

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0558

龙涛, 林玉锁, 陈樯. 我国土壤环境基准研究的历程与展望[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(3): 273-281.

LONG Tao, LIN Yu-suo, CHEN Qiang. Progress and Prospect of Soil Environmental Criteria Research in China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(3): 273-281.

## 我国土壤环境基准研究的历程与展望

龙涛<sup>1,2</sup>①, 林玉锁<sup>1,2</sup>, 陈樯<sup>1,2</sup> (1. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 2. 国家环境保护土壤环境管理与污染控制重点实验室, 江苏 南京 210042)

**摘要:** 开展土壤环境基准研究是我国生态环境相关法律法规的明确要求, 对科学制定土壤生态环境标准具有重要意义。自 20 世纪 70 年代以来, 随着我国土壤环境容量研究、土壤环境质量标准制定等工作的推进, 土壤环境基准领域开展了大量的科学研究工作, 取得了较丰富的成果。但是由于土壤环境介质及其相关环境风险的复杂性, 目前我国科研与管理人员对土壤环境基准的概念、内涵、研究内容和研究方法等方面尚存在不同见解。当前, 在土壤环境管理进入风险管理时代的背景下, 土壤环境基准研究既需要基于我国已有的研究方法, 又需要密切结合风险评估方法开展。该研究对土壤环境基准的概念和内涵进行了探讨, 并建议将建立标准化方法体系、夯实本土数据基础作为近期土壤环境基准研究工作的重点。

**关键词:** 土壤; 环境基准; 风险评估

**中图分类号:** X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2023)03-0273-09

**Progress and Prospect of Soil Environmental Criteria Research in China.** LONG Tao<sup>1,2</sup>①, LIN Yu-suo<sup>1,2</sup>, CHEN Qiang<sup>1,2</sup> (1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Soil Environmental Management and Pollution Control, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** Research on soil environmental criteria is clearly demanded by laws and regulations in China. It is of great significance to provide scientific basis for soil environmental standards. Since the 1970s, during the study of soil environmental capacity and development of soil environmental quality standards, a lot of scientific researches have been carried out in the field of soil environmental criteria, and substantial results have been achieved. However, due to the inherent complexity of soil as an environmental media and its associated environmental risks, currently there are still different opinions on the concept, connotation, research content and research methods of soil environmental criteria among researchers and administrators in China. In the context that soil environmental management in China is progressing into the era of risk based management, soil environmental criteria research needs to be based on risk assessment methods, and incorporate the established methods in China's soil environmental science studies. This study explores the concept and connotation of soil environmental criteria, and recommends to define the soil environmental criteria as the content of soil contaminants that do not cause adverse effects on specific receptors, including the complete relationship between soil contaminant content (dose) and receptors' adverse effects under specific exposure conditions. At present, the focus of soil environmental criteria research in China is to establish a system of standardized research methods and to consolidate the basis of localized data.

**Key words:** soil; environmental criteria; risk assessment

开展土壤环境基准研究是我国生态环境相关法律法规的明确要求。《中华人民共和国环境保护法》第二章第十五条规定: 国家鼓励开展环境基准研究。《中华人民共和国土壤污染防治法》中明确指出, 国家支持对土壤环境背景值和环境基准的研究。《国家环境基准管理办法(试行)》要求制定土壤环境基准。开展土壤环境基准研究, 对深入落实生态环境法律法规要求, 科学制定土壤环境监管标

准, 强化土壤污染风险管控, 具有十分重要的意义。我国自 20 世纪 70 年代以来, 在土壤环境基准领域开展了大量科学研究, 取得了较丰富的成果。随着

收稿日期: 2022-07-20

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1801100); 国家环境基准管理项目(2020)

① 通信作者 E-mail: longtao@nies.org

土壤法的颁布实施,土壤环境基准研究作为国家法律支持开展的活动,将会迎来全新的发展阶段。同时,推进土壤环境基准研究作为生态环境管理部门的职责,其概念、内容及方法仍需要进一步凝聚共识,以此作为依法履职的依据。该文简要回顾了我国在环境基准与土壤环境基准领域的研究发展进程,探讨了土壤环境基准的概念与内涵,并针对我国近期土壤环境基准研究工作的重点提出了建议。

## 1 我国环境基准概念的形成与发展

我国环境基准的概念是于 20 世纪 70~80 年代逐步形成的。在 1972 年斯德哥尔摩“人类环境会议”之后,环境科学研究在我国逐步兴起<sup>[1]</sup>。1979 年,我国颁布《中华人民共和国环境保护法》,要求制定环境保护标准。如何运用科学方法支撑环境保护标准,尤其是环境质量标准的制定,成为当时环境科学研究的重点问题。世界卫生组织在环境卫生基准(Environmental Health Criteria)系列文件中将基准(criteria)定义为在由环境和受体所界定的特定情景下,污染物或其他因素的暴露与不良影响的风险或程度之间的关系<sup>[2]</sup>。我国学者在分析了发达国家环境质量标准 and 世界卫生组织环境卫生基准的经验后,提出“环境质量准则(criteria)或指南(guides)”是建立环境质量标准的依据<sup>[3-5]</sup>,并随后将此概念统一以“环境基准”表述。

环境基准这一概念被提出后,科学界对其具体技术内涵主要存在两种不同的理解,一种将其理解为污染物剂量/浓度与受体不利效应之间的完整关系(简称“完整关系”定义),另一种将其理解为污染物对受体不产生危害的最大剂量或浓度(简称“最大限值”定义)。“完整关系”定义主要受到世界卫生组织环境卫生基准的影响。如钮式如<sup>[6]</sup>提出,“环境基准是对环境中污染物的剂量(dose)及其所产生的效应或影响(effect)关系的科研资料的系统总结,包含了污染物剂量与受保护对象不良效应之间的完整关系”。卢纯惠<sup>[7]</sup>在介绍大气质量基准与标准时也指出,大气基准包括客观的实验或研究依据、接触浓度与时间及不同等级的危害 3 个要素,因此基准不是一种单一的限值(即至少需要以多维数据表格的形式呈现)。另一方面,由于环境质量标准通常以环境介质中污染物含量的最大允许浓度形式出现,因此有学者将环境基准解释为污染物在环境介质中不产生危害的极限值<sup>[8]</sup>,即“最大限值”定义。“最大限值”定义的产生可能主要受到美国水质基准(Water Quality Criteria)的影响<sup>[9]</sup>,即水体

