环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.5
第41卷 第5期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第5期
2020年5月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第5期 2020年5月
Vol.41, No.5 May, 2020

土壤环境承载力评价体系构建与应用

李笑诺[1], 丁寿康[1,2], 陈卫平[1,2*], 王夏晖[3], 吕斯丹[4], 刘睿[5]
(1. 中国科学院生态环境研究中心土壤环境科学与技术实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 生态环境部环境规划院土壤环境保护中心, 北京 100012; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟院重点实验室, 北京 100101; 5. 河南省科学院科技创新战略研究院, 郑州 450002)

摘要: 为了解土壤环境对污染物的容纳能力和对人类活动的承载能力,达到有效遏制土壤污染的加重趋势和实现土壤环境风险全面管控的目的,基于土壤环境质量评价,通过区域土壤污染物输入-输出通量分析和污染风险特征分析,以土壤净化缓冲功能为核心构建全面反映土壤性质、污染演变趋势和风险特征的土壤环境承载力综合评价指标体系,并提出基于评价指标的安全系数核算方法. 以北京市建设用地为研究对象开展区域尺度的土壤重金属环境承载力定量评价,验证评价指标体系与方法的科学可行性. 结果表明,北京市 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的土壤环境承载力差异明显,Cd 元素土壤环境承载力较其他元素低. 明确土壤环境承载力概念与内涵、完善土壤环境承载力评价框架、构建土壤环境承载力信息数据库和开展土壤环境承载力核算试点等 4 个方面对土壤污染的有效防治具有重要意义.

关键词: 环境容量; 土壤环境承载力; 评价体系; 农用地; 建设用地
中图分类号: X26; X32; X825 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)05-2373-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201911159

Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity

LI Xiao-nuo[1], DING Shou-kang[1,2], CHEN Wei-ping[1,2*], WANG Xia-hui[3], LÜ Si-dan[4], LIU Rui[5]
(1. Laboratory of Soil Environmental Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Center for Soil Environmental Protection, Chinese Academy of Environmental Planning, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China; 4. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 5. Academy of Science and Technology Innovation Strategy, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: To understand the effect of soil environmental carrying capacity on pollutants and human activities, as well as to effectively prevent the aggravation of soil pollution and control soil environmental risks, a comprehensive indicator system for soil environmental carrying capacity is developed by analyzing the input-output flux and risk characteristics of soil pollutants. Furthermore, an evaluation method for soil environmental carrying capacity is proposed by defining safety coefficients related to evaluation indicators. Based on evaluation of soil environmental quality, the system reflects soil properties, pollution evolution trends, and risk characteristics, focusing on the soil buffering function. Further, a quantitative evaluation is carried out to assess the regional soil environmental carrying capacity of heavy metals on development land in Beijing. The results show that the soil environmental carrying capacity of Cu, Zn, Pb, and Cd in Beijing varies widely. The soil environmental carrying capacity of Cd is much lower than that of other elements. Four policy recommendations are proposed as significant for effective soil pollution prevention and control: clarifying concepts for soil environmental carrying capacity, improving the evaluation framework, constructing an information database, and implementing demonstration pilots.

Key words: environmental capacity; soil environmental carrying capacity; evaluation system; agricultural land; development land

土壤在保护环境和维持生态平衡中发挥着重要作用,更是保障食品质量安全和人体健康的重要物质基础. 然而随着快速城市化进程和产业结构调整,忽视了污染物排放和社会经济活动超越土壤环境承载力的风险,最终导致社会经济发展与土壤质量安全的冲突与失衡. 开展不同土地功能、区域空间布局和土壤环境特征下土壤环境对污染物的容纳能力和对人类活动的承载能力研究,是对“土十条”中“整合科研资源,开展土壤环境容量与承载能力等基础研究”的积极响应,明确区域社会经济活动与土壤环境质量之间的关系,对于优化区域产业结构布局,建立及时和精确的土壤环境质量预警机制具有重要的现实意义和指导价值.

