《土壤环境容量核算技术导则》

编制说明

中国科学院南京土壤研究所

南京大学

生态环境部南京环境科学研究所

中国科学院生态环境研究中心

中国环境科学研究院

南京农业大学

二零二四年六月

目录

1 项目背景 3

1.1 任务来源 3

1.2 工作过程 3

2 导则制定的必要性分析 4

3 国内外土壤环境容量研究现状 4

4 制定的原则和依据 5

4.1 编制原则 6

4.2 技术依据 6

5 导则的主要内容及说明 6

5.1 适用范围 6

5.2 规范性引用文件 7

5.3 术语和定义 7

5.3.1 土壤环境容量 Soil environmental capacity 7

5.3.2 土壤风险敏感受体 Soil risk sensitive receptors 8

5.3.3 食品质量安全 Food quality safety 8

5.3.4 生态安全 Ecological safety 8

5.3.5 地下水安全 Groundwater safety 8

5.3.6 人体健康风险 Human health risk 8

5.4 土壤环境容量核算工作流程 8

5.5 技术方法确定依据 8

6 主要技术要点说明 9

6.1 风险敏感受体 9

6.1.1 农产品质量安全 9

6.1.2 生态安全 9

6.1.3 地下水安全 9

6.1.4 人体健康 9

6.2 土壤环境阈值 9

6.3 土壤评估边界的确定 10

7 对实施本标准的建议 10
参考文献 12
附录 1 我国红壤区不同土地利用方式下的场地土壤环境容量（镉） 13

1 项目背景

1.1 任务来源

随着我国国民经济的不断发展和工业化进程的推进，土壤污染问题日益严峻。土壤污染对农作物食品质量安全、生态安全、地下水安全和人体健康造成严重影响。重金属和有机污染物通过农作物进入食物链，影响人类健康；还会污染、削弱土壤生态功能，降低生物多样性，抑制植物生长、土壤动物生长繁衍和微生物活性；污染物通过土壤包气带渗透地下水，威胁饮用水安全，破坏水生态系统；此外，敏感人群直接接触污染的土壤或吸入污染尘埃可引发各种疾病。因此，土壤污染问题的研究正逐渐受到重视。2016 年 5 月，国务院发布《土壤污染防治行动计划》，指出全国土壤环境质量已成为限制我国社会发展的突出短板之一。随后，国家有关部委相继出台了关于国土空间规划和环境承载力评价的规范和指南，其中土壤环境容量的研究是重要的基础工作之一。

20 世纪 70 年代起，在“七五”国家重点科技项目（攻关）计划的支持下，全国 29 个省、市、自治区和 5 个开放城市展开了关于土壤元素背景值和土壤环境阈值容量的研究，较为系统地阐明了研究方法，推导了污染物在土壤中的限量值，通过数学模型计算得到 Cd、As、Hg、Pb、Cu 和 Cr 等污染物的土壤环境容量，取得了一系列研究成果。

在实际土壤利用和管理过程中，存在不同土地利用方式（农用地和建设用地）以及多样的敏感受体（如农产品质量、人体健康、土壤生态、地下水等），实际开展土壤环境容量核算过程较为复杂，相关研究较少。因此，特此编制《土壤环境容量核算技术导则》，进一步规范土壤环境容量核算方法和流程，建立不同土地利用方式和多种敏感受体上的土壤环境容量评价体系，为指导土壤生态环境保护工作提供科学依据。本指南编制工作由中国科学院南京土壤研究所牵头，联合南京大学、中国科学院生态环境研究中心、中国环境科学研究院、生态环境部南京环境科学研究所和南京农业大学共同完成。

1.2 工作过程

2021 年 3 月，科技部发布了国家重点研发计划“场地土壤污染成因与治理

技术”重点专项 2021 年度项目申报指南，围绕国家场地土壤污染防治的重大科技需求，设立了“场地土壤环境容量与承载力量化方法（基础研究类）”项目。

2021 年 12 月，中国 21 世纪议程管理中心对“场地土壤环境容量与承载力量化方法（2021YFC1809100）”正式立项，该项目由牵头单位中国科学院南京土壤研究所，联合南京大学、中国科学院生态环境研究中心、中国环境科学研究院、生态环境部南京环境科学研究所和南京农业大学共同实施。

2022 年 3 月，成立《土壤环境容量核算技术导则》（以下简称《导则》）编制组，正式开展土壤环境容量核算方法的研究与制定工作。系统开展了国内外土壤环境容量研究的文献调研，针对《指南》总体定位、适用范围、编制思路、编制原则等问题召开研讨会，明确了导则的基本框架、下一步需要开展的主要工作和需要解决的重大问题。

