《土壤环境承载力核算技术导则》

编制说明

中国科学院南京土壤研究所

中国科学院生态环境研究中心

中国环境科学研究院

二零二四年六月

目录

1 项目背景 1

1.1 任务来源 1

1.2 工作过程 2

2 导则制定的必要性分析 3

3 国内外土壤环境承载力研究现状 3

4 制定的原则和依据 5

4.1 编制原则 5

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 目标受体 Target receptor 7

5.3.2 土壤环境容量 Soil environmental capacity 8

5.3.3 土壤污染物净输入通量 Net input flux of soil pollutant 8

5.3.4 人类活动排放系数 Emission coefficient of human activity 8

5.3.5 土壤环境承载力 Soil environmental carrying capacity 8

5.4 土壤环境承载力核算工作流程 8

5.5 技术方法确定依据 8

6 主要技术要点说明 8

6.1 土壤污染物净输入通量 8

6.2 大气沉降污染物输入通量核算 9

6.3 人类活动排放系数 10

7 对实施本标准的建议 10

参考文献 12

1 项目背景

1.1 任务来源

随着人类工业化和城市化进程的推进，土壤污染问题已成为制约人类经济和社会可持续发展的重要因素。目前，人类活动已对生态环境构成了较大压力。控制人类活动强度或规模，使其处于土壤受体的可承载能力范围之内，已经成为众多相关学者及环境管理部门的共识。国务院于 2016 年 5 月 28 日颁布了《土壤污染防治行动计划》，明确指出应加强土壤环境承载力相关方面的基础研究。同时，成熟有效的土壤环境承载力核算方法也是全面落实《中华人民共和国土壤污染防治法》的重要技术保障。

以往土壤环境评估中，结果主要以污染物浓度或风险指数的方式来呈现。其结果难以为人类活动强度的定量调节提供直观有效的决策支持。据目前公开发表的文献来看，国内外对土壤环境承载力方法论的探索性研究仅有少数几例。然而，现有评估方法未能考虑人类活动强度与污染排放之间的定量关系，其评估结果难以为人类活动强度提供有效预警。

土壤环境承载力可以被定义为确保一定时间和空间范围内的目标受体处于风险可接受条件下，土壤单元还能承受人类活动强度或规模的限值。它的评价内容涵盖了土壤环境容量、土壤污染物净输入通量、人类活动强度与污染物排放之间关系等方面的定量核算模型。然而，在现实环境中，区域土壤属性往往具有时间动态变化性、空间异质性和影响因素复杂性等特点，使得有效表征人类活动强度或规模安全阈值的土壤环境承载力模型构建及其空间精细化核算成为一大难题，受到相关研究者的广泛关注。

在环境承载力模型中土壤环境容量核算方面，以往核算方法较少考虑目标风险阈值的多样性。针对不同保护目标（例如，地下水安全、生态受体安全、农产品质量和人体健康），其相应的土壤污染物风险阈值往往是不尽相同的。而且，针对同一种保护目标，不同的环境因子（例如，土地利用类型和土壤类型）对其风险也会产生一定影响，进而导致了土壤污染物阈值的空间异质性。因此，有必要基于特定保护目标的污染物风险阈值，构建空间精细化的土壤环境容量模型。

在环境承载力模型中土壤污染物净输入通量核算方面，以往核算方法通常采

用空间恒定的残留率（例如 0.95）来确定。污染物在土壤中存在一个动态的输入输出过程。在实际环境中，污染物性质也是影响其在土壤介质中输出量（例如，挥发、淋溶、植物吸收和降解）的一个重要因子。因此，同一土壤环境中不同污染物残留率必然有所差异。而且，土壤污染物的输入/输出过程也可能受到多个环境因子的影响，例如，土地利用类型、土壤类型、和坡度/坡向等。因此，在区域尺度下土壤污染物的残留率往往并非空间恒定的，空间恒定的残留率必然会增加土壤污染物净输入通量的核算误差。随着遥感和地理信息技术的快速发展，区域尺度上相关环境因子的获取变的日益容易，这些可为土壤污染物输入/输出通量的空间精细化核算提供必要的数据支持。因此，有必要构建空间精细化的土壤污染物净输入通量模型。

在未来情景下土壤环境承载力核算方面，以往的核算结果仍主要以污染物浓度或风险指数的方式来呈现，评估模型中尚未结合人类活动强度与污染排放之间的定量关系，其结果难以对未来情景下人类活动强度或规模进行有效的预警。因此，有必要构建一种空间精细化的区域土壤环境承载力评估模型。

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《土壤环境承载力核算技术导则》（以下简称《导则》）编制组，正式开展土壤环境承载力核算方法的研究与制定工作。系统开展了国内外土壤环境承载力研究的文献调研，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《土壤环境承载力核算技术导则（专家咨询稿）》。

2024 年 6 月，召开专家评审会，简介专家意见，会后进行修改。

2 导则制定的必要性分析

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，土壤环境容量与承载力研究逐渐被重视；2020 年 1 月自然资源部发布《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南（试行）》，即“双评价”技术指南，土壤环境承载力是资源环境承载能力的重要约束性指标，为评价土地利用能力提供了科学的依据。指南的发布标志着我国土壤环境承载力研究和评价工作迈出了重要的一步也将迎来新的机遇与挑战。

研究土壤环境承载力是加强我国生态文明建设和生态环境保护的重中之重，建立我国土壤环境承载力技术框架及方法体系是新时期我国深入打好污染防治攻坚战的首要任务之一。土壤环境承载力内涵尚未形成统一认识，尽管涉及诸如土壤污染物迁移转化、交互作用、累积与消减过程、安全阈值和暴露风险等方面国内外研究均取得一定进展，但目前不同土壤类型和土地利用方式下土壤环境承载力研究存在系统性不足，缺乏系统完善的土壤环境承载力制定的指导性文件。可见土壤环境承载力技术框架及方法体系研究已经迫在眉睫。