土壤环境质量标准、土壤自净或缓冲能力和静态/动态容量评价模型是开展土壤环境容量及土壤环境承载力研究的 3 个关键问题[1~3]. 国内外已开展的土壤环境承载力研究涵盖土壤环境容量[1~8]、

收稿日期: 2019-11-18; **修订日期**: 2019-12-20
基金项目: 生态环境部环境规划院 2017 年度国家生态环境保护规划重点问题研究专项(2017A118)
作者简介: 李笑诺(1988~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为污染场地可持续管理, E-mail: xnli@rcees.ac.cn
* 通信作者, E-mail: wpchen@rcees.ac.cn

土壤负荷能力[9~14]、土地承载能力[15~21]和土壤缓冲能力[22~30]等方面,对土壤环境承载力的内涵、评价指标、评价方法与研究内容等方面进行了初步探索,指出土壤环境容量是土壤环境承载力的核心内容,二者相互联系、相互区别,土壤环境承载力不应仅局限于土壤对污染物的容纳能力研究,也要体现在维持土壤环境系统功能结构不发生变化的前提下,土壤系统对人类社会和经济活动的承载能力.但由于土壤环境承载力的动态变化性、区域异质性及其影响因素复杂性,对社会、经济、资源、环境和技术等要素对土壤环境承载力的共同作用机制仍缺乏动态性和系统性的全面考虑[4,5].目前还未形成统一认可的内涵界定、科学系统的土壤环境承载指标体系及统筹考虑土壤环境承载力影响因素的核算方法.基于此,本研究综合考虑土地利用类型、土壤环境特征、风险作用机制、区域空间布局、社会经济活动和污染物特征等因素,构建符合我国国情背景下的土壤环境承载力评价指标体系和核算方法,并以北京市为例,开展了土壤重金属环境承载力应用研究,最后提出基于土壤环境承载力的土壤环境管理政策建议,以加快实现土壤环境风险的分类分级分阶段管理.

1 材料与方法

综合国内外土壤环境承载力的研究进展,本研究从土壤功能的角度将土壤环境承载力定义为:在一定时期和一定空间范围内,在维持土壤环境系统结构和功能不发生改变的前提下,土壤单元所能承受的人类活动的规模和强度的阈值,主要包括土壤对污染物的接纳能力、人类社会经济活动对土壤环境系统的压力和土壤对潜在风险的承载能力这3个方面.因此,区域土壤环境承载力必须综合考虑土地功能、土壤污染、社会经济和土地空间规划等多重指标,强化土壤环境容量,构建以土壤净化缓冲功能为核心的可综合反映人类社会经济活动对土壤环境影响的评价指标体系.

1.1 土壤环境承载力评价框架

基于土壤环境承载力内涵,本研究从土壤环境负荷影响因素入手,以土壤净化缓冲功能为核心构建了涵盖土壤环境容量、累积速率与风险特征这3个方面的土壤环境承载力综合评价概念框架(图1).其中:① 土壤环境容量指标反映土壤容纳污染物的静态能力和动态变化,从土壤环境质量现状和土壤环境对污染物的自然消减两方面衡量;② 累积速率指标反映区域土壤环境承载力随污染累积的时间变化趋势,分析由人类社会经济活动引发的污染物输入与输出;③ 风险特征指标反映污染潜在风险对土壤环境承载力的作用机制,土壤环境因污染物类型、土地结构、暴露受体和传播途径等风险贡献因子表现出理论承载力与实际承载力的差异.

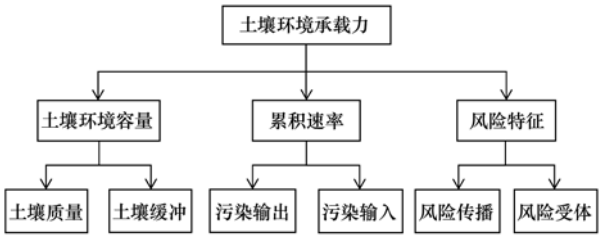

图1 土壤环境承载力评价概念框架

Fig. 1 Conceptual framework for soil environmental carrying capacity

1.2 土壤环境承载力评价指标体系

基于土壤环境承载力评价概念框架,根据文献调研,以全面性和系统性、代表性和简洁性、静态性与动态性、可行性和可操作性为指标选取原则,构建涵盖3个一级指标、6个二级指标和20个三级指标的土壤环境承载力综合评价指标体系,如表1所示.