2024 年 6 月，编制组完成《土壤环境容量核算技术导则（专家咨询稿）》。

2024 年 6 月，召开专家评审会，会后进行修改。

2 导则制定的必要性分析

随着现代化工业和农业的发展，土壤重金属污染加剧受到了人们广泛的关注。据《全国土污染壤状况调查公报》数据，我国部分区地土壤污染较严重，耕地土壤环境质量堪忧，工矿业废弃地土壤环境问题突出。为了实现生态文明建设和国土资源的可持续利用，2016 年国务院印发了《土壤污染防治行动计划》，指出加强土壤污染防治研究，需重点开展土壤环境基准、土壤环境容量与承载力、污染物迁移转化规律、污染生态效应、土壤污染与农产品质量和人体健康关系等方面的基础研究，土壤环境容量研究逐渐被重视；2021 年 11 月 2 日，中共中央、国务院印发《关于深入打好污染防治攻坚战的意见》，意见的总体要求中指出要以改善生态环境质量为核心，主要目标中提出到 2025 年，生态环境持续改善，生态环境治理体系更加完善，生态文明建设实现新进步。土壤环境容量可以充分体现区域环境特征，是实现污染物总控制量的重要基础。

3 国内外土壤环境容量研究现状

随着现代化工业和农业的发展，土壤污染不断加剧。据《全国土壤污染状况调查公报》数据，我国部分地区土壤污染较严重，耕地土壤环境质量堪忧，工矿业废弃地土壤环境问题突出。全国土壤污染总超标率为16.1%，其中重度污染点位占1.1%。耕地土壤点位超标率为19.4%，主要污染物为镉、镍、铜、砷、汞、铅、滴滴涕和多环芳烃。土壤污染将严重影响农作物产量、农产品品质以及土壤生态过程等，部分污染物还会通过土壤包气带迁移至地下水，影响地下水安全，也会通过摄食、皮肤吸收等过程直接危及人体健康。

土壤环境具有一定的净化功能和缓冲性能，可容纳各种途径来源的污染物，即土壤具有一定的环境容量。土壤环境容量充分体现了区域环境特征，是实现污染物总量控制的重要基础。目前围绕土壤环境容量的研究主要集中于国内开展。我国从20世纪70年代初开始，逐渐开展了与土壤环境容量相关的研究。研究领域涉及：土壤环境容量研究的一般内容和方法；污染物的生态效应、环境效应，污染物的净化规律与迁移转化；各主要土类、部分亚类、土种的临界含量和环境容量；建立土壤环境容量数学模型；根据土壤环境容量，制定污灌区水质标准和污泥施用量标准等。这些研究成果为今后深入开展土壤环境容量研究提供了理论依据和方法借鉴。近年来，我国已经对重金属的土壤环境容量进行了系统的研究。相关学者利用土壤环境容量核算框架和指标体系，量化了江苏、山东、以及黄河三角洲等不同区域重金属的土壤环境容量，了解不同污染物的现存、静态及动态容量现状，辨识了土壤环境容量的空间分布规律。此外，相关研究逐步利用土壤环境容量来预测研究区重金属的时间-空间变化趋势。例如，土壤环境容量与人为投入产出通量模型结合，预测了太湖周边县域农田土壤中砷、汞、铬、镉和铅在2030年和2050年的风险概率。也有研究者通过模拟区域土壤中砷、镉、铬、铜、汞、镍、铅和锌的土壤环境容量，预测了2025年和2035年的土壤环境容量变化，以对土壤重金属污染进行预警。

由于我国幅员辽阔，各地气候、水文、地质、地貌不同，土壤种类众多，且土地利用方式不尽相同（农用地和建设用地等），敏感受体类型多样（农产品质量、人体健康、土壤生态、地下水安全等），因此土壤的环境容量较为复杂，总体而言，当前相关研究尚需深入。

4 制定的原则和依据

4.1 编制原则

（1）以《中华人民共和国环境保护法》、《土壤污染防治行动计划》以及我国现行的环境保护法律法规、政策、条例、标准的相关规定和要求为主要依据。对国内外土壤环境容量研究现状、法律法规、工作机制和发展趋势等进行调研和对比分析，以便在标准制定过程中充分借鉴国内外的最新成果，使我国的土壤环境容量工作能够适应我国政策法规的相关要求和发展趋势，实现与国际接轨。

（2）充分借鉴国内外相关标准和技术指南的经验，总结各国制定土壤环境容量值的考虑因素和技术方法特点，对较为成熟的共性技术在与我国本土条件进行适配性分析后可直接引进或等效采用。

（3）以需求为导向，同时符合我国环境特征和管理需要，服务土壤质量改善的总体目标，明确标准制定的工作程序，提高工作效率，保证工作质量。相关容量工作的基准须有长期的试验研究和足够的数据支持，具备良好的前期基础，确保我国土壤环境容量的科学性、准确性和实用性。