3 国内外土壤环境承载力研究现状

承载力的概念在许多生态系统管理领域被广泛讨论和应用，包括水环境承载力、大气环境承载力以及土壤环境承载力。土壤环境承载力可以被定义为确保一定时间和空间范围内的目标受体处于风险可接受条件下，土壤单元还能承受人类活动强度或规模的限值。它的评价内容涵盖了土壤环境容量、土壤污染物净输入通量、人类活动强度或规模与污染物排放之间关系等方面的定量核算模型。可见，土壤环境承载力不仅评估土壤中污染对食品质量和生态毒理学效应的风险，还考虑了土壤结构的维护和支持人类社会经济活动的能力。目前，国内外关于土壤环境承载力的报道尚且不多。

在前人研究中曾经提出土壤环境承载力有关概念模型，包括了：基于承载对象（O）、忍耐能力（E）、受承载对象破坏后的恢复能力（R）的“O-E-R”模型；基于压力（P）、状态（S）、响应（R）的“P-S-R”模型。Li 等（2020）提出了包含土壤环境容量、累积速率和风险特征的三个指标集的土壤环境承载力评价方法（图 1），土壤环境容量指标集包含：代表土壤质量的土壤静态容量（kg），影响土壤污染物衰减能力的土壤有机质（%），黏粒含量（%），土壤 pH，阳离子交换量（cmol L^{-1}）；累积速率指标集包含：代表污染物输入的大气沉降（g km^{-2} a^{-1}）和交通排放（g km^{-2} a^{-1}），代表污染物输出的地表径流（g km^{-2} a^{-1}）、淋溶（g km^{-2} a^{-1}）、挥发（g km^{-2} a^{-1}）、降解（g km^{-2} a^{-1}）；风险特征数据集包含：代表风险沟通的土壤污染物物理化学性质和植被覆盖度（%），代表风险受体的土地利用方式、人口密度和膳食结构。基于所提出的方法，还展示了北京城区当前的污染状况和剩余土壤容量，并建立了一个概念性的土壤环境质量“预警”模型，以预测不同累积情景下土壤污染物的时间变化模式。结果显示，北京土壤环境承载力随土地利用类型和污染物而变化。与铜（Cu）、锌（Zn）和铅（Pb）相比，镉（Cd）在住宅区和绿地公园对土壤环境承载力构成了最大的威胁。北京市区土壤中的重金属承载力目前没有超载，并且在假设的污染物输入输出情景下，在短期到中期内不会显著恶化。该方法提供了一种简单、经济且定量的工具，用于绘制土壤质量水平图，并评估中国及其他地区的风险管理措施的需求。

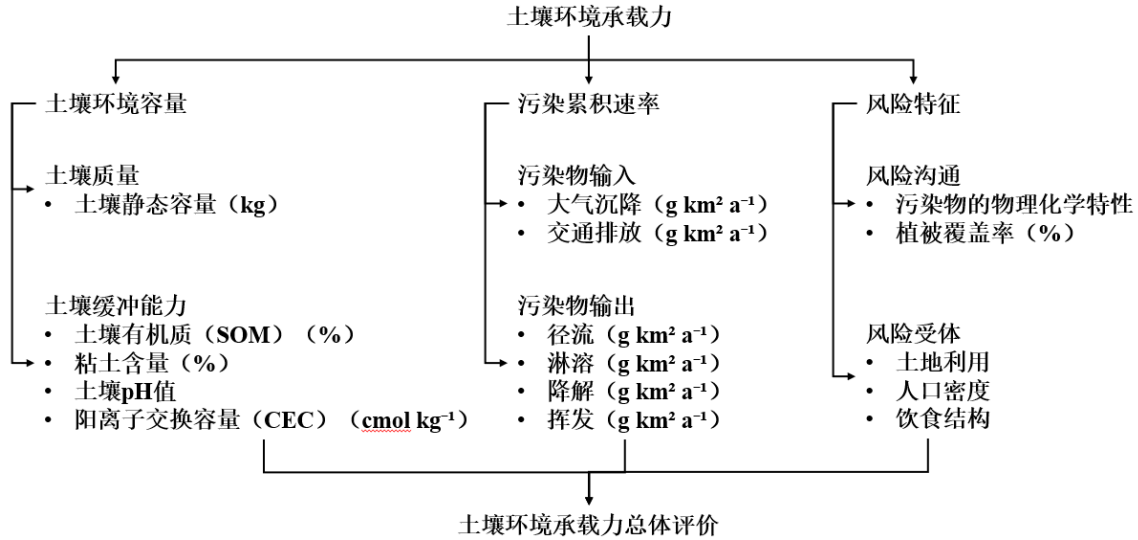


图 1 土壤环境承载力评价框架

Qu 等（2024）提出了关联人类活动强度和污染物排放之间的空间土壤环境承载力核算方法（图 2），首先基于特定保护目标的污染物阈值建立了空间土壤

环境容量模型。随后提出了基于土壤污染物输入/输出通量的空间净输入通量模型，并建立了人类活动强度与污染物排放之间的定量关系，并进一步将其纳入土壤环境承载力模型中。最终建立了土壤环境承载力的空间高精度核算框架。该方法用于评估中国某典型铜冶炼区的铜生产能力的土壤环境承载力。结果表明：Cu、Cd、Pb、Zn、As 和 Cr 的平均土壤环境容量分别为 427.89、16.84、306.41、376.8、71.63 和 392.7 kg hm^{-2}；重金属浓度和土地利用类型共同影响土壤环境容量的空间分布模式；大气沉降是主要的重金属输入途径，较高的净输入通量主要位于研究区的东南部；在当前人类活动强度下 50 年后，Cu、Cd、Pb、Zn、As 和 Cr 的平均土壤环境容量分别为 202.31、1.71、20.9、66.15、36.73 和 3 kg hm^{-2}；为了在 50 年内保持保护目标在可接受的风险水平内，与增加铜生产能力对应的土壤环境承载力为 1.53×10^6 t。该研究为人类活动强度的早期预警提供了一项有效工具。