(1)土壤环境容量指标 土壤环境容量是评价土壤环境承载力的核心内容,不仅考虑维持土壤生态系统正常结构与功能的环境质量极限值,还考虑了土壤污染物在时间维度上输入、输出和累积的动态过程,反映土壤环境的质量现状、土壤容纳污染物的能力和土壤环境的自净作用等.广义的土壤环境容量在表征土壤环境质量现状的基础上,也考虑了土壤对污染物缓冲能力,而土壤由于土壤性质不同表现出对污染物缓冲性能的巨大差异,土壤性质指标是否全面决定了表征土壤自然消减能力的合理准确性.

(2)累积速率指标 人类社会经济活动直接影响输入、输出土壤环境系统的污染物种类和数量,及污染物在土壤系统内部的迁移转化,是预测土壤污染物累积速率的关键.如表1所示,污染输入方式主要包括工业烟尘排放、交通排放(建设用地)和农药、农膜、化肥、灌溉水等污染源的农田输入;进入土壤的污染物经一系列物理、化学和生物复杂反应之后,以作物吸收、流失、淋溶、挥发和降解等形式输出.

(3)风险特征指标 土壤环境承载力存在明显的区域性特点,即使具有相同的土壤环境容量,不同地块也会因污染物类型、土地用途、暴露受体、风险传播途径和区域自然水文条件等的不同表现出土壤环境承载力的空间异质性.其中,植被覆盖率与土地利用方式密切相关,植物对污染物的拦截、吸收都会显著影响污染物在大气-土壤系统及土壤-水系统的分配、交互和残留情况,理论上,森林和草地等植被

表 1　土壤环境承载力综合评价指标

Table 1　Comprehensive evaluation indicators of soil environmental carrying capacity

一级指标	二级指标	三级指标	内涵	评价方法
土壤环境容量	土壤质量	土壤静容量	土壤容纳污染物的能力	最大允许极限值与污染物含量的差值
	土壤缓冲	土壤有机质	影响土壤保肥力和缓冲性	实验测量
		黏粒含量	影响土壤通气、保肥、保水状况等	实验测量
		土壤酸碱度	影响土壤环境和污染物形态	实验测量
		阳离子交换量	影响土壤保肥力和缓冲性	实验测量
累积速率	污染输入	大气沉降通量	反映大气污染物对土壤环境的间接影响	观测或实验测量
		交通排放(建设用地)	通过汽车尾气排放、汽车轮胎及刹车片磨损等过程释放到土壤中的污染物	利用汽车保有量、排放因子、行驶里程等参数估算
		农业投入(农用地)	反映施肥和石灰输入、灌溉水等行为对土壤环境的影响	施用量(或灌溉量)×施用品(或灌溉水)中污染物含量
		植物吸收量(农用地)	反映农产品污染水平	实验测量
	污染输出	污染物流失	土壤中污染物随土壤侵蚀或地表径流的迁移流失	土壤侵蚀强度、年均地表径流量
		污染物淋溶	污染物从耕层向底层的垂直迁移或到地下水的淋失	地下水污染指数法
		污染物挥发	挥发或半挥发性污染物从土壤到大气的逸散过程	污染物浓度×挥发速率
		污染物降解	污染物经物理、化学或生物作用衰减、改变有效态	污染物浓度×降解系数
风险特征(建设用地)	风险传播	污染理化特征	不同污染物具有不同的毒性特征和风险传播途径	按污染物毒性系数、生态风险因子及扩散特征等综合赋值为 1、2 和 3
		植被覆盖率	影响污染物截留、迁移	按覆盖率赋值：<20%、20%~50% 和 >50% 分别赋值为 1、2 和 3
		土地利用	反映区域土地利用类型的比例及空间布局	按区域主要土地利用类型赋值：非敏感类建设用地、敏感类建设用地分别赋值为 1 和 2
	风险受体	人口密度	反映土壤污染对人体健康的风险危害水平	按密度等级：<5 000、5 000~10 000、>10 000 人·km^{-2} 分别赋值为 1、2 和 3
		饮食结构	食物或饮用水来源的多样性	按饮用水、食物来源赋值：供给途径多则安全管理风险低，赋值为 1；反之，高风险赋值为 2
风险特征(农用地)	作物富集能力	富集因子	反映重金属在作物籽粒中的富集程度	作物籽粒重金属含量/土壤重金属含量
	饮食结构特征	作物重金属摄入比重	反映重金属作物摄入量占摄入食物总量的百分比	重金属超标作物量/摄入食物总量