中化学物质或条件预期不会对人或野生生物造成不利影响的具体水平。《中国大百科全书 环境科学卷》将环境基准定义为“环境中的污染物对特定的受体(通常为人或其他生物)不产生不良或有害影响的最大剂量(无作用剂量)或浓度,或者是对特定的受体产生不良或有害影响的最小剂量(阈剂量)或浓度”<sup>[10]</sup>。由于制定环境质量标准限值是环境基准研究的重要目标,因此我国多数学者倾向于将“最大限值”作为环境基准的内涵。但无论是“完整关系”定义还是“浓度限值”定义,均是基于毒理学、生态毒理学术语对环境基准的概念进行的解释,均认为环境基准属于剂量(浓度)-效应(反应)关系<sup>[4,9,11-12]</sup>。

需要指出,将 criteria 译作“基准”是我国环境科学领域逐步形成的一种翻译习惯,但在英文文献中,criteria 被广泛用于表示衡量的尺度,其在不同文件中的技术含义并不相同。正是由于世界卫生组织环境卫生基准和美国水质基准两种不同形式的 criteria 均被翻译为“环境基准”,并被解释为制定环境质量标准的依据,导致我国环境基准的概念从提出初期即存在不同的理解。因此,当使用我国的“环境基准”术语去收集整理国外相关研究成果时,便容易产生术语翻译和概念界定的混淆<sup>[11]</sup>。在土壤环境基准领域,由于国外普遍使用多层次、多目标的土壤污染物含量限值体系进行环境管理,提出了筛选值(screening values/levels)、触发值(trigger values)、指导值(guidelines)、目标值(target values)、干预值(intervention values)、行动值(action values)和预警值(precaution values)<sup>[13-18]</sup>等不同名称、不同概念、不同用途的管理限值,我国学者还提出修复基准等概念<sup>[19]</sup>。因此,对土壤环境基准而言,概念的界定更为复杂,学术界和管理者尚需进一步凝聚共识,逐步推动形成统一的概念与术语体系。

尽管对环境基准的定义存在不同认识,但我国学者对环境基准研究的定位存在共识,普遍认可环境基准研究的目的是服务于环境质量标准的制定,需要基于基准科学地制定标准。环境基准与环境质量标准的区别在于:环境基准研究是基于科学数据和方法开展的,具有科学性和客观性;环境质量标准的制定除了要以基准为依据外,还必须同时考虑经济、技术和社会等因素,在生态环境保护目标和当前经济技术可行性之间统筹决策。此外,不同于环境基准的科学研究属性,环境质量标准具有法律强制力,由国家有关部门颁布,是国家生态环境领域立法的组成部分。

由于环境基准研究基础薄弱,我国早期环境保护标准的制定、修订需要并且有必要通过等效采用国际相关标准值来完成<sup>[20-22]</sup>,定位为环境质量标准制定先导性研究的环境基准研究并未系统开展。2005年,国务院明确提出“科学确定环境基准”的要求<sup>[23]</sup>。在“十一五”(2006—2010)期间,我国启动了研究水污染特征和饮用水安全的国家重大科技专项项目,推动了水环境基准研究的发展,初步建立流域水环境质量基准方法体系框架<sup>[5]</sup>。2015年,《中华人民共和国环境保护法》<sup>[24]</sup>明确提出“国家鼓励开展环境基准研究”,这使得从国家层面界定环境基准研究的内容极为必要。在湖泊、流域水环境基准研究工作基础上,环境保护部于2010年启动环境基准研究,并设计了中国环境基准体系中长期路线图<sup>[20]</sup>。2017年,环境保护部发布《环境基准管理办法(试行)》<sup>[25]</sup>,定义环境基准为“环境因子(污染物或有害要素)对人体健康与生态系统不产生有害效应的剂量或水平”,按环境介质分为水环境基准、大气环境基准、土壤环境基准及其他基准<sup>[25]</sup>。该定义是基于水质基准研究方法建立的,延续了“最大限值”内涵和毒理学、生态毒理学基础。《中华人民共和国土壤污染防治法释义》对环境基准的定义基本与以上内容一致,并指出环境基准由污染物同特定对象之间的剂量反应关系确定<sup>[5]</sup>。

## 2 我国土壤环境基准概念形成过程

### 2.1 我国土壤环境质量标准研究历程

1976年起,我国学者在北京、南京、茂名以及全国11个污灌区开展了环境质量评价工作<sup>[26]</sup>。由于缺乏土壤环境质量标准,当时的土壤环境质量评价主要基于“污染起始值”,也就是污染物在土壤中的背景含量均值加/乘标准偏差。吴燕玉<sup>[27]</sup>在研究沈阳市郊污灌区环境质量评价方法时,提出了基于土壤污染起始值和农作物污染物含量进行土壤镉污染程度划分的方法。将土壤污染物含量低于污染起始值(背景含量)的污灌区划分为非污染,超过背景值但农作物生长及农产品质量可接受的划分为轻度污染,农作物质量受到影响的划分为中度、重度污染。该方法的提出对我国农用地土壤环境质量评价方法的建立产生了深远影响<sup>[28]</sup>。

在“六五”和“七五”期间,我国将“土壤环境容量研究”列为国家科技攻关课题,其目的之一是服务于土壤环境质量标准的制定<sup>[29]</sup>。土壤环境容量研究中开展了土壤污染物的生态效应和临界含量研究,主要考察进入农田土壤的污染物对作物、土