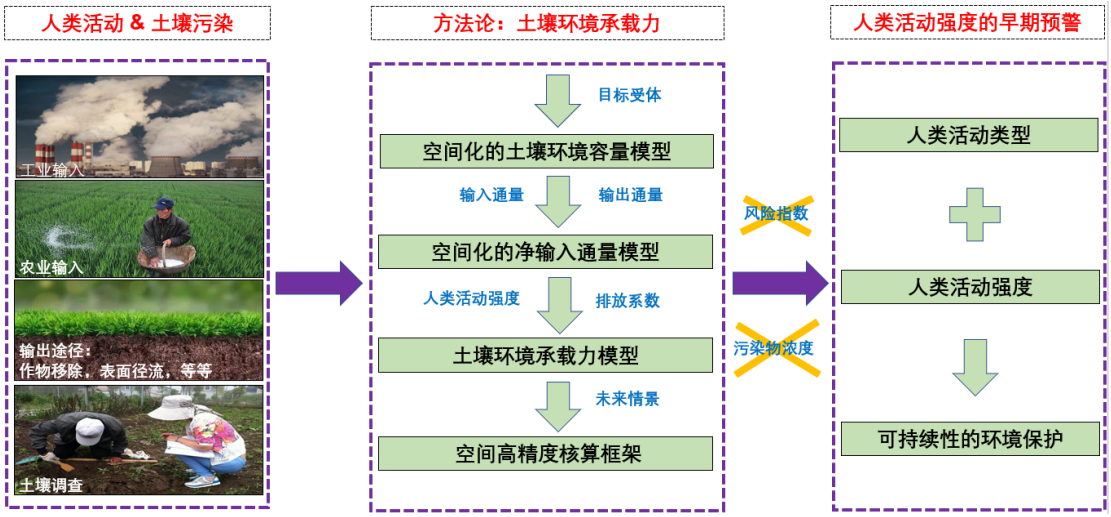


图 2 空间土壤环境承载力核算方法框架

2016 年，国务院发布了《土壤污染防治行动计划》，整合高等学校、研究机构、企业等科研资源，开展土壤环境基准、土壤环境容量与承载能力等方面的基础研究，并在此基础上制定地方和区域政策及管理方法。然而，我国目前依旧缺乏适用于土壤环境承载力精细化核算的指导性文件。

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。对国内外土壤环境承载力研究现状、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，使我国的土壤环境承载力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承载力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。相关土壤环境承载力的工作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，确保我国土壤环境承载力的科学性、准确性和实用性。

（4）充分吸收国内土壤环境承载力的最新研究成果，尤其是有关土壤环境承载力的系列研究成果；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承载力制定的技术导则。

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，充分吸收学习国内外土壤环境容量评估框架、污染物溯源和输入输出通量研究的优势和成熟经验，并结合我国在产业规划和生态环境管理方面实际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、土壤环境承载力核算工作流程、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承载力评价的使用范围、编制依据、技术程序、技术内容和技术要求。

本标准适用于指导土壤环境资源承载力评价，为确定产业规划指标中生态环境管理提供参考依据。

本标准不适用于土壤放射性污染和致病性微生物污染的土壤环境承载力评价。

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 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 目标受体 target receptor

与土壤环境密切相关的研究对象。

5.3.2 土壤环境容量 soil environmental capacity

一定环境单元，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。

5.3.3 土壤污染物净输入通量 net input flux of soil pollutant

单位时间和面积内，土污染物的输入质量与其输出质量之差。

5.3.4 人类活动排放系数 emission coefficient of human activity

单位规模的某人类活动在单位时间内向研究区排放的污染物质量。

5.3.5 土壤环境承载力 soil environmental carrying capacity

确保一定时间和空间范围内的目标受体处于风险可接受条件下，土壤单元还能承受人类活动强度或规模的限值。

5.4 土壤环境承载力核算工作流程

土壤环境容量核算主要包括一下 5 个步骤，具体如下：

（1）确定目标区域条件

（2）明确目标污染物及其排放源

（3）计算土壤环境容量

（4）土壤污染物净输入通量

（5）计算土壤环境承载力

5.5 技术方法确定依据

本标准在获取待研究区域土壤环境容量的基础上，通过污染物源解析方法，获取预设时间内待研究区域土壤污染物净输入通量，得到研究区域的土壤环境容量，通过结合人类活动强度与污染物排放关系，核算得到待研究区域土壤环境承载力。同时，考虑国内现有的土壤环境质量监测能力和实际情况，规定土壤环境承载力核算的技术方法，确保土壤环境承载力核算的科学性、先进性、可行性和可操作性。

6 主要技术要点说明

6.1 土壤污染物净输入通量

土壤污染物净输入通量可被定义为单位时间和面积范围内，土污染物的输入质量与其输出质量之差。理解和计算土壤污染物净输入通量，对于制定土壤污染防治策略、保障土壤环境安全和实现可持续土地利用具有重要意义。

