基础制定的.GMV是VROM根据RIVM推导出的RV而制定的.根据标准制定和土壤质量评估小组(NOBO)的要求,RIVM于2006年正式发布参考值<sup>[61]</sup>.RV是与用地类型相关的土壤中允许的污染物浓度,当土壤中污染物浓度低于相应用地类型下的RV时,该土地将满足此种用地方式下的所有要求.推导RV时,对所有土地利用方式都需要考虑人体健康风险和生态风险<sup>[61]</sup>.RV仅适用于难迁移污染物,

挥发性物质没有推导出RV,这是因为对挥发性污染物,其他一些因素如地下水位深度、建筑物类型等对RV推导的影响比土地利用方式的影响更大.此外,挥发性物质向地下水的扩散也很重要,但这些还没有包括在RV的推导过程中<sup>[61]</sup>.

RV是RIVM根据科学的程序提出的数值,最大值则是具有法律效力的标准.通常最大值与参考值是相等的,但由于政策考虑,部分化合物的参考值与最大值存在一定差异.例如,其他绿地、建筑、基础设施和工业用地土壤中铅的参考值为510 mg/kg,鉴于该值与铅的干预值(530 mg/kg)差异很小,因此基于政策考虑确定工业用地土壤中铅的最大值为530 mg/kg. Ba、Be、Cu等基于科学计算的参考值与最大值也存在差异<sup>[61]</sup>.基于以上分析,笔者认为RV在科学意义上也等同于我国的土壤环境基准.综上,该文的基于健康风险的土壤环境基准包含保护人体健康的参考值以及SRC<sub>human</sub>.荷兰土壤环境标准分析如表1所示.

表1 荷兰重要土壤环境标准简述<sup>[50]</sup>

Table 1 Brief descriptions of important soil environmental standards in the Netherlands<sup>[50]</sup>

土壤环境标准	目的	代表的风险水平	土壤污染程度	超出后果
土壤背景值	为清洁土壤指定适合于各种用途的界限,是标准框架的底限	无风险	清洁土壤	用作自然与农用地的修复目标,还用做土壤的再利用标准
居住与工业用地最大值	确定土壤再利用的可能性,住宅和工业用地方式下土壤污染物浓度的上限	无风险	轻度污染	与背景值类似,用作居住和工业用地的修复目标以及再利用标准.省和市可以制定地方最大值,并使用土壤风险工具箱进行测试
土壤干预值	处理土壤污染的标准值,指示轻微污染和严重污染土壤之间的分界线	潜在风险	严重污染	如果超过这一阈值,必须根据修复标准确定修复紧急性

## 2.3 土壤环境标准与土壤污染物浓度的关系

由于不同土壤环境标准所代表的风险水平以及不同用地方式下所允许的污染物浓度存在差异,因此不同土壤环境标准所代表的土壤污染物浓度也有区别.背景值是基于测量出的土壤中污染物浓度得出的,并未采取基于风险的方法,因此背景值所代表的污染物浓度是一个固定的数值<sup>[60]</sup>.最大值与土地利用方式相关,由于居住用地最大值与工业用地最大值已经阐

明了土地利用方式,因而这两个通用的最大值所代表的土壤污染物浓度也是固定的,GMV的浓度范围必须在背景值与干预值之间.LMV适用的土地利用方式由地方政府自行确定,因此LMV代表的土壤污染物浓度并不固定,浓度范围通常也在背景值与干预值之间,特殊情况下,LMV可以高于干预值.干预值是基于带花园的住宅这一确定的土地利用方式推导出的,因此干预值代表的土壤污染物浓度通常是确定的.不同土壤环境标准与土壤污染物浓度的关系见图1.由图1可知,在特定情况下,LMV和工业用地最大值代表的污染物浓度可以高于修复标准中的污染物浓度,例如,非敏感用地所对应的LMV或工业用地最大值可能高于敏感用地的修复标准.

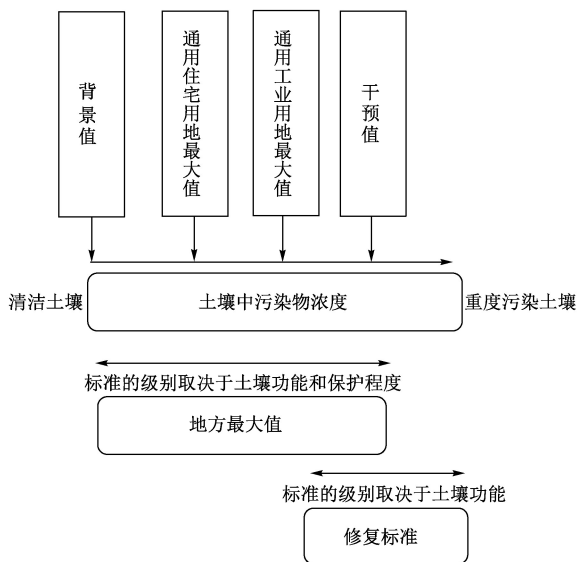


图1 土壤环境标准与土壤污染物浓度的关系<sup>[60]</sup>

Fig.1 Relationship between soil environmental standards and soil pollutant concentrations<sup>[60]</sup>