壤微生物、地下水和地表水等各个单体系的临界含量;再根据各个单体系的临界含量,经综合分析、模型计算等步骤,制定出多种污染物的综合土壤临界含量,可推荐作为土壤环境质量标准中的污染物含量限值<sup>[30]</sup>。其中,污染物-作物体系的临界含量又分为两类,分别对应食用农产品超标和农作物减产10%和20%的土壤污染物含量。土壤环境容量研究的试验区选择北京草甸褐土、辽河下游草甸棕壤、江西大吉山和湖南桃林红壤性水稻土,污染物为Cd、Hg、As、Pb、Cr和矿物油,采用小麦、水稻和大豆等我国常见作物,开展多组盆栽试验、田间试验和野外调查。研究建立的土壤污染物生态效应、临界含量等概念和研究方法属于我国首创<sup>[31]</sup>,为我国土壤环境质量标准的制定奠定了方法和数据基础。董克虞等<sup>[32]</sup>基于盆栽试验和北京周围污灌区的大田调查,研究了土壤含镉量与作物含镉量的相关性,尝试划分污染等级并提出划分标准。蔡士悦等<sup>[33-36]</sup>通过盆栽和小区投加试验,研究了在北京地区铅、汞、铜和矿物油4种指标在水稻或春小麦籽粒含量超过食品中允许量条件下的土壤临界含量以及作物减产不超过10%条件下的土壤临界含量。此外,我国在“六五”期间开展了“我国九省市主要经济自然区农业土壤及主要粮食作物中污染元素背景值研究”重点科技攻关项目,“七五”期间开展了“中国土壤环境背景值研究”重点科技攻关课题,获得了全国41个土类、61种元素的较为系统的背景值,并根据土壤地球化学背景值提出了镉、汞、砷、铅的标准建议值。总体而言,我国土壤环境质量标准相关科学研究开展较早,成果较丰富,但受到当时社会经济与科学技术水平限制,国家相关投入相对有限,相关研究主要由环保、农业等系统的专家分散开展,系统性的研究较为缺乏。

1995年,在总结吸收前期科技成果的基础上,我国首次制定并发布了《土壤环境质量标准》<sup>[37]</sup>,分3级给出了在不同pH分段、不同耕作方式下农用地土壤中镉、汞、砷、铅、铬、铜、镍、锌8种元素以及六六六、滴滴涕2种有机农药污染物的含量限值。其中,一级标准限值代表自然背景水平,主要基于全国土壤背景值数据制定,并用农业土壤背景值进行验证调整。二级标准限值代表一般农田应符合的水平,基于生态环境效应制定,考虑了土壤-植物、土壤-微生物和土壤-水体系(表1<sup>[38]</sup>)。二级标准中重金属限值的制定方法和数据主要来自土壤环境容量研究的成果,同时也采用了全国多个科研单位在土壤污染生态环境效应方面的研究成果,并

参考了部分国外资料。六六六、滴滴涕的限值,则通过基于农产品卫生标准、富集系数和土壤残留率的方法计算土壤临界含量获得。三级标准限值同

样采用生态环境效应法,主要基于土壤重金属含量较高情况下未对植物和环境产生危害的临界含量确定<sup>[38]</sup>。

表1 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》中土壤重金属二级标准值确定方法<sup>[38]</sup>

Table 1 Methods for determining the second-level standard value of soil heavy metals in Environmental Quality Standard for Soils (GB 15618—1995)

体系	内容	目的	标准
土壤-植物体系	农产品卫生质量	防止污染食物链,保护人体健康	食品卫生标准、饲料卫生标准或茶叶卫生标准
	作物生长	保持良好的生产力和经济效益	以减产10%以上为准
土壤-微生物体系	微生物效应:(1)生化指标;(2)微生物计数	保持土壤生态处于良性循环	(1)凡一种以上生化指标出现的变化>25%;(2)微生物计数指标出现的变化>50%
土壤-水体系	环境效应:(1)地下水;(2)地面水	不引起次生水环境污染	(1)生活饮用水卫生标准;(2)地面水环境质量标准

## 2.2 土壤环境基准概念的提出

土壤环境基准作为科技词汇是在土壤环境质量标准研究后期基于环境基准的定位提出的。20世纪80年代末至90年代初,随着土壤环境质量标准研究的开展,环境基准的概念开始被土壤环境科学研究领域吸收采用。在土壤环境容量研究后期,研究人员开始使用“土壤环境基准”术语来描述服务于土壤环境质量标准制定的污染物含量限值,其内涵基本等同于土壤污染物的综合临界含量,但没有对其概念进行准确界定<sup>[30-31]</sup>。1993年,钮式如、郑乃彤、夏家淇等来自环境保护、卫生防疫和医学系统的专家首次在中国环境科学学会推动成立了环境基准专业委员会,再次强调了环境基准在制定环境标准中定位和不可或缺的作用<sup>[39]</sup>。

在土壤环境质量标准的制定过程中,“基于基准制定标准”这一理念逐步得到广泛接受。根据土壤环境质量标准的制定思路,夏家淇<sup>[38]</sup>和王宏康<sup>[40]</sup>提出土壤环境质量基准的制定方法主要是地球化学法和生态环境效应法。地球化学法根据土壤中元素地球化学含量及分布特征推导土壤环境质量基准,生态环境效应法则根据土壤-植物、土壤-微生物和土壤-水体系中土壤污染物的最高允许浓度,分别推导各体系的土壤环境质量基准。经多体系综合考虑,选择各体系中的最小值,可确定土壤环境质量基准值。土壤环境质量基准结合社会、经济和技术等情况,经综合考虑,可确定土壤环境质量标准值<sup>[37]</sup>。因此,确定土壤环境背景值所使用的地球化学法、确定土壤污染物临界含量所使用的生态效应法等方法共同构成了当时我国土壤环境基准研究的方法体系。