计算土壤污染物净输入通量通常包括以下几个步骤：

确定输入通量：主要包括大气沉降、灌溉水、施肥、农药等来源的污染物输入量。输入通量的测定需要综合考虑这些来源的污染物浓度和应用量，并形成输入通量的空间分布。

确定输出通量：主要包括通过径流、渗漏、作物吸收和挥发等途径排出的污染物量。输出通量的测定需考虑各个输出途径的排放量，并形成输出通量的空间分布。

净输入通量：通过输入通量与输出通量之差得出，即：净输入通量=总输入通量−总输出通量。

6.2 大气沉降污染物输入通量核算

大气沉降是指污染物从大气中沉降到地表的过程，包括湿沉降和干沉降。湿沉降是通过降雨或降雪带下的污染物，而干沉降是通过重力、湍流扩散和静电等物理作用使污染物直接沉降到地表。在环境科学中，评估大气沉降对土壤和水体的影响至关重要。AERMOD（American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model Improvement Committee Model）是由美国气象学会（AMS）和环保署（EPA）共同开发的一个稳态高斯烟流模型。AERMOD模型也是美国环保署（EPA）推荐的一种用于评估大气污染物扩散和沉降的模型，广泛应用于环境影响评价和污染源排放许可等领域。

AERMOD 模型由三个主要部分组成，即 AERMOD 主模型：负责模拟大气中污染物的扩散和沉降过程；气象数据预处理模块 AERMET（AERMOD Meteorological Preprocessor）：用于处理和输入风速、风向、气温、大气稳定度等气象数据；和地形预处理模块 AERMAP（AERMOD Terrain Preprocessor）：用于处理和输入地形数据，确定地形对污染物扩散的影响。

模型输入：

气象数据：包括地面和高空的风速、风向、温度、湿度、太阳辐射、大气稳

定度等。地形数据：包括受影响区域的地形高程、地貌特征等。排放源数据：包括污染源的位置、高度、排放速率、排放温度、排放速率等信息。土地利用数据：包括土地覆盖类型、地表粗糙度等。

模型输出：

污染物浓度分布：在特定时间和空间内的污染物浓度。

沉降量：在地表上的污染物沉降速率，包括湿沉降和干沉降。

6.3 人类活动排放系数

人类活动排放系数指单位规模的某人类活动在单位时间内向研究区排放的污染物质量。是用于量化和评估各种人类活动对环境影响的关键参数。它反映了特定人类活动单位量（如生产、消费等）所排放的污染物数量。其中，不同类型的人类活动（如工业生产、交通运输、农业活动等）有不同的排放特征；采用的技术和工艺不同，排放系数也会有显著差异；排放控制和环境管理措施的实施效果会影响实际排放量，从而影响排放系数。在土壤污染研究和环境管理中，了解和应用人类活动排放系数对污染源识别、污染物总量控制和环境承载力核算至关重要。

计算人类活动排放系数通常包括以下步骤：

数据收集：收集特定人类活动的活动数据（如企业产量、燃料消耗量、面积等）和对应的污染物排放数据。

公式计算：排放系数的基本公式为：排放系数=总排放量/(排放时间×人类活动强度)。

7 对实施本标准的建议

（1）《土壤环境承载力核算技术导则》作为我国开展土壤环境承载力核算的重要参考，建议加快推进关于污染物排放通量和人类活动排放系数的研究，以提供科学依据，为科学管理土地资源、制定环境保护政策、预防土壤污染、保障生态和公众健康提供了坚实的基础。

（2）技术标准的制定和发布应与现行政策法规保持一致。建议完善我国土壤环境承载力研究和管理的政策法规体系，加强技术标准的规范化和指导性作用，

确保政策的有效实施。

（3）鉴于目前相关基础研究仍显不足，建议开展针对相关从业人员的技术培训，提高其对本标准的理解和执行能力。同时，建议在广泛征求各方意见的基础上对《导则》进行修改，先进行试点应用，在实际操作中不断完善和更新，以确保其科学性和实用性。

（4）在土壤污染控制中，推行土壤环境承载力全程管控法，对人类活动强度或规模进行预警，确保一定时间和空间范围内的目标受体处于风险可接受。

参考文献

王恒, 何雨明, 李静文, 等. 基于 OER 概念模型的土壤环境承载力指标体系研究--以四川省某区县为例[J]. 环境保护与循环经济, 2019, 39(4): 39-45.

王奎峰, 李娜, 于学峰, 等. 基于 PSR 概念模型的生态环境承载力评价指标体系研究——以山东半岛为例[J]. 环境科学学报, 2014 (8): 2133-2139.

Li X, Cundy A B, Chen W, et al. Dynamic capacity modelling of soil environment carrying capacity, and developing a soil quality early warning framework for development land in China[J]. Journal of cleaner production, 2020, 257: 120450.

Qu M, Guang X, Chen J, et al. Soil environmental carrying capacity and its spatial high-precision accounting framework[J]. Science of The Total Environment, 2024: 173620.

附录 1 典型的铜冶炼区周边土壤承载力核算案例

1 研究区域和数据

研究区域位于江西省贵溪市一个典型的铜冶炼区周边。研究区域面积约 304 平方公里。采样时间为 2021 年 11 月，共采集土壤样点 241 个（0~20 cm），灌溉水样点 8 个（图 1-1）。采用五点采样法进行土壤样本采集，各样点采集大约 1 kg 土壤，混合均匀后装入自封袋。采样的同时对各样点经纬度、高程、附近可能的污染源等信息进行详细记录。所有样品均在室温下自然风干，去除样品中的杂物，然后进行碾碎并过 0.149 mm 筛。

土壤容重采用环刀法测定，土壤 pH 采用 pH 计(1:2.5 土/水悬浮液)测定，土壤 Cu、Cd、Cr、Pb、Zn 采用原子吸收分光光度计测定，土壤 As 采用原子荧光法测定。灌溉水样品中的 Cd、Pb、Zn、Cu、As、Cr 采用 ICP-MS (Nex-ION300X) 测定。这些金属元素在标准参考物质（GBW07401：GSS-1）中的回收率为 93.5%-102.5%。这些重金属元素的相对标准偏差均小于 5%。