### 3 荷兰土壤环境基准制定

自美国科学院提出风险评估的框架后,基于风险的土壤环境基准研究逐渐成为普遍趋势.健康风险评估利用污染物的归趋和迁移以及人体暴露评估模型,可定量估计人体健康风险<sup>[62]</sup>,也可通过健康风险评估反推人体土壤污染物暴露量等于人体健康毒理学基准(人类长期接触单一化学物而不会产生重大健康风险的污染物摄入量)时的污染物最大浓度,即为基于健康风险的土壤环境基准<sup>[45]</sup>.1994年荷兰开发了CSOIL模型用以推导干预值<sup>[63]</sup>,并于2020年对其进行了更新<sup>[45]</sup>.1996年,针对具体场地挥发性污染物室内蒸气入侵的风险评估,荷兰开发了VOLASOIL模型<sup>[64]</sup>.保护人体健康的参考值与 $SRC_{human}$ 均是根据

CSOIL模型推导得出的,二者仅是在保护水平以及暴露情景等方面存在差异.

#### 3.1 人体毒理学最大允许限值( $MPR_{human}$ )的确定

根据污染物对人体健康的毒性效应,可将污染物划分为阈值污染物与非阈值污染物<sup>[65]</sup>.为了确保人们不会因暴露于土壤中的污染物而产生不可接受的风险,RIVM已经设定了最大暴露剂量的限值 $MPR_{human}$ . $MPR_{human}$ 为人体每天每千克体重所能接受的污染物暴露剂量<sup>[60]</sup>,是推导 $SRC_{human}$ 与保护人体健康参考值的人体毒理学基础.阈值污染物的 $MPR_{human}$ 可表示为每日可耐受摄入量(tolerable daily intake,TDI)或空气中的可耐受浓度(tolerable concentration in air,TCA),而非阈值污染物的 $MPR_{human}$ 定义为导致产生一定致癌风险的污染物摄入量 $[\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})]$ (以体质量计),致癌风险可表示为经口摄入的致癌风险(carcinogenic risk via intake, $CR_{oral}$ )或经空气的致癌风险(carcinogenic risk via air, $CR_{inhal}$ )<sup>[52]</sup>.

RIVM从部分国际研究机构中收集了有关污染物的毒理学数据,用于推导出具体化合物的 $MPR_{human}$ <sup>[52]</sup>.如果这些数据集不完整,则可以采用化合物对人体健康的毒性效应、动物毒性试验以及剂量-效应关系的研究,对这些研究中的数据进行严格评估并选择关键的毒理学终点,进而确定无可见不良效应水平(no observed adverse effect level,NOAEL).对于阈值化合物,采用不确定因子从NOAEL外推得到 $MPR_{human}$ ,而非阈值化合物则采用线性外推法得出 $MPR_{human}$ <sup>[52]</sup>.在推导保护人体健康的参考值和 $SRC_{human}$ 时, $MPR_{human}$ 的确定有所不同.对于阈值污染物,推导 $SRC_{human}$ 时不需要从 $MPR_{human}$ 中减去背景暴露,而推导保护人体健康的参考值时则需要考虑背景暴露<sup>[25]</sup>.对于背景暴露超过 $MPR_{human}$ 的污染物,NOBO的建议原则是背景暴露不能超过 $MPR_{human}$ 的50%<sup>[46,66]</sup>.对于非阈值污染物,推导 $SRC_{human}$ 时所采用的终生致癌风险为 $10^{-4}$ ,而推导保护人体健康的参考值采用的终生致癌风险则为 $10^{-6}$ <sup>[25]</sup>.

#### 3.2 用地类型

由于土地利用方式决定了场地上可能发生的活动、暴露于污染物的敏感人群、人群的暴露程度以及对土壤环境的保护程度<sup>[67]</sup>,因此,大多数国家在制定土壤环境基准时均考虑了不同的用地类型.荷兰在制定土壤环境基准时也考虑了多种用地方式,根据人体与土壤的接触程度和自产作物消费比例,划分了7种用地类型:①带花园的住宅;②儿童玩耍用地;③带菜园的住宅;④不带农场的农用地;⑤自然用地;

⑥具有自然价值的绿地、娱乐用地和城市公园;⑦其他绿地、建筑、基础设施和工业用地<sup>[46]</sup>.带花园的住宅为标准用地类型,假设花园可以用于种植作物,但花园更多的是具有休闲功能.儿童玩耍用地包括操场、草地、学校附近的花园以及其他儿童经常去的绿地.带菜园的住宅与带花园的住宅类似,但带菜园的住宅同地类型下人群可能摄入更高比例的自产作物.不带农场的农用地主要指没有农场或房屋的农业生产区域,包括草地、耕地以及农作物种植地等.由于农民具有较高的土壤暴露频率,因而 NOBO 建议将农民的土壤暴露作为职业暴露进行评估<sup>[61]</sup>.自然用地一般是指仅考虑人群室外暴露的自然保护区,具有自然价值的绿地、娱乐用地和城市公园用地则是包含许多娱乐设施的场景,其他绿地、建筑、基础设施和工业用地则包括生态价值较低的绿地以及土壤大部分被硬化的城市区域.在一片区域中,可能存在多种用地类型,NOBO决定以最主要而不是最敏感的土地用途作为该区域的代表用地类型,但可以为该区域中敏感的用地类型单独制定参考值<sup>[61]</sup>.