（4）充分吸收国内土壤环境容量的最新研究成果，尤其是有关土壤环境容量的系列研究成果；以科学为准则，兼顾合理性和可行性。同时考虑与我国经济、技术发展水平和相关方的承受能力相适应，建立健全我国土壤环境容量制定的技术导则。

4.2 技术依据

本导则以国家重点研发计划项目“场地土壤环境容量与承载力量化方法”的研究成果为基础，充分吸收国内外土壤生态风险评估、人体健康风险评估、地下水环境评估和土壤环境容量评估框架的优势和成熟经验，并结合我国在不同土地利用方式评估方面的研究探索、案例实践经验及管理需求所制定的方法体系。

5 导则的主要内容及说明

本导则包适用范围、规范性引用文件、术语和定义、土壤环境容量核算工作流程、技术方法确定依据、主要技术要点说明和标准实施建议共 7 部分。

5.1 适用范围

本标准规定了土壤环境容量核算的编制原则、技术程序、技术内容和技术要求。

本标准不适用于放射性污染和致病性微生物污染场地的土壤环境容量核算。

5.2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 14848 地下水质量标准

GB 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）

GB/T 21010 土地利用现状分类

GB/T 27921 风险管理 风险评估技术

GB 36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）

GB/T 39791.4 生态环境损害鉴定评估技术指南 总纲和关键环节 第 4 部分：土壤生态环境基线调查与确定

GB 50137 城市用地分类与规划建设用地标准

HJ 25.1 场地环境调查技术导则

HJ 25.2 场地环境监测技术导则

HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则

HJ 25.4 污染场地土壤修复技术导则

HJ 610 环境影响评价技术导则 地下水环境

HJ 682 污染场地术语

HJ 1111 生态环境健康风险评估技术指南

SL/Z 467 生态风险评价导则

5.3 术语和定义

5.3.1 土壤环境容量 Soil environmental capacity

一定环境单元和时间内，遵循环境质量标准，保证土壤质量安全且不发生次生污染时，土壤所能容纳的最大污染负载量。

5.3.2 土壤风险敏感受体 Soil risk sensitive receptors

易于受人类活动影响的、与土壤环境相关的敏感区或对象。

5.3.3 食品质量安全 Food quality safety

土壤目标污染物对作物品质不产生直接或潜在危害，不超过《食品安全国家标准 食品中污染物限量食品安全国家标准 食品中污染物限量》（GB 2762）中所规定的限制。

5.3.4 生态安全 Ecological safety

土壤目标污染物对土壤生态受体或生态功能不产生直接或潜在危害、或不具有环境风险。

5.3.5 地下水安全 Groundwater safety

土壤目标污染物对地下水不产生直接或潜在危害、或不具有环境风险，且不超过《地下水质量标准》(GB/T 14848)中不同质量分类标准。

5.3.6 人体健康风险 Human health risk

土壤目标污染物对人体健康不产生直接或潜在危害。

5.4 土壤环境容量核算工作流程

土壤环境容量核算主要包括一下 5 个步骤，具体如下：

（1）土壤污染现状调查

（2）明确研究区风险敏感受体

（3）明确研究区不同土地利用方式的土壤环境阈值

（4）明确土壤边界

（5）计算土壤环境容量

5.5 技术方法确定依据

本标准基于土壤污染物的生态安全、农产品质量安全、地下水安全和人体健康风险，参考我国现行土壤环境质量标准及地下水环境、人体健康评估指南，并考虑国内现有的土壤环境质量监测能力和实际情况，规定土壤环境容量核算的技术方法，确保土壤环境容量核算的科学性、先进性、可行性和可操作性。

6 主要技术要点说明

6.1 风险敏感受体

6.1.1 农产品质量安全

农产品质量安全，是指农产品质量符合保障人的健康、安全的要求。土壤中的污染物质，如重金属和有机污染物，会被农作物吸收，积累在植物的不同部位，这些物质超标会对农产品品质造成影响，还易导致农产品安全问题。受污染的农产品进入食物链后，通过直接或间接的方式影响消费者的健康。例如，镉污染的稻米会导致人体镉中毒，影响肾功能和骨骼健康。

6.1.2 生态安全

土壤污染会破坏土壤生态系统，影响土壤生态受体或生态功能。影响土壤中的微生物、植物和动物的生存环境。土壤中的重金属和有机污染物会抑制农作物或野生植物正常生长；影响土壤无脊椎动物等的生理代谢；抑制微生物的活动，影响土壤中微生物群落和多样性，破坏土壤的健康和质量。

6.1.3 地下水安全

土壤中的污染物可以通过包气带迁移至地下水，影响地下水的质量。地下水污染主要受土壤中重金属和有机污染物的影响。这些污染物一旦进入地下水，会对饮用水源和农业灌溉水源造成威胁。