但我国对土壤环境基准概念的研究较少。夏

家淇<sup>[41]</sup>将土壤环境基准研究分为生态基准和卫生基准两个方面,其中生态基准是土壤中污染物对生态系统的效应影响,是土壤环境基准研究的主体;同时,对污染物最大含量限值概念用“环境基准值”来表述。在介绍土壤环境质量标准时,夏家淇<sup>[41]</sup>曾经对“基准”和“基准值”进行了区分,大致对应“完整关系”和“最大限值”两种概念。2004年,夏家淇<sup>[42]</sup>将土壤环境质量基准解释为(土壤)环境中有害物质对特定对象(人或其他生物等)不产生不良或有害影响的最大剂量(无作用剂量)或浓度。该解释属于“最大限值”表述,尝试将“土壤环境质量基准”与“土壤环境基准”定义进行统一,以毒理学、生态毒理学术语提出土壤环境基准的定义,但该定义并不包含地球化学法。此外,同时期我国土壤环境背景值相关研究中采用地质科学术语,将土壤背景值范围上限也称为基准值[地球化学基线(geochemical baselines)被定义为一种元素在表层环境中浓度的自然变化],应注意区分<sup>[43-44]</sup>。

## 3 土壤污染风险评估方法的引进与应用

### 3.1 我国土壤环境风险评估方法研究

土壤环境质量标准发布后,诸多学者提出了有关标准的尚待解决的多种问题,主要包括未考虑重金属元素形态和有效态、铅定值过宽(未考虑健康效应)、污染物指标不足及难以适应各地土壤差异性等<sup>[45-46]</sup>。这类问题的存在一方面是由于标准的研究基础仍然相对薄弱,不可避免地存在系统性及方法学等的不足,另一方面则是因为土壤的内在属性、自然条件、使用功能和保护目标具有复杂性与多样性,对不同类型和利用方式的土壤,难以用统一的标准值进行质量评价。夏家淇<sup>[38]</sup>指出,由于我

国土壤类型众多,一般来说,低于二级标准值说明土壤未受到污染,而高于二级标准值则须经过调查监测才能判断土壤是否受到污染危害。该观点实际上指出了土壤环境质量的二级标准值发挥的是“风险筛选”作用,而不是直接起到判定质量是否合格的作用。但在当时,风险管理、风险评估的理念和方法尚未被我国土壤环境管理和研究领域学者所熟知。

进入21世纪之后,我国土壤环境保护工作开始同时面对农用地和建设用地的两个领域的土壤污染防治问题,有机类污染物在土壤环境领域受到关注,对人体健康、生态安全等的保护也日益受到重视<sup>[47-48]</sup>。随着我国城市化进程的快速发展,退役工业地块二次开发利用过程中暴露出的建设用地土壤环境污染风险日渐突出。建设用地土壤污染通常由工矿企业生产经营活动导致,污染物种类及污染程度远超过农用地,土壤和地下水的复合污染也极为常见,保护对象主要是人体健康,部分包括生态环境。此外,建设用地土壤污染防治的主要目标是实现土地安全利用,保护对象主要是地块内生活和人群的健康,关注的是地块土壤污染物通过经口摄入、呼吸吸入和皮肤接触等途径对居民或职业工作者造成的不利健康影响。因此,《土壤环境质量标准》不能适用于建设用地土壤污染防治的需要。

由于土壤的空间异质性、功能多样性、污染物的复杂性以及污染物对人体健康和生态系统产生不利影响方式的多变性,土壤环境质量很难通过相对统一的标准体系进行评价和保护。因此,在国际土壤环境管理领域的相关标准中,即使使用了“质量标准”的名称,也未强制使用“质量标准限值”对国家、地区尺度的土壤环境进行达标管理,而通常采用“风险筛选-风险评估”的层次化管理方式。“风险评估”相关理念自20世纪70年代起被美国逐步用于环境管理领域,90年代开始被我国环境科研工作者关注<sup>[49]</sup>。到2000年之后,我国对国外污染场地风险管理相关理念和标准的关注也逐渐增加,包括美国、加拿大、英国、荷兰、澳大利亚和丹麦等多国的土壤污染风险筛选标准及风险评估方法<sup>[46,50]</sup>,风险管理、层次化风险评估等思想在我国土壤环境管理领域被逐渐接受。在土壤环境标准方面,风险评估方法的影响主要表现在两个方面:一是不再使用标准值直接评价土壤环境质量,而转为利用筛选值等对土壤污染风险进行初判;二是采用人体健康风险评估、生态风险评估等方法制定筛

选值等限值,以及开展超筛选值后的污染场地土壤污染风险评估。夏家淇等<sup>[51]</sup>指出我国土壤环境质量标准的作用应该与国外筛选值、指导值等类似,也就是风险筛选,污染物含量低于限值时一般无污染危害,高于限值时则应进一步开展调研,确定是否有危害。王国庆等<sup>[52]</sup>在调研国外场地土壤环境管理方法的基础上,建议基于风险评估的方法,制定“土壤环境和健康质量指导值/标准”,主要服务于污染场地/土壤的判断和识别。国外用于制定土壤环境标准的人体健康风险评估方法、生态风险评估方法等在这一时期在我国受到了更广泛的关注<sup>[53-55]</sup>,并被应用于污染场地环境管理研究中<sup>[56-57]</sup>。

2018年,在原环境保护部“国家环境基准管理项目”的推动下,《保护生态安全的土壤环境基准制定技术指南》《保护人体健康的土壤环境基准制定技术指南》和《保护农产品安全的土壤环境基准制定技术指南》3份技术文件进行了公开征求意见。3份指南的征求意见稿将土壤环境基准定义为“保障生态安全、人体健康和农产品质量安全的土壤环境中污染物最大允许含量”,要求基于不同保护目标的风险评估方法进行基准的推导,对于保护水平也尝试作出规定,但3份指南最终并未正式发布。

### 3.2 土壤污染风险管控标准制定

2006年,原国家环境保护总局下达《土壤环境质量标准》修订任务,计划除了修订农用地土壤环境质量标准以外,借鉴国外建设用地土壤环境管理经验,通过人体健康风险评估方法,探索制定保护人体健康的建设用地土壤筛选值。《国家环境保护标准“十二五”发展规划》(环发[2013]22号)中指出,修订土壤环境质量标准,建立包括农用地、居住类用地和工业用地等的土壤环境质量标准体系。2014年,基于人体健康风险评估方法的HJ 25.3—2014《污染场地风险评估技术导则》发布,首次提出了我国建设用地污染地块人体健康风险评估的基本方法、模型和关键参数等,之后该标准于2019年进行了修订。