SRC<sub>human</sub> 是基于带花园的住宅得出的,不过 RIVM 为上述 7 种用地类型分别制定了参考值.由于不同用地类型的风险限值在数值上具有相似性,而且为了便于管理,荷兰最终为 2 类用地方式制定了最大值(见表 2)<sup>[25,60]</sup>.此外,不同用地方式下的敏感人群也存在一定的差异.荷兰制定基于健康风险的土壤环境基准

表 2 荷兰土壤环境标准及其适用的土地利用类型<sup>[25,60]</sup>

Table 2 Soil environmental standards and applicable land use types<sup>[25,60]</sup>

土壤环境标准	适用的土地利用类型
背景值	不带农场的农用地;自然用地;带菜园的住宅
居住用地最大值	带花园的住宅;儿童玩耍用地;具有自然价值的绿地、娱乐用地和城市公园
工业用地最大值	其他绿地、建筑、基础设施和工业用地

时,除铅外,多数情况下均是考虑人群 70 年的终生平均暴露,即 6 年的儿童期以及 64 年的成人期,因为铅通常是对儿童最敏感<sup>[25]</sup>.当其他绿地、建筑、基础设施和工业用地方式下只有成年人在场时,则不需要考虑儿童期的暴露.

### 3.3 暴露途径

采用 CSOIL 模型推导土壤环境基准时,需要考虑的暴露途径<sup>[45]</sup>如图 2 所示,主要包括土壤摄入、室内与室外皮肤接触土壤、吸入污染土壤颗粒、室内与室外空气吸入、摄入饮用水、淋浴时吸入污染蒸汽以及皮肤接触.尽管并非每一种暴露途径都对人体总暴露量有重大贡献,人体通过土壤摄入、室内空气吸入以及污染作物摄入途径的暴露量便可超过总暴露量的 90%,但荷兰在推导土壤环境基准的基本原则是所有暴露途径均纳入考虑<sup>[63]</sup>.不过这些暴露途径都是以带花园的住宅为基础,其他用地类型下不一定包括所有的暴露途径,如除带花园的住宅、带菜园的住宅

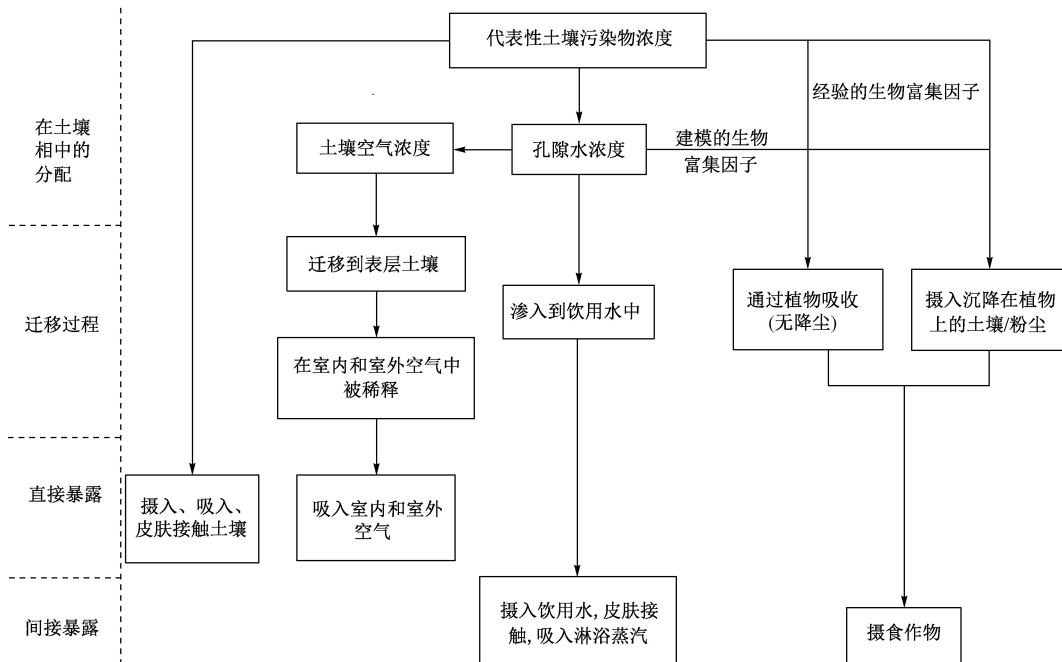


图 2 CSOIL 模型中的暴露途径<sup>[45]</sup>

Fig.2 Diagram showing the exposure pathways of CSOIL<sup>[45]</sup>

以及不带农场的农用地以外,其余 4 种用地类型均不考虑作物摄入途径。此外,由于仅为难迁移污染物推导出了参考值,而难迁移污染物一般难以挥发,因此在推导参考值时一般不考虑经空气暴露途径,如吸入污染物蒸气<sup>[61]</sup>。