6.1.4 人体健康

土壤污染对人体健康的影响主要通过直接和间接暴露途径，直接途径包括：经口摄入土壤、皮肤接触土壤和吸入土壤颗粒物，间接暴露途径包括吸入室外空气中来自表层及下层土壤的气态污染物和吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物。土壤中的重金属如镉、铅、汞等会对人体的神经系统、免疫系统和内分泌系统产生毒性作用，长期暴露可能导致癌症、神经损伤、肾脏疾病等健康问题。

6.2 土壤环境阈值

土壤环境阈值是制定和修订土壤环境标准的科学依据，同时也是环境质量评价、环境风险控制及整个环境管理体系的科学基础，构成了国家环境保护和环境管理的基石。土壤环境阈值是保障农产品质量安全、生态安全、地下水安全和人

体健康而规定的土壤环境污染物的最大允许含量或浓度，不考虑社会、经济、技术等人为因素的影响，不具有法律效力。土壤环境标准以环境基准为科学依据，依据国家出台的相关环境法规和政策，综合考虑本土实际环境特征、社会经济状况以及科技水平的基础上，由国家机关立法规定土壤环境中污染物的允许含量以及其他技术指南，具有法律效应。

6.3 土壤评估边界的确定

由于土地的利用方式多样，污染物进入土壤时，承载不同土壤功能的场地所需要进行风险评估范围有所差异。同时，针对不同敏感受体（农产品质量安全、人体健康、生态受体和地下水）的暴露情景不同，所评估风险的边界也会相应变化。因此，需要就不同土地利用方式，列出对应的污染风险评估范围与边界。一般根据不同敏感受体进行土壤边界的划分，具体如下：

针对农产品质量安全，土壤中污染物主要通过根系进入作物可食部位，一般农田耕作层为 20 cm。尽管存在山药、萝卜等种植田块耕层厚度远大于 20 cm 的耕地，然而为保障大多数农产品质量，土壤边界一般设为 0.2 m。

土壤生态安全通常需保护土壤动物、植物和微生物的正常活动。通常土壤动物的活动范围是 0~20 cm，大多数植物根系的深度多为 0~60 cm，而土壤微生物的活动随着土壤氧气、水分、养分条件的降低，在 30 cm 以下逐渐减少。因此对于土壤生态安全而言，土壤边界一般设为 0.3 m。

对于人体健康而言，土壤污染物的主要暴露途径主要包括经口摄入、皮肤接触、吸入颗粒物、吸入室外空气来自表层土壤、下层土壤和地下水的气态污染物、吸入室内空气来自下层土壤和地下水的气态污染物，参考《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3-2019）中的默认土壤污染深度范围，表层污染土壤设为 0.5 m，下层土壤污染设为 1.0 m。

对于地下水而言，主要根据地下水埋深（即包气带厚度）确定污染影响边界。由于不同地区的地下水埋深差异较大，且同一地区的地下水埋深也会随季节发生一定变化，因此需根据不同地区的实际情况进行确定。

7 对实施本标准的建议

（1）《土壤环境容量核算技术导则》是我国开展土壤环境容量核算的重要参考依据之一。建议尽快进行土壤环境容量相关的风险受体和相关阈值的研究，为土地利用、管理和规划等工作提供科学依据。

（2）制定和发布技术标准应与有效可行的政策法规相一致。建议加快完善我国土壤环境容量研究和管理的政策和法规制度，加强技术标准的规范和指导作用。

（3）由于我国目前相关基础研究相对不足，建议在广泛征求意见的基础上修改《导则》，先进行试用，然后在实际应用中不断完善、修订和补充。

（4）在土壤污染控制中，推行土壤环境容量全程管控法，根据对剩余容量的要求，及时给出污染源控制的预警，给出污染源调控的建议。

参考文献

顾熙, 陈扣平, 吴吉春. 基于地下水安全的六价铬土壤环境基准值推导案例[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 179-189.

付传城, 王文勇, 潘剑君, 等. 南京市溧水区土壤重金属环境容量研究[J]. 土壤通报, 2014 (3): 734-742.

黄兴华, 李勖之, 王国庆, 等. 保护陆生生态的土壤铜环境基准研究[J]. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4720-4730.

蒋世杰, 翟远征, 王金生, 等. 国内外基于保护地下水的土壤环境基准的推导与比较[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 52-59.

吕悦风, 谢丽, 孙华, 等. 县域尺度耕地土壤重金属污染评价中的标准选择研究[J]. 中国环境科学, 2019, 39(11): 4743-4751.

龙涛, 林玉锁, 陈橹. 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.