2016年,国务院发布《土壤污染防治行动计划》(简称“土十条”),提出以保障农产品质量和人居环境安全为出发点,坚持预防为主、保护优先、风险管控,对农用地土壤实施分类管理,对建设用地实施准入管理。2018年,我国发布《土壤污染防治法》,明确要求国务院生态环境主管部门根据土壤污染状况、公众健康风险、生态风险和科学技术水平,并按照土地用途,制定国家土壤污染风险管控标准,

加强土壤污染防治标准体系建设。在土壤环境质量标准制修订工作基础上,我国于2018年首次制定并发布农用地与建设用地土壤污染风险管控标准,分别规定两类用地的筛选值和管制值,适用于农用地的分类管理和建设用地的准入管理。两项国家土壤污染风险管控标准的实施充分反映了我国现阶段土壤环境管理以管控风险为主要目标的思路,区别于大气和水环境基于质量达标的管理要求,更能客观科学地体现土壤的非均质性等特点。农用地筛选值沿用土壤环境质量标准的部分限值,但明确了其“风险筛选”功能,采用了我国最新的野外调查数据,应用了基于概率分布的新方法。建设用地标准则全面采用国际通行的人体健康风险评估方法,部分采用我国本土化参数确定筛选值和管制值,填补了我国建设用地土壤环境标准的空白。

## 4 土壤环境基准研究存在的问题及建议

### 4.1 土壤环境基准相关概念尚需进一步凝聚共识

《土壤污染防治法》提出国家支持对土壤环境基准的研究。《中华人民共和国土壤污染防治法释义》指出,我国除了水之外的其他环境介质的环境基准研究还没有系统开展,因此需要从国家层面以法律形式规定加强土壤环境基准研究<sup>[5]</sup>。随着土壤标准由“质量标准”转变为“风险管控标准”,当前有必要密切结合风险管理理念,界定土壤环境基准的内涵。

基于以上对我国环境基准、土壤环境基准概念发展过程的回顾与梳理,可发现土壤环境基准的现状是“定位确定,定义不明”。我国学者对环境基准的定位基本形成了共识,认为环境基准是环境质量标准制修订的科学基础,其具有科学、客观性,但在具体定义上存在“完整关系”和“最大限值”两种理解。由于研究环境基准的主要目的是为环境质量标准提供相关污染物浓度限值,“最大限值”定义更容易被理解接受,但单独强调最大限值会使得环境基准研究有等同于“基准值”乃至“标准值”推导的趋势,而忽视对支撑科学资料的系统收集与分析。对于“完整关系”的陈述也会有助于在基准向标准转化的过程中,可以通过基于经济、社会因素选择保护水平来确定合适的限值。

### 4.2 土壤环境基准研究与土壤环境标准发展趋势尚不匹配

如前文所述,在农用地土壤环境质量标准研究过程中,我国的历程是先形成了方法体系,后引入了基准定位,再尝试建立基准定义。我国土壤环境

质量标准主要基于前期开展的土壤环境容量、土壤环境背景值等研究数据,采用地球化学统计法、生态效应法等制定农用地土壤多种污染物的背景值和临界含量值。根据环境基准的定位,采用以上方法推导的土壤污染物含量限值被称为土壤环境基准。但当沿用环境基准的浓度(剂量)-效应关系来定义土壤环境基准时(“完整关系”定义),就出现了基准概念与基准工作不相符的情况。

当前,我国土壤环境管理已建立了以风险管理为基础的思想,在已有研究的基础上引入了风险评估方法,制定土壤污染风险管控标准。农用地土壤风险管控标准一方面沿用了我国的生态效应法,另一方面也首次采用概率分布法分析最新获取的野外监测数据,基于对农产品质量的保护水平推荐了污染物含量限值。总体而言,农用地标准制定方法与生态毒理学方法,尤其是对陆生生物的研究方法基本一致,可以用“浓度-效应关系”进行描述。建设用地风险管控标准则全面采用了国际通行的人体健康风险评估方法,通过危害识别、毒性评估、暴露评估和风险表征的系统技术体系制定土壤污染物含量限值;限值的计算不仅需要毒性评估中的剂量-效应关系,还需要暴露评估中的暴露量,而土壤污染物对人体的暴露量在不同暴露情景下差异极大且存在较大的不确定性。因此,若需延续基准研究服务于标准制定的定位,则土壤污染相关暴露研究必须成为土壤环境基准研究的重要部分。

### 4.3 土壤环境基准相关概念的建议

基于以上分析,笔者对风险管理时期的土壤环境基准研究概念提出以下建议。(1)参照环境基准定义的形式,土壤环境基准可以定义为土壤污染物对特定受体不产生不良效应的含量,包含特定暴露条件下土壤污染物含量(剂量)与受体不良效应之间的完整关系。其中,特定受体包括人体健康、生态受体及其他环境介质(主要是地下水)。(2)土壤环境基准研究的主要工作内容是基于统一的试验和数据分析方法,通过实验研究或实地调查(包括田野调查、流行病学调查等),建立特定暴露条件下土壤污染物含量与受体不良效应之间的完整关系,并推导土壤污染物对特定受体不产生不良效应的含量。土壤环境基准研究是以支撑土壤环境污染风险管控等标准制修订为目的的基础或应用基础研究。根据我国现阶段土壤环境管理标准体系架构,土壤环境基准研究当前需要为农用地、建设用地土壤污染风险管控标准的未来修订进行方法学和基础数据的储备。土壤环境基准研究的基本方