### 3.4 暴露参数

暴露参数对土壤环境基准的构建十分重要<sup>[68]</sup>,由于各国的具体情况不同,因此暴露参数的选择也存在较大差异<sup>[69]</sup>。荷兰设定了标准的暴露情景,确定了不同用地方式下人群的暴露参数。标准暴露情景下土壤摄入途径的暴露频率与儿童玩耍用地、带菜园的

住宅用地以及不带农场的农用地暴露频率相同,而其他用地方式下,由于人群接触土壤机会有限,因此人为设定土壤摄入等途径的暴露频率为标准暴露情景的 1/5<sup>[61,70]</sup>。当考虑自产作物摄入途径时,标准暴露情景下假定人群自产作物摄入仅占作物总摄入量的 10%,带菜园的住宅用地方式下,由于人群自产作物摄入比例较高,因而 CSOIL 模型中默认 50% 的块根类作物来源于自家菜园,100% 的叶类来源于自家菜园。不带农场的农业用地方式下人群的自产作物摄入比例与标准暴露情景一致。CSOIL 模型中不同用地类型下默认的部分暴露参数见表 3。

表 3 CSOIL 模型中不同用地类型下默认的暴露参数<sup>[45,63]</sup>

Table 3 Default exposure parameters for the different land use types in CSOIL model<sup>[45,63]</sup>

用地类型	人群	暴露频率/ (d/a)	日均土摄入量/ (mg/d)	室内时间/h	室外时间/h	自产块根类作物 摄入比例/%	自产叶类作物 摄入比例/%
带花园的住宅	儿童	125	100	21.14	2.86	10	10
	成人	100	50	22.86	1.14		
儿童玩耍地	儿童	125	100	9.14	2.86	0	0
	成人	50	50	14.86	1.14		
带菜园的住宅	儿童	125	100	21.14	2.86	50	100
	成人	50	50	22.86	1.14		
不带农场的农用地	儿童	125	100	21.14	2.86	10	10
	成人	50	50	22.86	1.14		
自然用地	儿童	25	20	0	1	0	0
	成人	10	10	0	1		
具有自然价值的绿地、 娱乐用地和城市公园	儿童	25	20	0	1	0	0
	成人	10	10	0	1		
其他绿地、建筑、基础 设施和工业用地	儿童	25	20	6	1	0	0
	成人	10	10	6	1		

土壤性质参数会影响污染物的环境行为,进而对土壤环境基准产生较大影响,荷兰表层土壤的土壤类型存在较大差异<sup>[22]</sup>,为了考虑土壤性质的差异性,荷兰依据标准土壤制定土壤环境基准。标准土壤的 pH 为 6,有机质含量为 10%,黏粒含量为 25%。基于背景浓度与土壤黏粒、有机质含量之间的回归模型,荷兰给出了非标准土壤的土壤类型校正公式<sup>[71]</sup>。尽管 pH 是影响污染物生物有效性的一个重要因素,且容易测定,但 NOBO 认为土壤 pH 受管理方式等多种因素影响,因此没有将土壤 pH 纳入土壤类型校正公式中。土壤类型校正公式最初是为推导干预值而制定的,但后来也用于推导最大值时进行土壤类型校正<sup>[46]</sup>。

金属和有机物的土壤类型校正公式分别如式(1)(2)所示:

$$IV_{\text{soil}} = IV_{\text{standard soil}} \times \frac{a + b \times \text{clay} + c \times \text{OM}}{a + 25b + 10c} \quad (1)$$

$$IV_{\text{soil}} = IV_{\text{standard soil}} \times (\text{OM}/10) \quad (2)$$

式中:  $IV_{\text{soil}}$  为校正后土壤的干预值;  $IV_{\text{standard soil}}$  为标准土壤的干预值;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  均为与金属物质相关的常数;  $\text{clay}$  为评估土壤的黏粒含量,%;  $\text{OM}$  为评估土壤的有机质含量,%。

## 4 对我国土壤环境基准与标准研究的启示

通过分析荷兰的土壤环境政策、土壤环境基准与标准研究,笔者认为经过 40 年左右的发展,荷兰已经建立了健全的法律法规体系,形成了较为完备的土壤环境基准与标准的理论与方法体系。与发达国家相比,我国仍缺乏全面、系统的可持续土地管理规划<sup>[72]</sup>,土壤环境基准研究缺乏系统性与顶层设计,因此基于风险的土壤环境基准研究有待加强。

#### 4.1 完善土壤污染防治的法规标准体系

经过多年的研究与发展,荷兰多个部门之间协同配合建立了以土壤修复和土壤污染防治与可持续管理为主的法律与标准体系.我国虽然已经发布了《土壤污染防治行动计划》《国家环境基准管理办法(试行)》《土壤污染防治法》等多项法律法规,但2020年全国人民代表大会常务委员会执法检查组关于检查《土壤污染防治法》实施情况的报告指出,我国土壤污染防治的配套法规标准不健全.法律法规是标准制定和措施执行的核心原则和关键导向,因此,我国有必要加强土壤污染与管理的配套法律法规体系建设,如出台土壤环境基准制定技术指南、土壤环境基准管理办法等配套文件,使土壤环境基准研究规范化、统一化、公开化与透明化.此外,我国现行的土壤污染风险管控标准仅适用于土壤污染风险筛查与管制,对于污染土壤的修复目标并未做出详细规定,因此我国仍需完善适用于土壤污染风险管控与污染土壤修复的标准体系.