覆盖区的污染风险显著低于硬化路面或裸露地表. 其他诸如人口密集程度等因素也会对区域土壤环境承载力产生不同程度的影响，人口密度高则增加污染暴露风险，从而减少了土壤环境的污染物负荷量. 对农用地，食用作物的重金属富集水平和重金属超标作物比重是两个较为关键的风险贡献因子.

1.3　评价方法

基于上述指标计算得到的土壤环境承载力是研究区域土壤环境承载力的最大理论限值，而实际规划中出于土地安全利用、可持续利用的考量，必须对理论值进行合理调整，预留一定的安全余量. 本研究以土壤环境承载力影响因素为依据设置安全系数，基于土壤缓冲指标、累积速率指标和风险特征指标，分别定义土壤缓冲系数、累积系数和风险系数校正土壤环境绝对容量(静容量)，提出土壤环境承载力评价方法：

$$\mathrm{SECC} = d \times \rho \times A \times (S_i - C_i) \times F_1 \times F_2 \times F_3 \tag{1}$$

式中，SECC(soil environmental carrying capacity)为区域土壤环境承载力(kg)；d 为土壤深度(m)，一般只考虑表层 20 cm；ρ 为土壤容重(kg·m^{-3})；A 为区域建设用地面积或农用地面积(km^2)；C_i 为污染物现状值(mg·kg^{-1})；S_i 为相应土地利用类型下的土壤环境质量标准(mg·kg^{-1})；F_1 为土壤缓冲系数，$0 < F_1 \leq 1$；F_2 为累积系数，$0 < F_2 \leq 1$；F_3 为风险系数，$0 < F_3 \leq 1$. 各系数定义及计算方法如下.

1.3.1 土壤缓冲系数(F_1)

本研究借助自然消减能力(NAC)表征土壤缓冲系数,计算方法采用广泛使用的生态系统服务绩效指数(EPX)[22,31],公式如下:

$$NAC = 10^{-\left[\omega_1\left|\log\frac{SOM}{SOM_{ref}}\right|+\omega_2\left|\log\frac{CLAY}{CLAY_{ref}}\right|+\omega_3\left|\log\frac{CEC}{CEC_{ref}}\right|+\omega_4\left|\log\frac{pH}{pH_{ref}}\right|\right]} \quad (2)$$

式中,ref 分别表示相应指标的参考值,ω_i 为各指标权重. 本研究以土壤有机质(SOM)、黏粒含量(CLAY)、土壤酸碱度(pH)和阳离子交换量(CEC)等指标为例,表征污染物在土壤中滞留能力或土壤对污染物的净化作用. 需要说明的是,影响自然消减能力的关键因子及其贡献率随土壤理化性质和污染物属性可表现出较大差异. 实际应用中需根据研究区域土壤环境的现实情况,选取土壤自然消减能力的影响指标,并按各指标贡献率的大小进行权重赋值.

1.3.2 累积系数(F_2)

累积系数由区域土壤年累积量与土壤环境静容量的比值决定. 年累积量越大,剩余容量越小. 区域土壤年累积量(Δacc)取决于污染物输入量和输出量的差值,F_2 计算公式如下:

$$F_2 = 1 - \frac{I_{in} - I_{out}}{d \times \rho \times A \times (S_i - C_i)} \quad (3)$$

式中,I_{in} 为污染物年均输入量($kg \cdot a^{-1}$);I_{out} 为污染物年均输出量($kg \cdot a^{-1}$);d、ρ、A、C_i 和 S_i 的含义同公式(1).