秦晓鹏, 上官宇先, 赵龙, 等. 利用 CXTFIT-VZCOMML 模型推导基于保护地下水的 Sb 的土壤环境基准[J]. 环境科学研究, 2016, 29(3): 376-381.

王玉军, 陈能场, 刘存, 等. 土壤重金属污染防治的有效措施: 土壤负载容量管控法—献给 2015“国际土壤年”. 农业环境科学学报, 2015, 34(4): 613-618.

夏增禄. 中国主要类型土壤若干重金属临界含量和环境容量区域分异的影响[J]. 土壤, 1994, 5: 0-11.

于光金, 成杰民, 王忠训, 等. 山东省不同植被类型土壤重金属环境容量研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 366-368.

Pan Y, Ding L, Xie S, et al. Spatiotemporal simulation, early warning, and policy recommendations of the soil heavy metal environmental capacity of the agricultural land in a typical industrial city in China: Case of Zhongshan City[J]. Journal of cleaner production, 2021, 285: 124849.

附录 1 我国红壤区不同土地利用方式下的场地土壤环境容量（镉）

镉是我国南方红壤区土壤中广泛存在的污染物之一，且污染水平逐年增加。镉毒性高，对人体健康的风险较高；同时，镉在土壤中的有效性和迁移性较高，易被动植物吸收，且容易向下迁移进地下水，因此对土壤生态和地下水安全的风险也较高。因此，以南方红壤区土壤为研究对象，聚焦场地土壤，围绕不同土地利用方式下，重点关注土壤生态安全、地下水安全和人体健康风险敏感受体下的土壤镉的环境阈值，并计算基于不同土地利用方式的土壤环境容量。

1 以保护人体健康为目标的红壤镉环境阈值

《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）是以保护人体健康为目标而制定的土壤筛选值和管制值，其中筛选值是指土壤污染物含量等于或低于该值时，对人体健康的风险可以忽略。该标准考虑了土壤中污染物迁移到达和暴露于人体的 6 种污染物暴露途径，对于重金属镉而言，其暴露途径为经口摄入土壤、皮肤接触土壤和吸入土壤颗粒物这 3 种，这些暴露途径与土壤性质和重金属形态无关系，因此对于红壤区而言，可以直接引用上述标准，即公园用地和居住用地中基于保护人体健康的土壤镉阈值引用第一类用地的筛选值，即 20 mg/kg；工矿用地和商服用地引用第二类用地的筛选值），即 65 mg/kg。

2 以保护土壤生态安全为目标的红壤镉环境阈值

为获得红壤培养条件下的动植物、微生物相关的毒性阈值，本次研究以“土壤”、“镉”和“毒性”为关键词，对中国知网和 Web of Science 的所有相关文献进行筛选，建立红壤毒性数据库，收集文献截止时间为 1986 年 1 月~2023 年 2 月。

文献中毒性数据筛选原则参考前人研究，具体包括：①培养介质：土壤类型为红壤；②污染物添加方式：单一外源添加镉盐的土培或盆栽梯度试验，不包括水培与人工土壤等实验条件；③生态受体类型：土壤无脊椎动物、植物（草本、灌木和禾本科植物，不包括农作物）和土壤生态过程（土壤酶活、菌群生物量等），优先选择具有我国代表性的物种与生态过程；④毒性测试终点：优先选择慢性毒性指标（实验时间大于 14 天）；不包括体内酶活、叶绿素含量、DNA 损伤等细胞、分子水平的测试终点。选择文献中 10%毒性效应浓度（EC_{10}）作为剂量-效应的毒性阈值，同时对符合筛选条件且未直接提供毒性阈值的文献，使用 GraphPad Prisim 8.0 软件（GraphPad Software Co. Ltd., USA）中的 Dose- response-

Inhibition 模块对毒性剂量-效应关系数据进行拟合，得到 EC_{50}，然后使用专用计算器（Compute EC anything from EC50，GraphPad Software，https：//www.graphpad.com/quickcalcs/Ecanything1.cfm）将 EC_{50} 转换为 EC_{10}。根据上述筛选原则，最终获得土壤动物毒性数据共 8 个（3 个物种），植物毒性数据 18 个（12 个物种），土壤生态过程数据 11 个（7 种过程），见表 1 和表 2。