#### 4.2 因地制宜开展土壤环境基准研究

由于不同地区具体情况如土壤背景值以及土壤性质等存在较大差异,因此荷兰鼓励地方政府制定符合当地具体条件的地方最大值,并且地方最大值可以低于或高于国家最大值,充分体现了土壤不同于水和大气的特点.我国《土壤污染防治法》中指出,地方制定的土壤污染风险管控标准必须严于国家标准,但我国幅员辽阔,不同区域土壤性质差异较大,“一刀切”的管控方式不太符合实际情况,导致我国很多地区出现标准难以执行的局面.因此,我国必须因地制宜开展土壤环境基准研究,考虑土壤类型、地质条件、背景含量等差异制定不同区域的土壤环境基准,鼓励有条件的地方政府在充分考虑当地具体情况下制定土壤环境标准.

#### 4.3 开展多种用地方式下的土壤环境基准研究

荷兰在进行土壤环境基准研究时,考虑了7种用地方式.虽然我国已经颁布了建设用地与农用地的土壤污染风险管控标准,但农用地的风险管控标准以保护农产品安全为主要目的,并未考虑人体直接接触土壤所造成的健康风险.我国拥有庞大数量的农村人口,为保护这一群体,基于直接接触健康风险的农用地土壤环境基准研究必不可少.我国建设用地土壤污染风险标准只规定了两类用地的筛选值和管控值,但第1类用地的风险管控标准可适用于居住用地、中小学用地以及社区公园或儿童公园等.由于不同用地方式下如居住用地与公园用地的暴露频率、暴露途径等

有所不同,对这些用地方式采用相同的管控标准可能会产生过保护的情况,也未达到精细化研究的要求.因此我国仍需要划分更详细的土地利用方式并进行多种用地方式下精细化的暴露情景与暴露参数研究,进而推导出更具科学性、适用性的土壤环境基准.

#### 4.4 加强本土化暴露评估模型建立研究

荷兰为了促进土壤环境基准与标准的研究,已经建立了CSOIL、VOLASOIL等暴露评估模型,而且对模型及其参数进行不定期的回顾修订.但由于各国家建筑物类型、土壤性质以及人群行为方式等存在差异,导致直接应用其他国家的暴露评估模型会存在较大偏差.例如,荷兰的室内蒸气入侵评估模型适用于存在爬行空间(crawl space,土壤与房屋之间用于储存或进入管道、约0.3~0.9 m的中空区域)的建筑物,而我国多数建筑物不存在爬行空间.土壤性质影响污染物在土壤-植物之间的迁移,因而荷兰的污染物土壤-植物迁移模型不一定适用于我国.CSOIL模型还考虑了土壤孔隙水渗入地下水进而被人体直接饮用的暴露途径,但直接饮用地下水在我国并不是一种常见的暴露途径.从国家层面讲,《建设用地土壤污染风险评估技术导则》中推荐的暴露评估方法大多采用国外的方法,我国仍缺乏统一、权威、本土的暴露评估模型.因此,我国有必要在借鉴国外研究的基础上,结合我国具体国情,充分采用本土化研究建立适合推导我国土壤环境基准的暴露评估模型.

#### 4.5 建立土壤环境基准数据库与优控污染物名录

污染物毒性参数、暴露参数、建筑参数等基础数据是推导土壤环境基准的前提,荷兰已经在CSOIL模型中纳入了多种本土参数,而我国大部分参数都参考国外,本土参数匮乏.因此我国需要加快开展本土暴露参数研究,结合我国土壤特征积极进行污染物土壤-植物迁移研究,鼓励本土建筑与气象参数等研究,支持污染物剂量-效应研究,并结合多项研究成果建立我国土壤环境基准数据库.我国已经发布了85种污染物建设用地的风险管控标准,但是仅对少部分污染物开展了土壤环境基准研究,因此我国需要建立优控污染物筛选方法,确定优控污染物名录并制定相应的土壤环境基准,以支撑我国土壤环境标准的制修订.

#### 参考文献(References):

- [1] BREVIK E C, PEREG L, STEFFAN J J, et al. Soil ecosystem services and human health[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018, 5: 87-92.
- [2] LI C, SANCHEZ G M, WU Z F, et al. Spatiotemporal patterns and