法是风险评估方法,土壤环境基准研究的核心内容是土壤污染物对人体健康、生态受体或环境介质的含量-效应关系研究,以及受体对土壤污染物的暴露评估等。

以上建议的提出,反映出笔者对土壤环境基准研究发展方向的3个主要认识。一是以人体健康风险评估、生态风险评估等方法为基础,建立既沿袭我国土壤生态环境研究成果,又与国际接轨的土壤环境基准与标准研究方法体系,为土壤环境基准研究拓展更为开放、广泛、高质量的数据来源。二是将“含量(剂量、浓度)-效应关系”和“暴露”均纳入土壤环境基准的定义,因为土壤环境管理所采用的限值是层次化、多样化的而不是单一的限值,但推导不同限值的理论基础通常是相对固定的剂量-效应关系和变异较大的暴露数据两个部分。三是保留“最大限值”表述形式,但同时强调包含含量(剂量、浓度)-效应的完整关系。提出此建议是因为标准中部分限值是基于外部标准或主观界限制定的,如对水稻质量的保护水平是稻米达到食品安全标准,对产量的保护水平是减产10%;一旦外部限制条件发生变化,相应的土壤限值也必须进行调整。因此,土壤环境基准若以记录完整关系为目标,可提供与不同保护水平相对应的土壤污染物允许含量,发挥全面支撑土壤环境相关标准的制定和修订的作用。同时,尽管沿用“最大限值”表述,也需说明土壤基准研究不是以提供唯一的“最大限值”为目的,而是建立在不同保护对象、保护水平及暴露途径等多种情景下,提供多种限值的系统方法,不应被认为是一个单一的基准值。

由于土壤环境基准主要关注污染物的剂量-效应关系描述,研究方法也通常采用风险评估方法,两者与背景值研究具有很大差别,虽然背景含量对土壤环境标准的制定具有重要作用,但建议土壤环境背景值研究不应再包含在土壤环境基准研究范畴内。此外,建议不再使用“土壤环境质量基准”这一术语。

#### 4.4 土壤环境基准研究方向的建议

土壤环境基准是土壤环境标准制修订的重要科学基础。土壤环境基准研究成果可长期、不断累积,推动土壤环境标准的持续改进。此外,基准研究工作对我国土壤环境风险评估技术方法的优化,以及农用地、建设用地地块风险管控与修复目标的制定等,均有较强的参考价值。对土壤环境基准研究近期应关注的重点方向,提出如下建议。

(1)融合风险评估方法,建立标准化方法体系。

“土十条”和“土壤法”已将风险管控理念确立为我国土壤污染防治的核心思想,风险评估是国际上风险管理的主流方法,也将是我国土壤环境风险管理的基本方法。建设用地土壤风险管控标准已直接采用了人体健康风险评估相关技术方法;而农用地风险管控标准无论是原土壤环境质量标准确定的限值还是现行标准新发布的限值,主要还是基于“临界含量”等我国土壤科学传统方法制定,与国际生态毒理学研究方法具有较高的一致性,但在术语体系、方法标准化等方面仍有差异。因此,土壤环境基准研究应进一步与风险评估方法体系融合,尤其是“临界含量”方法和生态毒理学术语、方法的匹配性及标准化。

(2)加强基础研究支持,积累本土化数据。由于我国土壤类型、自然条件和利用方式的多样性,不同的土地利用方式下,需要保护的受体不同,保护水平也可能存在多种级别,这使土壤污染物含量限值制定的复杂性高于水、气等介质。在制定原土壤环境质量标准时,仅针对由镉造成作物减产10%的临界含量一个项目,便利用了11种土壤类型、6种作物盆栽试验的大量数据,通过回归拟合得到的18个临界含量进行综合比较获得的。即使如此,仍无法充分代表全国农田土壤的复杂情况。因此,土壤环境基准研究必须建立开放合作的机制,以标准化的方法体系进行长期的数据积累。建议国家组建包含核心实验室、农用地长期试验站、建设用地长期试验站和野外调查数据网的全国土壤环境基准试验网络,建立土壤污染物毒性数据库,为土壤环境基准研究提供有效保障。

#### 参考文献:

- [1] 曲格平.历史的转折点:纪念斯德哥尔摩人类环境会议十周年[J].环境保护,1982,10(4):3-5.[QU Ge-ping.A Turning Point in History: Commemorating the 10th Anniversary of Stockholm Conference on Human Environment[J].Environmental Protection, 1982, 10(4): 3-5.]
- [2] World Health Organization. Environmental Health Criteria: I. Mercury[R].[s. l.]:[s. n.], 1976.
- [3] 钮式如,王华东.环境保护概论[M].北京:中国环境科学学会, 1980:319-321.
- [4] 钮式如.环境标准与环境保护[J].环境保护,1979,7(5):4-7. [NIU Shi-ru. Environmental Standards and Environmental Protection[J].Environmental Protection, 1979, 7(5): 4-7.]
- [5] 罗清泉,许安标,张桃林.《中华人民共和国土壤污染防治法》释义[M].北京:中国民主法制出版社,2018:1-368.
- [6] 钮式如.环境标准问答[J].环境保护,1981,9(1):21.[NIU Shi-ru. Environmental Standard Question and Answer [J].