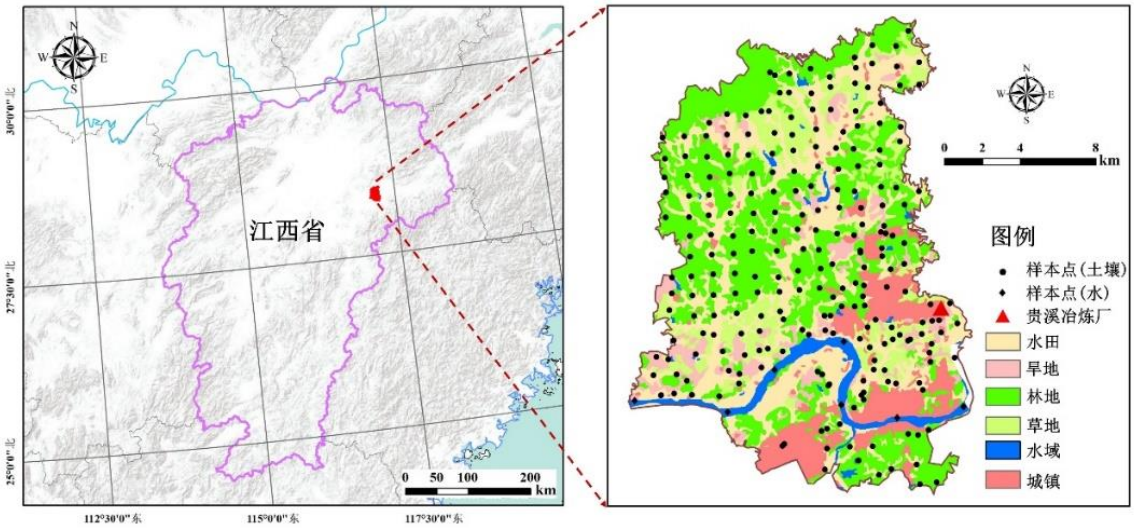


图 1-1 研究区位置、土地利用类型和样本点的空间分布

本研究土壤重金属的风险阈值参考《土壤环境质量/农用地风险管控标准（试行）》（GB 15618-2018）和《建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（DB 36/1282-2020）。贵溪铜冶炼厂当前的铜产能为 100 万吨。研究区域内各重金属的排放量采用大气扩散模型（AERMOD）核算，进而得到铜冶炼产能与各重金属排放量之间的定量关系（即铜冶炼的重金属排放系数）。本研究案例关注的是 50 年内，特定土壤保护目标风险可接受条件下，贵溪铜冶炼厂产能增加的规模。

2 重金属的土壤环境容量

研究区内重金属土壤环境容量的描述性统计量见表 1-1。研究区内各重金属土壤环境容量的平均值分别为：Cu（427.89 kg hm^{-2}）、Cd（16.84 kg hm^{-2}）、Pb（306.41 kg hm^{-2}）、Zn（376.80 kg hm^{-2}）、As（71.63 kg hm^{-2}）和 Cr（392.70 kg hm^{-2}）。总的来说，研究区内重金属的环境容量处于比较高的水平。

重金属土壤环境容量的空间分布格局如图 1-2 所示。贵溪铜冶炼厂周围的重金属土壤环境容量并非都较低。原因可能在于土壤环境容量受到土地利用类型和土壤重金属浓度的共同影响。工商业土地利用类型上的重金属阈值往往要高于农业用地上的重金属阈值。

表 1-1 研究区内重金属土壤环境容量(SEC) (kg hm^{-2})的描述性统计 ($N = 241$)。

重金属	最小值	最大值	平均值	标准误差	变异系数
Cu	-4651.71	57739.2	4278.9	13218.61	3.09
Cd	-0.98	208.49	16.84	48.03	2.82
Pb	-6.78	2495.53	306.41	537.36	1.75
Zn	174.30	805.70	376.80	99.63	0.26
As	-9.28	173.69	71.63	25.15	0.33
Cr	173.20	884.20	392.70	156.98	0.40