- drivers of soil contamination with heavy metals during an intensive urban E N D, HAN Z G. A meta-analysis of heavy metals pollution in farmland and urban soils in China over the past 20 years[J]. *Jourization period (1989-2018) in southern China*[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 114075.
- [ 3 ] YUAN X H, XUE N D, HAN Z H. A meta-analysis of heavy metals pollution in farmland and urban soils in China over the past 20 years[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 101: 217-226.
- [ 4 ] ZHAO F J, MA Y B, ZHU Y G, et al. Soil contamination in China: current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2): 750-759.
- [ 5 ] VERMEULEN R, SCHYMANSKI E L, BARABÁSI A L, et al. The exposome and health: where chemistry meets biology[J]. *Science*, 2020, 367(6476): 392-396.
- [ 6 ] 环境保护部. 关于发布《国家环境基准管理办法(试行)》的公告[EB/OL]. 北京: 环境保护部, (2017-04-20)[2021-07-02]. [http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201704/t20170425\\_412875.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201704/t20170425_412875.htm).
- [ 7 ] CAVANAGH J E, OHALLORAN K. Overview of international soil criteria and derivation of numeric values [EB/OL]. Canterbury: Landcare Research, (2017-02-02)[2021-01-04]. <https://www.wasteminz.org.nz/wp-content/uploads/OVERVIEW-OF-INTERNATIONAL-SOIL-CRITERIA-AND-DERIVATION.pdf>.
- [ 8 ] ANTONIADIS V, SHAHEEN S M, LEVIZOU E, et al. A critical prospective analysis of the potential toxicity of trace element regulation limits in soils worldwide: are they protective concerning health risk assessment? a review[J]. *Environment International*, 2019, 127: 819-847.
- [ 9 ] MAHBUB K R, BAHAR M M, MEGHARAJ M, et al. Are the existing guideline values adequate to protect soil health from inorganic mercury contamination? [J]. *Environment International*, 2018, 117: 10-15.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] JENNINGS A A. Worldwide regulatory guidance values for surface soil exposure to carcinogenic or mutagenic polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 110: 82-102.
- [ 12 ] SEMENKOV I, KOROLEVA T. Heavy metals content in soils of Western Siberia in relation to international soil quality standards[J]. *Geoderma Regional*, 2020, 21: e00283.
- [ 13 ] SEMENKOV I N, KOROLEVA T V. International environmental legislation on the content of chemical elements in soils: guidelines and schemes[J]. *Eurasian Soil Science*, 2019, 52(10): 1289-1297.
- [ 14 ] KUPPUSAMY S, VENKATESWARLU K, MEGHARAJ M, et al. Risk-based remediation of polluted sites: a critical perspective[J]. *Chemosphere*, 2017, 186: 607-615.
- [ 15 ] US EPA. Soil screening guidance: technical background document [R]. Washington DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 1996: 1-6.
- [ 16 ] Canadian Council of Ministers of the Environment. A protocol for the derivation of environmental and human health soil quality guidelines[R]. Winnipeg: CCME, 2006: 116-122.
- [ 17 ] The National Environment Protection Council. Guideline on derivation of health-based investigation levels[R]. Canberra: NEPC, 2013: 1-19.
- [ 18 ] Department for Environment, Food & Rural Affairs. Environment Protection Act 1990: Part 2A Contaminated Land Statutory Guidance [R/OL]. Bristol: Department for Environment, Food & Rural Affairs, (2012-04-10)[2021-01-06]. <https://www.gov.uk/government/publications/contaminated-land-statutory-guidance>.
- [ 19 ] Environment Agency. Updated technical background to the CLEA model [R]. Bristol: EA, 2009: 7-29.
- [ 20 ] Department for Environment, Food & Rural Affairs. Development of Category 4 screening levels for assessment of land affected [R/OL]. Bristol: Department for Environment, Food & Rural Affairs, (2014-09-24)[2021-07-02]. <http://randd.defra.gov.uk/Default.aspx?Module=More&Location=None&ProjectID=18341#:~:text=Development%20of%20Category%204%20Screening%20Levels%20for%20assessment,managed%20appropriately%2C%20with%20the%20revised%20SG%20being%20>
- [ 21 ] RODRIGUES S M, PEREIRA M E, SILVA E F D, 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.
- [ 22 ] Ministry of Infrastructure and the Environment. Into Dutch soils [EB/OL]. Hague: Ministry of Infrastructure and the Environment, (2014-11-21) [2021-01-03]. [https://rwsenvironment.eu/publish/pages/126603/into\\_dutch\\_soils.pdf](https://rwsenvironment.eu/publish/pages/126603/into_dutch_soils.pdf).
- [ 23 ] SOUREN A F M M, POPPEN R S, GROENEWEGEN P, et al. Knowledge production and the science-policy relation in Dutch soil policy: results from a survey on perceived roles of organisations[J]. *Environmental Science & Policy*, 2007, 10(7/8): 697-708.
- [ 24 ] Ministry of Infrastructure and the Environment. Powerful tools for the implementation of Netherlands Soil Protection Policy [EB/OL]. Hague: Ministry of Infrastructure and the Environment, (2017-04-19) [2021-01-06]. <https://circabc.europa.eu/sd/a/53d8c8a2-6fbf-41fa-acfc-40008431999b/Presentation%20-%20Soil%20and%20groundwater%20screening%20values.pdf>.
- [ 25 ] SWARTJES F A, RUTGERS M, LIJZEN J P A, et al. State of the art of contaminated site management in the Netherlands: policy framework and risk assessment tools[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 427/428: 1-10.
- [ 26 ] CARLON C. Derivation methods of soil screening values in Europe: a review and evaluation of national procedures towards harmonisation [R]. Ispra: European Commission, 2007: 127-231.
- [ 27 ] CHERNOVA O V, BEKETS KAYA O V. Permissible and background concentrations of pollutants in environmental regulation (heavy metals and other chemical elements)[J]. *Eurasian Soil Science*, 2011, 44(9): 1008-1017.
- [ 28 ] LAM-ESQUENAZI E, KEITH NORAMBUENA B,