表 1 红壤中无脊椎动物及陆生植物的镉毒性数据

序号	物种	毒性测试终点	EC_{10} (mg/kg)	数量
1	赤子爱胜蚓(***Eisenia fetida***)	产茧量	20.4-23.8	2
2	白符跳虫(***Folsomia candida***)	成虫及幼虫生长量、繁殖数	14.3-178	5
3	粉螨(***Hypoaspis aculeifer)***	幼虫繁殖数	0.41	1
4	黑麦草(***Lolium perenne***)	发芽率、地上生长量	3.17-82.7	2
5	藿香蓟(***Ageratum conyzoides L.***)	生物量	6.86	1
6	野茼蒿(***Crassocephalum crepioides L.***)	生物量	6.51	1
7	香樟(***Cinnamomum camphora***)	生长量	10.3	1
8	木荷(***Schima superba***)	生长量、地径生长量	8.42-8.74	2
9	苦槠(***Castanopsis sclerophylla***)	生长量、地径生长量	8.9-10.3	2
10	闽楠(***Phoebe bournei***)	生长量	8.34	1
11	桑树(***Morus alba***)	生物量、耐性指数	3.25-32.2	2
12	绣线菊(***Spiraea salicifolia***)	耐性指数	23.67	1
13	山茶(***Camellia japonica***)	生物量、耐性指数	13.3-37	2
14	山矾(***Symplocos caudata***)	生物量、耐性指数	8.63-11.8	2
15	女贞(***Ligustrum japonicum***)	根伸长	11	1

表 2 红壤中生态过程的镉毒性数据

序号	生态过程	EC_{10} (mg/kg)	数量
1	脲酶酶活（***Urease activity***）	2.57-15.6	2
2	脱氢酶酶活（***Dehydrogenase activity***）	0.26-48.3	3

3	酸性磷酸酶酶活 (***Acid phosphatase activity***)	37.1	1
4	微生物量碳 (***Microbial biomass carbon***)	1.13-168	2
5	微生物基础呼吸 (***Microbial respiration***)	43.8	1
6	细菌生物量 (***Bacterial biomass)***	30.2	1
7	放线菌生物量 (***Actinomyces biomass***)	27.5	1

由表 1 和表 2 可知，红壤中无脊椎动物的镉 EC_{10} 最小值是 0.41 mg/kg，毒性测试终点为粉螨的幼虫繁殖数；最大值为 178 mg/kg，测试终点是白符跳幼虫的成虫生长量；植物的镉 EC_{10} 最小值为 3.17 mg/kg，测试终点为黑麦草地上生物量；最大值是 82.7 mg/kg，测试终点为黑麦草发芽率；生态过程中的镉 EC_{10} 最小值为 0.26 mg/kg，测试终点为脱氢酶酶活；最大值为 168 mg/kg，测试终点为微生物量碳。

采用 Shiny SSD Tools 所提供的 10 种累计分布模型（Gamma、Log-Gumbel、Log-Logistic、Log- normal、Inorm-Inorm、Webull、Burr III、Gompertz、Invpareto 和 Loglogis-llogis）拟合土壤无脊椎动物、陆生植物、土壤生态过程毒性数据。除 Gompertz 外，其他 9 种分布模型均可拟合成功。为减少模型选择过程中对模型推导结果带来的不确定影响，根据 AICc 检验中 delta 值从小到大的原则（其中 Webull 函数拟合为最优拟合模型，delta=0），选择 5 种分布模型利用模型平均法进行值推导，结果如图 1。