对于建设用地,主要考虑大气沉降(I_{atm})和交通排放(I_{traf})这 2 种输入途径,以及地表径流(I_{run})、淋溶(I_{lea})、挥发(I_{vol})和降解(I_{deg})等输出过程. 计算公式为:

$$I_{in} = I_{atm} + I_{traf} \quad (4)$$

$$I_{out} = I_{run} + I_{lea} + I_{vol} + I_{deg} \quad (5)$$

对于农用地,主要考虑大气沉降(I_{atm})、灌溉水(I_{irr})、施肥(I_{fert})和石灰(I_{lime})输入等 3 种输入途径,以及作物收获(U)、秸秆移除(H)和排水(D)这 3 个输出过程. 计算公式为:

$$I_{in} = I_{atm} + I_{irr} + I_{fert} + I_{lime} \quad (6)$$

$$I_{out} = U + H + D \quad (7)$$

由于污染物在土壤中的迁移、转化过程复杂,模型参数多且部分数据不易获取,因此实际操作中常借助土壤污染物残留率(K)估算其年净累积量. K 值可通过实验测定,也可参阅文献获得. 区域土壤年累积量计算公式可简化为:

$$\Delta acc = I_{in} \times K \quad (8)$$

1.3.3 风险系数(F_3)

风险系数由污染物的潜在空间风险决定,为其倒数. 风险系数越大,承载力越小.

对建设用地,通过专家咨询等方法对各级指标按重要性赋权,如表 1 所示,包括风险传播和风险受体的两个一级指标及 5 个二级指标;其次,根据案例研究区域实际情况对二级指标进行等级打分;第三,基于权重和打分结果,逐层(或级)相乘加和,得到潜在空间风险值. 计算公式如下:

$$R = \omega_1 \times \left[\sum_{i=1}^{2}(\omega_{1i} \times S_{1i})\right] + \omega_2 \times \left[\sum_{j=1}^{3}(\omega_{2j} \times S_{2j})\right] \quad (9)$$

式中,R 为污染物潜在空间风险,无量纲;ω_1 为风险传播的权重,无量纲;ω_2 为风险受体的权重,无量纲;S 为表 1 中 5 个三级指标的分值,无量纲;i 和 j 分别为风险传播和风险受体对应的三级指标.

对农用地,基于文献资料与实地调研,获取作物重金属富集系数(PUF)和区域人群某重金属超标作物摄入比重(P). 以水稻镉污染为例,风险系数计算公式如下:

$$F_3 = \min\left(\frac{PUF_{ref}}{PUF_i} \times \frac{1}{P},\ 1\right) \quad (10)$$

式中,PUF_{ref} 指水稻镉含量质量标准($mg \cdot kg^{-1}$)与土壤镉风险筛选值($mg \cdot kg^{-1}$)的比值,如在土壤 pH 小于 5.5 时,参考值为 0.2/0.3 = 0.667;i 表示不同的作物种类.

2 案例分析

根据调研,Pb、Cd、Cu 和 Zn 是北京城市土壤中广泛存在的污染物,且污染水平逐年增加[32~34]. 本文以北京市五环内住宅用地和公园绿地为研究区域,验证评价方法的实用性和可操作性,为方便计算,引用已有研究数据,评价比较 Pb、Cd、Cu 和 Zn 等 4 种特征污染物的土壤环境承载力.

2.1 土壤重金属环境静容量

根据 Liu 等[32]前期的研究,采用网格平均布点法对北京市五环内住宅用地和公园绿地进行土壤样品的采集,共获得 76 个住宅用地土壤样品和 30 个公园绿地土壤样品,实验测量住宅用地和公园绿地土壤容重均值分别为 2.91 $g \cdot cm^{-3}$ 和 2.84 $g \cdot cm^{-3}$,各重金属元素基准值和观测值如表 2 所示. 根据 2010 年北京市遥感影像解译五环内和公园绿地面积分别为 536.65 km^2 和 80.68 km^2,利用公式(1)计算各重金属环境静容量值.