- MONTOFRÉ-BACIGALUPO Í, et al. Evaluation of soil intervention values in mine tailings in northern Chile[J]. *PeerJ*, 2018, 6: e5879.
- [29] SANTOS-ARAÚJO S N, SWARTJES F A, VERSLUIS K W, et al. Soil-plant transfer models for metals to improve soil screening value guidelines valid for São Paulo, Brazil[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(12): 1-24.
- [30] 环境保护部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. 北京: 环境保护部, (2014-04-17)[2021-01-06]. [http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417\\_270670.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm).
- [31] ZHOU Y, LIU Y S. China's fight against soil pollution[J]. *Science*, 2018, 362(6412): 298.
- [32] 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.
- [33] 李海生, 李鸣晓, 邹天森, 等. 持续创新, 打造我国生态环境科技2.0[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(9): 2035-2043.
- LI H S, LI M X, ZOU T S, et al. Continuing innovation, creating a 2.0 era of the eco-environmental technology in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(9): 2035-2043.
- [34] 白英臣, 葛峰, 黄薇. 进一步推进国家环境基准体系建设[N]. *中国环境报*, 2018-06-18.
- [35] 周启星, 罗义, 祝凌燕. 环境基准值的科学研究与我国环境标准的修订[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1): 1-5.
- ZHOU Q X, LUO Y, ZHU L Y. Scientific research on environmental benchmark values and revision of national environmental standards in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 1-5.
- [36] ZHANG S, SONG J, CHENG Y W, et al. Proper management of lead-contaminated agricultural lands against the exceedance of lead in agricultural produce: derivation of local soil criteria[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 321-330.
- [37] ZHANG S, SONG J, CHENG Y W, et al. Derivation of regional risk screening values and intervention values for cadmium-contaminated agricultural land in the Guizhou Plateau[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(8): 2366-2377.
- [38] 王国庆, 骆永明, 宋静, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究IV. 保护人体健康的土壤苯并[a]芘的临界浓度[J]. *土壤学报*, 2007, 44(4): 603-611.
- WANG G Q, LUO Y M, SONG J, et al. Study on soil environmental quality guidelines and standards IV. soil benzo[a]Pyrene threshold concentrations based on human health risk assessment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(4): 603-611.
- [39] 孙在金, 赵淑婷, 林祥龙, 等. 基于物种敏感度分布法建立中国土壤中锑的环境基准[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(4): 774-781.
- SUN Z J, ZHAO S T, LIN X L, et al. Deriving soils environmental criteria of antimony in China by species sensitivity distributions[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(4): 774-781.
- [40] 郑丽萍, 冯艳红, 张亚, 等. 基于生态风险的土壤环境基准研究概况: 2016年学术年会论文集[C]. 海口: 中国环境科学学会, 2016.
- [41] 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.
- [42] Ministry of Infrastructure and Water Management. Soil remediation circular 2013 [R/OL]. Hague: Ministry of Infrastructure and Water Management, (2013-07-01)[2021-01-04]. <https://rwsenvironment.eu/subjects/soil/legislation-and/soil-remediation>.
- [43] BOEKHOLD A E. Ecological risk assessment in legislation on contaminated soil in the Netherlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 406(3): 518-522.
- [44] Government of the Netherlands. Environment and Planning Act [R/OL]. Amsterdam: Government of the Netherlands, (2017-02-28)[2021-01-03]. <https://www.government.nl/documents/reports/2017/02/28/environment-and-planning-act>.
- [45] Ministry of Infrastructure and the Environment. CSOIL 2020: Exposure model for human health risk assessment through contaminated soil. Technical description [EB/OL]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, (2020-12-16)[2021-01-03]. <https://www.rivm.nl/publicaties/csoil-2020-exposure-model-for-human-health-risk-assessment-through-contaminated-soil>.
- [46] Ministry of Infrastructure and Water Management. Substantiation and policy choices for soil standards in 2005, 2006 and 2007 (in Dutch) [R]. Amsterdam: Standard Setting and Soil Quality Assessment, 2008: 15-69.
- [47] LIJZEN J P A, BARRS A J, OTTE P F, et al. Technical evaluation of the intervention values for soil/sediment and groundwater [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 2001: 13-74.
- [48] 吴丰昌. 中国环境基准体系中长期路线图[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2020.
- [49] POPESCU I, STĂNESCU R, BIASIOLI M, et al. Assessing human risks through CSOIL exposure model for a soil contamination associated to heavy metals[J]. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, 2013, 75(1): 81-94.
- [50] ROELS J M, VERWEIL W, ENGELEN J G M, et al. Health and safety in the environmental act: ratio and substantiation of current environmental quality standards (in Dutch) [R/OL]. Bilthoven: National Institute for public Health and the Environment, (2015-01-08)[2021-01-03]. <https://www.rivm.nl/publicaties/gezondheid-en-veiligheid-in-omgevingswet-ratio-en-onderbouwing-huidige-normen-omgevings>.
- [51] VROM. Circular on target values and intervention values for remediation [EB/OL]. Hague: Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, (2005-11-15)[2021-01-04]. [https://www.esdat.net/Environmental%20Standards/Dutch/annexS\\_12000Dutch%20Environmental%20Standards.pdf](https://www.esdat.net/Environmental%20Standards/Dutch/annexS_12000Dutch%20Environmental%20Standards.pdf).
- [52] BAARS A J, THEELEN P J C M, JANSSEN J M, et al. Re-