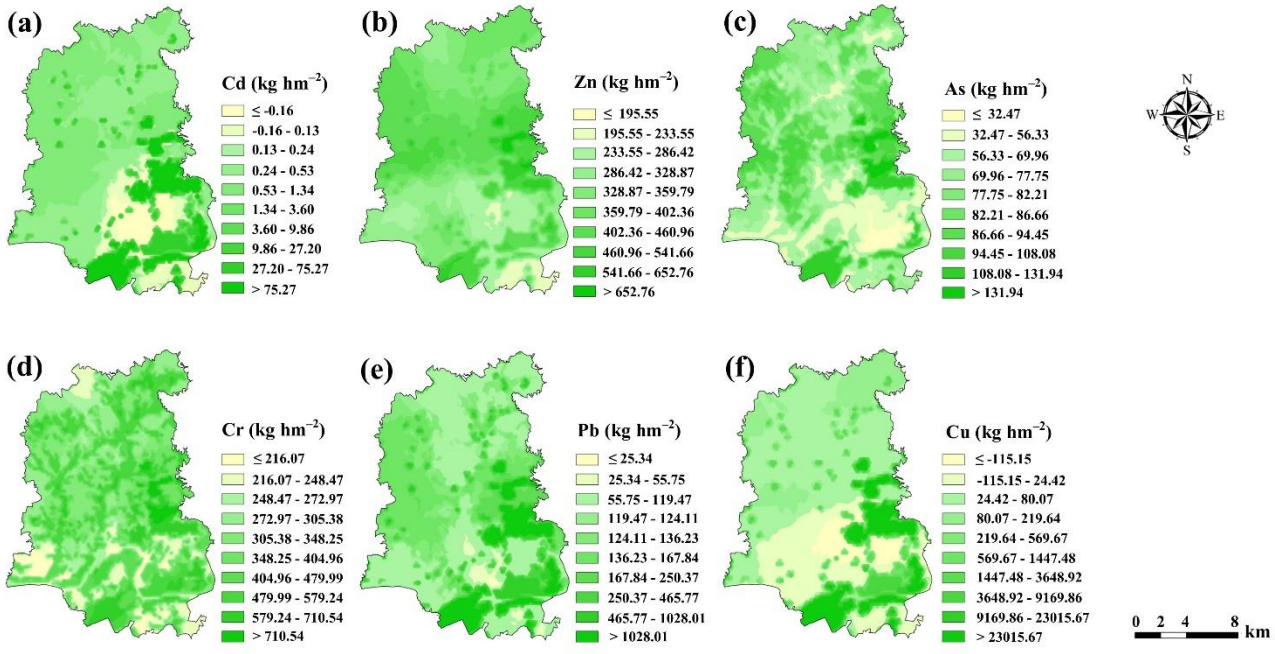


图 1-2 重金属土壤环境容量的空间分布图

3 土壤重金属的净输入通量

研究区大气沉降产生的重金属输入通量的空间分布如图 3 所示。各重金属大气沉降通量的空间分布格局整体相似，高沉降通量主要位于研究区东南部，其总体分布格局为由研究区东南部向周围逐渐递减（图 3）。

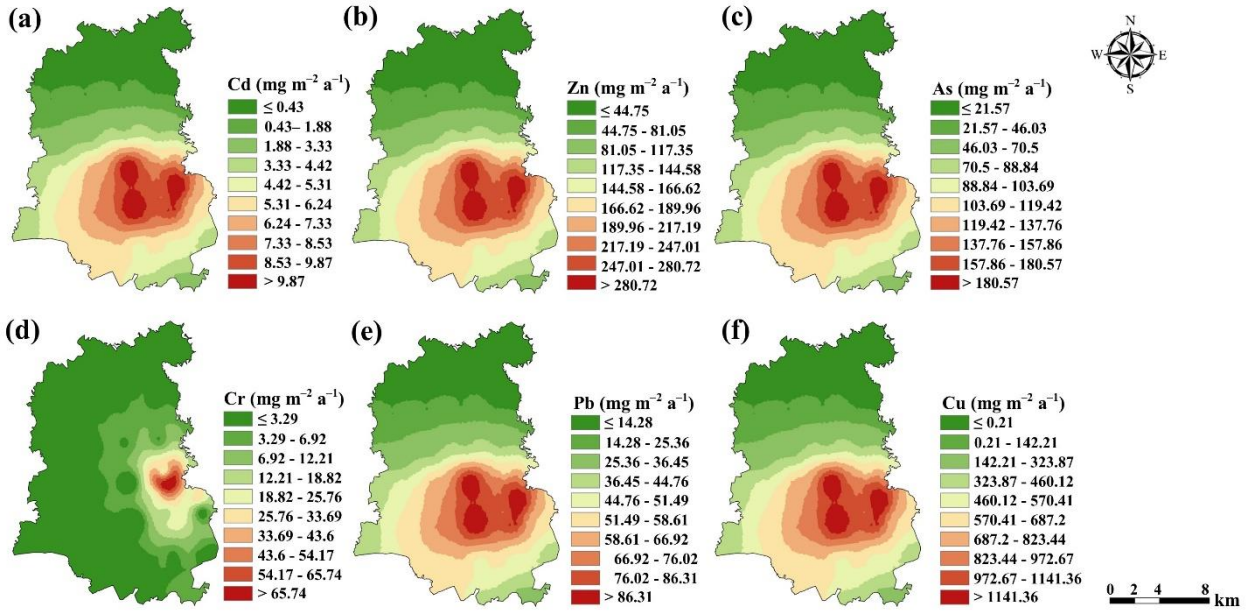


图 1-3 大气沉降产生的重金属输入通量的空间分布图

研究区灌溉水的重金属浓度通过实际监测得到，灌溉水中各重金属的平均浓度分别为：Cd（1.97×10^{-5} mg/L）、Pb（1.1×10^{-4} mg/L）、Zn（2.13×10^{-3} mg/L）、Cu（2.12×10^{-3} mg/L）、As（1.74×10^{-3} mg/L）和 Cr（1.41×10^{-5} mg/L）。研究区农田灌溉水产生的土壤重金属输入通量的空间分布如图 4 所示。