- Environmental Protection, 1981, 9(1): 21.]
- [7] 卢纯惠. 大气质量基准与大气质量标准[J]. 环境保护, 1985, 13(2): 9-10. [LU Chun-hui. Air Quality Benchmark and Air Quality Standard[J]. Environmental Protection, 1985, 13(2): 9-10.]
- [8] 程庆贤. 环境的基准和标准[J]. 海洋通报, 1980(5): 19.
- [9] Federal Water Pollution Control Administration. Water Quality Criteria[R]. [s. l.]: [s. n.], 1968.
- [10] 郑乃彤, 陆昌森. 环境质量基准[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1983: 224.
- [11] 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 Qi-xing, LUO Yi, ZHU Ling-yan. 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.]
- [12] 林玉锁. 浅议我国环境基准的研究[J]. 环境导报, 1994(1): 19-20. [LIN Yu-suo. On the Study of Environmental Standards in China[J]. Environment Herald, 1994(1): 19-20.]
- [13] USEPA. EPA/540/R-96/018. Soil Screening Guidance: User's Guide[Z]. [s. l.]: [s. n.], 1996.
- [14] Federal Government of Germany. Federal Soil Protection and Contaminated Sites Ordinance (BBodSchV) [Z]. [s. l.]: [s. n.], 1999.
- [15] Canadian Council of Ministers of the Environment. A Protocol for the Derivation of Environmental and Human Health Soil Quality Guidelines[Z]. [s. l.]: [s. n.], 2006.
- [16] Environment Agency. SC050021. Using Soil Guideline Values[Z]. [s. l.]: [s. n.], 2009.
- [17] 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.
- [18] 马瑾. 世界主要发达国家土壤环境基准与标准理论方法研究[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 3-187.
- [19] 周启星. 环境基准研究与环境标准制定进展及展望[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1): 1-8. [ZHOU Qi-xing. Advances and Prospect of Research on Environmental Criteria/ Benchmarks and Enactment of Environmental Standards[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(1): 1-8.]
- [20] 吴丰昌, 孟伟. 中国环境基准体系中长期路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 30-33. [WU Feng-chang, MENG Wei. Long-term Roadmap of China Environmental Benchmark System[M]. Beijing: Science Press, 2014: 30-33.]
- [21] 林玉锁, 汪云岗, 周军英, 等. 环境质量基准等效采用的程序和方法研究[R]. 南京: 国家环境保护局南京环境科学研究所, 1995.
- [22] 夏青. 美国的水质基准与水质标准[J]. 环境科学研究, 1987(1): 20-38. [XIA Qing. Water Quality Standards and Standards in the United States[J]. Research of Environmental Sciences, 1987(1): 20-38.]
- [23] 国务院. 国发[2005]39号: 国务院关于落实科学发展观加强环境保护的决定[Z]. 2005.
- [24] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国环境保护法[Z]. 2015.
- [25] 环境保护部. 国家环境基准管理办法(试行)[Z]. 2017.
- [26] 吴燕玉, 张学询, 陈涛, 等. 污灌区环境质量评价的原则和方法的探讨[J]. 环境保护科学, 1979, 5(4): 17-29. [WU Yan-yu, ZHANG Xue-xun, CHEN Tao, *et al.* Discussion on Principles and Methods of Environmental Quality Assessment in Sewage Irrigation Area[J]. Environmental Protection Science, 1979, 5(4): 17-29.]
- [27] 吴燕玉. 沈阳市郊污水灌区中镉及其他重金属的污染[J]. 环境科学研究, 1979(增刊1): 95-105. [WU Yan-yu. Pollution of Cadmium and Other Heavy Metals in Sewage Irrigation Areas in Shenyang Suburbs[J]. Research of Environmental Sciences, 1979(Suppl. 1): 95-105.]
- [28] 陈怀满, 郑春荣, 周东美, 等. 土壤环境质量研究回顾与讨论[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 821-827. [CHEN Huai-man, ZHENG Chun-rong, ZHOU Dong-mei, *et al.* Soil Environmental Quality: A Review[J]. Journal of Agro-environment Science, 2006, 25(4): 821-827.]
- [29] 夏增禄. 土壤环境容量研究[J]. 环境科学, 1986, 7(5): 34-44, 95. [XIA Zeng-lu. Studies on Soil-environmental Capacity[J]. Environmental Science, 1986, 7(5): 34-44, 95.]
- [30] 蔡士悦. 土壤环境学中的新领域: 土壤环境容量研究[J]. 环境科学动态, 1987, 12(4): 12-15. [CAI Shi-yue. A New Field in Soil Environmental Science: Study on Soil Environmental Capacity[J]. Environment and Sustainable Development, 1987, 12(4): 12-15.]
- [31] 夏增禄. 中国土壤环境容量[M]. 北京: 地震出版社, 1992: 172-240. [XIA Zeng-lu. Soil Environmental Capacity in China[M]. Beijing: Seismological Press, 1992: 172-240.]
- [32] 董克虞, 陈家梅. 北京市污灌土壤作物镉污染调查和评价[J]. 环境科学, 1983, 4(4): 15-19, 29. [DONG Ke-yu, CHEN Jia-mei. Investigation and Evaluation on Cadmium Pollution of Soil Crops under Sewage Irrigation in Beijing[J]. Environmental Science, 1983, 4(4): 15-19, 29.]
- [33] 蔡士悦, 王莉, 张久根, 等. 北京地区土壤铅对农作物的生态污染效应及其临界含量的研究[J]. 环境科学研究, 1986(2): 32-45. [CAI Shi-yue, WANG Li, ZHANG Jiu-gen, *et al.* Study on Ecological Pollution Effect of Soil Lead on Crops and Its Critical Content in Beijing Area[J]. Research of Environmental Sciences, 1986(2): 32-45.]
- [34] 蔡士悦, 王莉, 张久根, 等. 北京地区土壤汞对农作物的生态污染效应及其临界含量的研究[J]. 环境科学研究, 1986(2): 46-60. [CAI Shi-yue, WANG Li, ZHANG Jiu-gen, *et al.* Study on Ecological Pollution Effect of Soil Mercury on Crops and Its Critical Content in Beijing Area[J]. Research of Environmental Sciences, 1986(2): 46-60.]
- [35] 蔡士悦, 王莉, 张久根, 等. 北京地区土壤铜对农作物生态污染效应及其临界含量的研究[J]. 环境科学研究, 1986(2): 61-71. [CAI Shi-yue, WANG Li, ZHANG Jiu-gen, *et al.* Study on the Ecological Pollution Effect of Soil Copper on Crops and Its Critical Content in Beijing Area[J]. Research of Environmental Sciences, 1986(2): 61-71.]
- [36] 蔡士悦, 王莉, 张久根, 等. 北京地区土壤矿物油对农作物的生态污染效应及其临界含量的研究[J]. 环境科学研究, 1986