- evaluation of human-toxicological maximum permissible risk levels [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 2001: 7-15.
- [ 53 ] OTTE P F, LIJZEN J P A, OTTE J G, 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, 2001: 11-28.
- [ 54 ] RIKKEN M G J, LIJZEN J P A, CORNELESE A A. Evaluation of model concepts on human exposure: proposals for updating the most relevant exposure routes of CSOIL [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 2001: 9-10.
- [ 55 ] 葛峰, 徐珂珂, 刘爱萍, 等. 国外土壤环境基准研究进展及对中国的启示 [J]. 土壤学报, 2021, 58(2): 331-343.  
GE F, XU K K, LIU A P, et al. Progress of the research on soil environmental criteria in other countries and its enlightenment to China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(2): 331-343.
- [ 56 ] BRUS D J, LAMÉ F P J, NIEUWENHUIS R H. National baseline survey of soil quality in the Netherlands [J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(7): 2043-2052.
- [ 57 ] BRAND E, BOGTE J, BAARS B J, et al. Proposal for intervention values soil and groundwater for the 2nd, 3rd and 4th series of compounds [R/OL]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, (2013-01-25)[2021-01-03]. <https://www.rivm.nl/publicaties/proposal-for-intervention-values-soil-and-groundwater-for-2nd-3rd-and-4th-series-of>.
- [ 58 ] LIJZEN J P A, MESMAN M, ALDENBERG T, et al. Evaluation of the underpinning of the soil-use specific remediation objectives (in Dutch) [R/OL]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, (2003-04-23)[2021-01-03]. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/711701029.html>.
- [ 59 ] BRAND E, LIJZEN J, PEIJNENBURG W, et al. Possibilities of implementation of bioavailability methods for organic contaminants in the Dutch Soil Quality Assessment Framework [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 261: 833-839.
- [ 60 ] SenterNovem. Know the quality of your soil or aquatic sediment: clarifying the risks [R/OL]. Hague: Ministry of Infrastructure Environment, (2007-09-01)[2021-01-03]. <https://rwsenvironment.eu/subjects/soil/publications/know-the-quality>.
- [ 61 ] 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 (in Dutch) [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 2007: 9-52.
- [ 62 ] CHEN M F. Analytical integration procedures for the derivation of risk-based generic assessment criteria for soil [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal*, 2010, 16(6): 1295-1317.
- [ 63 ] BRAND E, OTTE P F, LIJZEN J P A. CSOIL 2000: an exposure model for human risk assessment of soil contamination [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 2007: 9-41.
- [ 64 ] BAKKER J, LIJZEN J P A, VAN-WIJNEN H J. Site-specific human risk assessment of soil contamination with volatile compounds [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 2008: 1-58.
- [ 65 ] BERG R, BOCKTING G J M, CROMMENTUIJN G H, et al. Proposals for intervention values for soil clean-up: second series of chemicals [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 1994: 2-20.
- [ 66 ] VERBRUGGEN E M J, BRAND E. Risk-based standards for PCBs in soil: proposals for environmental risk limits and maximum values [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 2014: 39-42.
- [ 67 ] European Union. Environmental quality standards (EQS) limit and guideline values for contaminated sites [R/OL]. Brussels: European Union, (2017-03-17)[2021-01-04]. [https://www.meteo.lv/fs/CKFinderJava/userfiles/files/EQS\\_limit\\_and\\_guideline\\_values.pdf](https://www.meteo.lv/fs/CKFinderJava/userfiles/files/EQS_limit_and_guideline_values.pdf).
- [ 68 ] 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.
- [ 69 ] PROVOOST J, CORNELIS C, SWARTJES F. Comparison of soil clean-up standards for trace elements between countries: why do they differ? [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2006, 6(3): 173-181.
- [ 70 ] BOCKTING G J M, SWARTJES F A, KOOLENBRANDER J G M, et al. Soil quality assessment system for building permit applications. Part I. Soil use-specific assessment methodology for human exposure [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 1994: 11-18.
- [ 71 ] SPIJKER J. The Dutch soil type correction [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 2012: 13-32.
- [ 72 ] LIU W, LIU S Y, LI X J, et al. Comparison of Chinese and Danish soil legislation based on soil heavy metal values in contaminated sites: a case study in Sichuan [J]. *Soil and Sediment Contamination*, 2020, 29(3): 355-368.

(责任编辑: 张蕊, 方利)