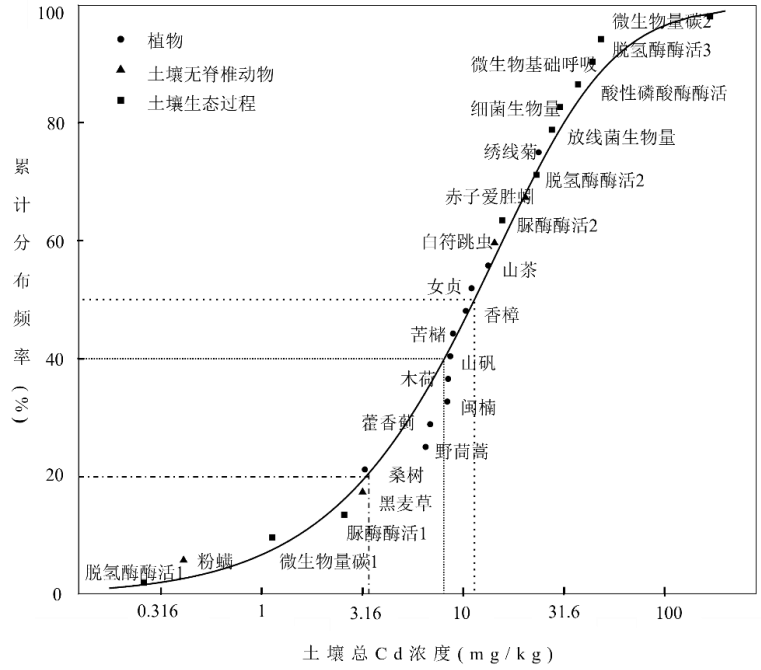


图 1 红壤中镉污染的物种敏感度分布(SSD)模型

根据图 1 的数据，可获得不同物种保护水平下的红壤镉土壤生态阈值，见表 3。其中，公园用地保护 80%的生态物种和生态过程，土壤镉阈值为 3.30 mg/kg；居住用地保护 60%的生态物种和生态过程，土壤镉阈值为 8.08 mg/kg；工矿用地和商服用地保护 50%的生态物种和生态过程，土壤镉生态阈值为 11.4 mg/kg。从数据来看，居住用地的镉环境阈值要大于公园用地，这主要是因为公园用地具有更高的生态价值和环境意义，需要保护 80%的生态物种和生态过程，因此镉的阈值会更为严格；而居住用地主要是满足人的居住需求，对土壤生态的保护要求不如公园用地，因此设定为保护 60%的生态物种和生态过程。这与黄兴华等的研究结果一致，类似的设定方法在澳大利亚的土壤生态阈值制定中也有体现。

表 3 基于不同土地利用方式的红壤镉生态阈值(mg/kg)

	公园用地	居住用地	工矿用地	商服用地
保护物种水平	80%	60%	50%	50%
SSD 法推导阈值 (mg/kg)	3.30	8.08	11.4	11.4

3 以保护地下水安全为目标的红壤镉环境阈值

3.1 参数获取

以保护地下水安全为目标的土壤环境阈值计算，需要三大类参数，即水文地质参数、土壤特征参数和污染物特征参数，关键参数见表 4。

表 4 红壤区地下水镉环境阈值计算的关键参数

参数类型	参数	方法	取值	单位
水文地质参数	降水量 (P)	查阅气象资料	0.52	cm/d
	含水层水平达西流速 (v)	根据水文地质资料和文献估算或实测	13.2	cm/d
	含水层水力传导系数 (K)	根据水文地质资料和文献估算或实测	/	cm/d
	含水层渗透速率/垂向补给量（I）	根据水文地质资料和文献估算或实测	0.52	cm/d
	包气带分层	现场测定或查阅当地水文地质资料 (Hydrus 1D 中使用)	双层, 0-2.5m 红壤 2.5-3.0m 砂层	/
	纵向弥散度 (D)	一般取包气带厚度的 10%,或通过实验获得	30	/
	包气带深度	测量污染的深度或用最保守的值	包气带 300	cm
	含水层污染源深度	测量污染的深度或用最保守的值	含水层 200	cm
	模拟计算时间 T1	用于 Hydrus 1D 软件中时间参数中污染物迁移时间的设置	10950	d
	污染释放时间 T2	用于 Hydrus 1D 软件中关于时间参数中污染物释放的设置	365	d
土壤特征参数	土壤质地	根据土壤粒径分布计算水分特征参数 (运用 Hydrus-1D 中的 Rosetta 模块)	黏粒:24.2 粉粒:42.1 砂粒:33.7	%
	土壤干容重 (ρ)	根据不同土壤类型得经验值	1.31	g/cm^3
	土壤含水孔隙度(θ_w)	根据土壤质地相关参数计算	37.6%	/
污染物特征参数	分配系数 (K_d)	查阅文献或实验测定	17	L/kg
	保护地下水基准值 (MCL)	根据地下水的用途选择相应的标准	0.01	mg/L

3.2 稀释因子 DF 的计算

稀释因子 DF 的计算方法（公式（1）和（2）），污染物由包气带渗滤液进入地下水含水层发生混合稀释。

$$\mathrm{DF}=1+\frac{Kid}{IL} \tag{1}$$

式中：K 为含水层渗透系数，m/a；i 为场地内的水力梯度，m/m；d 为污染物与地下水混合层深度，m；I 为渗透速率，m/a；L 为平行于地下水的污染源长，m。

另外，d 的计算可以根据公式(3)估算:

$$d=\left(0.0112L^2\right)^{0.5}+d_a\left[1-e^{\frac{-IL}{Kid_a}}\right] \tag{2}$$

式中: d_a 为含水层厚度，m。

本标准参照秦晓鹏、乔雄彪等的方法，将污染区域视为整个污染源长，视 L 为无穷大，由此 d=0.106L+d_a，此种情况下，混合区深度 d 远大于含水层厚度 d_a：故此 DF=1+0.106v/R_e，其中 v 为水平达西流速，R_e 为垂向补给量，根据表 6 的数据，v 取值为 13.2 cm/d，Re 取值为当地日平均降雨量（假设降雨全部进入到含水层且入渗系数为 1），0.52 cm/d，由此得到 DF 为 3.69。

3.3 衰减因子 AF 的计算

本次衰减因子的计算采用 Hydrus-1D 的对流弥散方程来模拟镉的迁移转化过程，计算过程受地区降水量、土壤类型、包气带岩性和厚度等条件影响，为简化计算过程，主要考虑水分运动和溶质运移过程，忽略了气温、蒸发、植物根系等条件的影响，具体关键参数设置见表 6。据此，计算的衰减因子 AF 为 27.1。