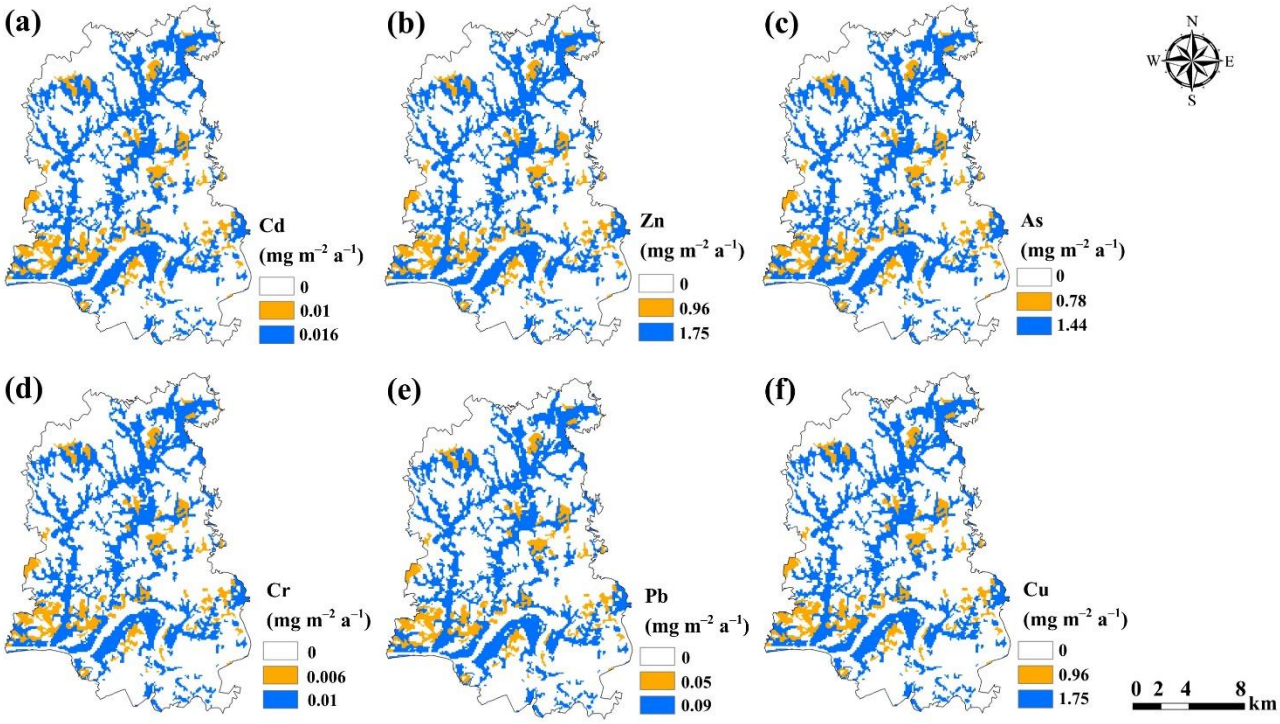


图 1-4 农田灌溉水产生的土壤重金属输入通量的空间分布图

对于化肥和农药使用，经实地调查，当地农民对水田和旱地的农药化肥施用并无明显差异。通过计算得到研究区农田土壤重金属化肥使用通量分别为：Cd（0.08 mg m^{-2} a^{-1}）、Pb（0.88 mg m^{-2} a^{-1}）、Zn（6.52 mg m^{-2} a^{-1}）、Cu（1.51 mg m^{-2} a^{-1}）、As（0.45 mg m^{-2} a^{-1}）和 Cr（1.03 mg m^{-2} a^{-1}）。通过计算得到研究区农田农药使用产生的土壤重金属输入通量分别为：Cd（0）、Pb（0）、Zn（0.04 mg m^{-2} a^{-1}）、Cu（0.02 mg m^{-2} a^{-1}）、As（0）和 Cr（0.05 mg m^{-2} a^{-1}）。

研究区各输入途径产生的重金属年均输入质量见于表 1-2。大气沉降通量为研究区土壤重金属最主要的输入途径。

表 1-2 研究区各输入途径产生的重金属年均输入质量（t）

重金属	大气沉降	灌溉水	化肥农药
As	24.76	0.14	0.05
Cd	1.22	0.002	0.008
Cr	1.73	0.001	0.12
Cu	130.41	0.17	0.16
Pb	12.58	0.009	0.09
Zn	40.61	0.17	0.7

研究区作物移除（包括农作物收获移除和秸秆移除）产生的土壤重金属输出通量的空间分布如图 5 所示。研究区通过作物移除的土壤重金属年均输出质量为：As（0.04 t）、Cd（0.01 t）、Cr（0.01 t）、Cu（0.26 t）、Pb（0.01 t）和 Zn（1.37 t）。

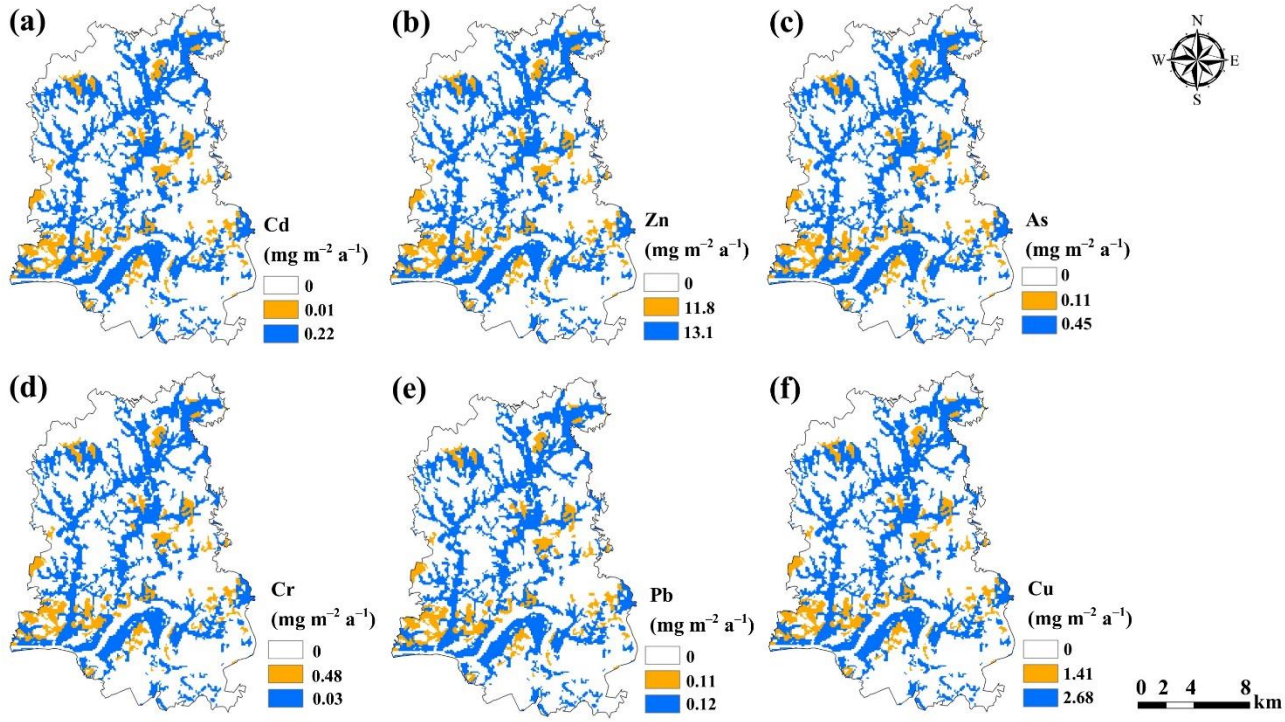


图 1-5 作物移除产生的土壤重金属输出通量的空间分布图

综合上述土壤重金属各输入/输出途径，最终得到研究区土壤重金属净输入通量的空间分布图（图 6）。值得注意的是，研究区土壤重金属净输入通量的空间分布格局与大气沉降通量的空间分布格局比较相似。这也进一步证实了整个研究区域内的各重金属总输入量均远远高于输出量，其中大气沉降是占据主导的重金属输入源（> 90%）。