- (2): 72-79. [CAI Shi-yue, WANG Li, ZHANG Jiu-gen, *et al.* Study on Ecological Pollution Effect and Critical Content of Soil Mineral Oil on Crops in Beijing Area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 1986(2): 72-79.]
- [37] GB 15618—1995, 土壤环境质量标准[S].
- [38] 夏家淇. 土壤环境质量标准详解[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 2-4, 7-10. [XIA Jia-qi. Detailed Explanation of Soil Environmental Quality Standard [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1996: 2-4, 7-10.]
- [39] 林玉锁. 环境基准专业委员会成立暨首次全国环境基准学术讨论会在南京召开[J]. 农村生态环境, 1993, 9(3): 61. [LIN Yu-suo. The Establishment of Environmental Standards Professional Committee and the First National Symposium on Environmental Standards Held in Nanjing [J]. *Rural Eco-environment*, 1993, 9(3): 61.]
- [40] 王宏康. 土壤中若干有毒元素的环境质量基准研究[J]. 农业环境保护, 1993, 12(4): 162-165. [WANG Hong-kang. Study on Environmental Quality Standards of Some Toxic Elements in Soil [J]. *Agro-environmental Protection*, 1993, 12(4): 162-165.]
- [41] 夏家淇. 土壤砷的环境基准研究[J]. 农村生态环境, 1993(4): 1-4, 62. [XIA Jia-qi. Studies on the Soil-environmental Criteria for Arsenic [J]. *Rural Eco-environment*, 1993(4): 1-4, 62.]
- [42] 夏家淇. 正确认识土壤环境质量标准与土壤污染[N]. 中国环境报, 2004-10-28(3).
- [43] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, 12(4): 12-19, 94. [WEI Fu-sheng, CHEN Jing-sheng, WU Yan-yu, *et al.* Study on the Background Contents on 61 Elements of Soils in China [J]. *Environmental Science*, 1991, 12(4): 12-19, 94.]
- [44] 吴燕玉, 周启星, 田均良. 制定我国土壤环境标准(汞、镉、铅和砷)的探讨[J]. 应用生态学报, 1991, 2(4): 344-349. [WU Yan-yu, ZHOU Qi-xing, TIAN Jun-liang. An Approach to the Enactment of Soil-environmental Standards (Hg, Cd, Pb and As) in China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1991, 2(4): 344-349.]
- [45] 刘传平, 李芳柏. 我国土壤环境质量标准存在的问题及探讨[C]//中国环境保护优秀论文集. [出版地不详]: [出版者不详], 2005.
- [46] 周国华, 秦绪文, 董岩翔. 土壤环境质量标准的制定原则与方法[J]. 地质通报, 2005, 24(8): 721-727. [ZHOU Guo-hua, QIN Xu-wen, DONG Yan-xiang. Soil Environmental Quality Standards: Principle and Method [J]. *Regional Geology of China*, 2005, 24(8): 721-727.]
- [47] 林玉锁, 李波, 张孝飞. 我国土壤环境安全面临的突出问题[J]. 环境保护, 2004, 32(10): 39-42. [LIN Yu-suo, LI Bo, ZHANG Xiao-fei. Problems of Soil Environmental Security in China [J]. *Environmental Protection*, 2004, 32(10): 39-42.]
- [48] 林玉锁. 土壤环境安全及其污染防治对策[J]. 环境保护, 2007, 35(1): 35-38. [LIN Yu-suo. Soil Environmental Safety and Its Pollution Control Countermeasures [J]. *Environmental Protection*, 2007, 35(1): 35-38.]
- [49] 林玉锁. 国外环境风险评价的现状与趋势[J]. 环境科学动态, 1993, 18(1): 8-10. [LIN Yu-suo. Present Situation and Trend of Environmental Risk Assessment Abroad [J]. *Environment and Sustainable Development*, 1993, 18(1): 8-10.]
- [50] 刘志全, 石利利. 英国的污染土地风险管理与修复技术[J]. 环境保护, 2005, 33(10): 69-73. [LIU Zhi-quan, SHI Li-li. Risk Management of Contaminated Land and Its Remedial Measures in UK [J]. *Environmental Protection*, 2005, 33(10): 69-73.]
- [51] 夏家淇, 骆永明. 关于土壤污染的概念和3类评价指标的探讨[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(1): 87-90. [XIA Jia-qi, LUO Yong-ming. Definition and Three Evaluation Guidelines of Soil Contamination [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(1): 87-90.]
- [52] 王国庆, 骆永明, 宋静, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究: I. 国际动态及中国的修订考虑[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 666-673. [WANG Guo-qing, LUO Yong-ming, SONG Jing, *et al.* Study on Soil Environmental Quality Guidelines and Standards: I. International Trend and Suggestions for Amendment in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 666-673.]
- [53] 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. [ZHANG Hai-bo, LUO Yong-ming, LI Zhi-bo, *et al.* Study on Soil Environmental Quality Guidelines and Standards: III. Ecological Risk Assessment of Polluted Soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 338-349.]
- [54] 颜增光, 谷庆宝, 周娟, 等. 构建土壤生态筛选基准的技术关键及方法学概述[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(5): 417-427. [YAN Zeng-guang, GU Qing-bao, ZHOU Juan, *et al.* A Synoptic Review of the Technical Tips and Methodologies for the Development of Ecological Soil Screening Benchmarks [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2008, 3(5): 417-427.]
- [55] 李志博, 骆永明, 宋静, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究: II. 污染土壤的健康风险评估[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 142-151. [LI Zhi-bo, LUO Yong-ming, SONG Jing, *et al.* Study on Soil Environmental Quality Guidelines and Standards: II. Health Risk Assessment of Polluted Soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 142-151.]
- [56] 刘志全, 李丽和, 李秀金, 等. 石油化工污染土壤中萘的生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2006, 26(6): 746-750. [LIU Zhi-quan, LI Li-he, LI Xiu-jin, *et al.* Ecological Risk Assessment of Naphthalene in the Soil of a Petrochemicals-contaminated Site [J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(6): 746-750.]
- [57] 张胜田, 林玉锁, 华小梅, 等. 中国污染场地管理面临的问题及对策[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(6): 5-7, 29. [ZHANG Sheng-tian, LIN Yu-suo, HUA Xiao-mei, *et al.* The Facing Problems and Countermeasures of Chinese Contaminated Site Management [J]. *Environmental Science and Management*, 2007, 32(6): 5-7, 29.]

作者简介: 龙涛(1978—), 男, 四川成都人, 研究员, 博士, 主要研究方向为土壤与地下水污染防治。E-mail: longtao@nies.org

(责任编辑: 李祥敏)