3.4 地下水阈值的计算

以保护地下水安全为目标的土壤环境阈值推导方法如下：

$$C_s=\mathrm{DAF}\times MCL\times\left(K_d+\frac{\theta_w+\theta_a H}{\rho}\right) \tag{3}$$

式中：C_s 为基于保护地下水的土壤安全阈值，mg/kg；DAF 为稀释衰减因子，是稀释因子（DF）和衰减因子（AF）的乘积，无量纲；MCL 为地下水标准限值，mg/L； K_d 为污染物在土壤-水分配系数，L/kg；θ_w 为土壤含水孔隙度；θ_a 为土壤含空气孔隙度；H 为亨利系数（污染物为重金属时，$H=0$）；ρ 为土壤干容重，g/cm^3。

根据上述获得的衰减因子和稀释因子数值，MCL 取《地下水质量标准（GB/T 14848）》IV 类标准，根据公式（3）可得，镉的基于保护地下水的土壤阈值为 17.3 mg/kg。蒋世杰等汇总了国内外 8 个国家和地区的基于保护地下水的土壤镉阈值，范围从 0.07~57.8 mg/kg，相差 800 多倍，这主要与在计算过程中假设条件、参数选择（场地特征参数、土壤性质参数等）和保护目标的差异有关。而我国目前用于污染物环境风险评估的场地水文地质参数资料较为缺乏，有待进一步加强。

4 基于不同土地利用方式的红壤镉环境阈值的综合取值

表 5 红壤区不同土地利用方式下的土壤镉环境阈值（mg/kg）

		公园用地	居住用地	工矿用地	商服用地
敏感受体	人体健康	20	20	65	65
	地下水	/	/	17.3	/
	土壤生态	3.30	8.08	11.4	11.4
综合评估	阈值(最严格保护)	3.30	8.08	11.4	11.4

表 5 列出了上述计算获得的红壤区不同土地利用方式下的土壤镉环境阈值。根据最严格保护的阈值筛选原则，当同一种土地利用方式下存在需要保护的多个敏感受体时，选择最低的阈值作为该土地利用方式下的土壤环境阈值。因此公园用地的土壤镉环境阈值为 3.30 mg/kg，居住用地为 8.08 mg/kg，工矿用地和商服用地均为 11.4 mg/kg。从表中的数值可以看出，无论是在哪种土地利用方式下，以保护人体健康为目标的土壤镉环境阈值均高于以保护地下水和土壤生态为目标的土壤镉环境阈值，这主要与不同敏感受体的暴露途径有关。对于人体健康而言，土壤中的镉主要通过呼吸土壤粉尘里的镉、皮肤接触、吸入粉尘等方式间接暴露。而对于生态风险而言，土壤中的镉与土壤植物、动物和微生物直接接触，因此其毒性会更高，导致生态阈值会低于以保护人体健康为目标的土壤镉环境阈值。黄兴华等推导出的土壤 Cu 生态阈值范围为 18.3~277 mg/kg，这个值也远低于 GB 36600-2018 中以保护人体健康为目标土壤 Cu 筛选值（2000~18000 mg/kg）。

5 基于不同土地利用方式的红壤镉环境容量

我国在“七五”期间系统研究了土壤环境背景值，获得了我国主要土类的 60 余种元素的背景值，并编制了中国土壤环境背景值图集。1991 年，魏复盛等总结

了我国的土壤环境背景值研究，指出我国土壤中镉的背景值平均值为 0.097 mg/kg，红壤的镉背景值为 0.060 mg/kg。近年来，部分地方也出台了土壤环境背景值的地方标准。深圳地方标准《土壤环境背景值》(DB4403/T 68-2020)中红壤中镉的环境背景值为 0.050 mg/kg。综合上述文献，红壤镉的背景值采用两者的平均值，为 0.055 mg/kg。由于现有土壤背景值的数据主要来自于表层土壤，因此本文中环境容量的计算以表层土壤深度为准，即 0.3 m。根据公式(4)的土壤环境容量计算公式，各不同土地利用方式下的环境容量见表 6。公园用地、居住用地、工矿用地和商服用地的土壤镉环境容量分别为 11.68 kg/hm^2、28.89 kg/hm^2、40.84 kg/hm^2 和 40.84 kg/hm^2。

表 6　红壤地区不同土地利用方式下的土壤镉环境容量

	公园用地	居住用地	工矿用地	商服用地
镉环境阈值(mg/kg)	3.30	8.08	11.4	11.4
土壤深度(m)	0.3	0.3	0.3	0.3
土壤背景值(mg/kg)	0.055	0.055	0.055	0.055
土壤环境容量(kg/hm^2)	11.68	28.89	40.84	40.84