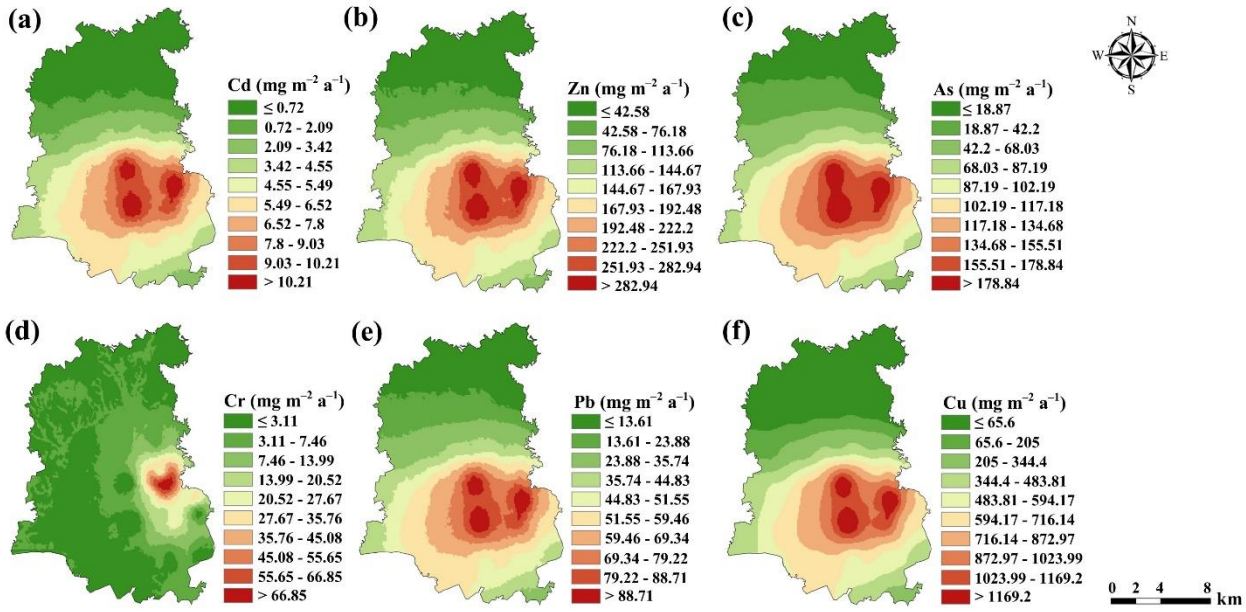


图 1-6 土壤重金属净输入通量的空间分布图

4 土壤环境环境承载力

维持当前人类活动强度不变的情况下，50 年后重金属土壤环境容量的描述性统计量如表 1-3 所示。50 年后各重金属的平均土壤环境容量均不同程度的减小。这也说明当前人类活动强度对保护受体产生了显著的负面影响。

表 1-3 维持当前人类活动强度不变的情况下，50 年后重金属土壤环境容量 (SEC) (kg hm^{-2})的描述性统计 ($N = 241$)

重金属	最小值	最大值	平均值	标准误差
Cd	-6.36	206.3	15.13	47.57
Zn	42.02	746.71	310.65	111.01
As	-91.02	143.32	34.90	38.56
Cr	171.83	875.94	389.70	155.66
Pb	-36.89	2470.91	285.51	534.70
Cu	-955.2	57497.7	4055.07	13180.21

确保目标受体在未来 50 年内的风险可接受条件下，本研究区域内各重金属的最高额外年均输入质量分别为：Cr（236.35 吨）、Pb（173.19 吨）、Cd（9.86 吨）、Zn（188.41 吨）、Cu（234.70 吨）、As（24.28 吨）（表 1-4）。铜冶炼过程会排放多种重金属，这些重金属往往具有不同的排放系数。对应于不同目标污染物的土壤环境承载力必然存在一定差异。确保未来 50 年研究区域内的目标受体处于风

险可接受条件下，土壤单元还能承受增产铜冶炼产能的限值分别为：Cr（136.63 百万吨）、Pb（13.76 百万吨）、Cd（8.06 百万吨）、Zn（4.64 百万吨）、Cu（18.4 百万吨）、As（1.53 百万吨）（表 1-5）。因此，对于所有重金属，确保未来 50 年研究区域内的目标受体处于风险可接受条件下，土壤单元还能承受增产铜冶炼产能的限值为 153 万吨。

表 1-4 确保目标受体在未来 50 年内的风险可接受条件下，本研究区域内各重金属的最高额外年均输入质量（t）

Cr	Pb	Cd	Zn	Cu	As
236.35	173.19	9.86	188.41	234.7	24.28

表 1-5 确保未来 50 年研究区域内的目标受体处于风险可接受条件下，土壤单元还能承受增产铜冶炼产能的限值（t）

Cr	Pb	Cd	Zn	Cu	As
136.63×10^6	13.76×10^6	8.06×10^6	4.64×10^6	18.4×10^6	1.53×10^6