表 2　重金属元素各指标值[1)]

Table 2　Values of heavy metals

元素	基准值/mg·kg^{-1}		观测值/mg·kg^{-1}		环境静容量/kt	
	住宅用地	公园绿地	住宅用地	公园绿地	住宅用地	公园绿地
Cd	19	36	0.131	0.133	2.946	0.821
Cu	2 000	18 000	18.623	21.695	309.422	411.938
Pb	400	800	24.059	31.608	58.708	411.711
Zn	3 500	5 000	78.063	78.859	534.387	112.758

1）观测值参考文献[32]；Cd、Cu 和 Pb 基准值参考文献[35]；Zn 基准值参考文献[36]

2.2　土壤缓冲系数

实验室检测各样点的土壤有机质、黏粒含量、土壤酸碱度和阳离子交换量等性质指标. 各指标参考值确定原则为：① 根据北京市土壤酸碱度，选取 pH 参考值为7.5；②对于数值越大土壤缓冲能力越好的指标，如 Clay 和 SOM，取指标最大值为参考值；③ 其他指标如 CEC，取其中位数为参考值；④ 若指标实测值高于参考值，则不计入公式计算.

基于熵权法[31]计算指标权重，综上，各指标观测值、参考值及权重见表 3.

表 3　土壤性质指标[1)]

Table 3　Soil property indicators

参数		pH	黏粒含量/%	土壤有机质/%	阳离子交换量/cmol·kg^{-1}
观测值	住宅用地	8.265	6.232	1.18	18.129
	公园绿地	8.247	6.616	1.103	17.621
参考值		7.5	17.669	5.272	17.936
权重		0.25	0.32	0.27	0.16

1）观测值参考文献[32]

利用公式(2)计算北京市住宅用地和公园绿地的土壤自然消减能力，其土壤缓冲系数分别为 0.537 和 0.539.

2.3　累积系数

城市土壤中污染物累积是一个开放的、复杂的、动态的过程，大气沉降是城市土壤污染物的主要输入途径[37~39]. 汽车轮胎及刹车片磨损造成的重金属释放(以下统称为交通排放)是北京市建成区重金属污染的另一个重要的输入途径[40]. 累积系数的相关数据来源及假设为：① 假设大气沉降中 90% 的重金属进入北京市五环内土壤，利用北京市 2007 ~ 2010 年大气中各重金属的干湿沉降年均通量[41]，估算北京市五环内土壤中重金属的大气年均输入量；② 假设汽车轮胎及刹车片磨损中 90% 的重金属进入北京市五环内土壤，利用北京市 2002 ~ 2012 年机动车重金属年排放量[40]，估算北京市五环内土壤中重金属的交通年均输入量；③ 本研究中各重金属元素 K 值均取 0.95.

利用公式(4)和(8)计算不同土地功能区各元素年均累积量，相关计算结果见表 4.

从土壤重金属静容量与年均累积量比值可以看出，在保持当前年累积量的情况下，各元素超标年限较长，因此将住宅用地和公园绿地中各重金属元素的累积系数定义为 1.

表 4　重金属元素累积指标

Table 4　Cumulative indicators of heavy metals

项目		Cd	Cu	Pb	Zn
大气沉降通量/mg·(m^2·a)$^{-1}$		0.460	19.800	19.600	86.500
大气年均输入量/t	住宅用地	0.198	8.529	8.443	37.262
	公园绿地	0.004 5	0.193	0.191	0.842
交通排放量/t·a^{-1}		0.030	7.120	0.830	19.600
交通年均输入量/t		0.027	6.408	0.747	17.640
年均输入总量/t		0.304	18.322	12.54	69.687
K 值		0.950	0.950	0.950	0.950
年均累积量/t		0.289	17.405	11.913	66.202
静容量/累积量 $\times 10^3$	住宅用地	10.211	17.777	4.928	8.072
	公园绿地	2.848	23.667	34.559	1.703

2.4　风险系数

通过 5 位专家面对面访谈对各级风险指标的重要性进行赋权，根据 Cd、Pb、Cu 和 Zn 污染特征及北京市人口、社会和自然条件对各风险指标评分，平均权重、评分结果及评分依据如表 5 所示.

表 5　风险指标权重及打分结果

Table 5　Weights and scores of risk indicators

指标	权重	指标	权重	分值	依据
风险传播(ω_1)	0.5	污染特征(ω_{11})	0.8	Cd、Pb、Cu 和 Zn 分别为 2、3、1 和 1	根据污染物毒性及人体健康风险水平赋值
		植被覆盖率(ω_{12})	0.2	2	北京市城镇绿化覆盖率达 40% 以上
风险受体(ω_2)	0.5	土地利用(ω_{21})	0.4	2	北京市五环内土地利用以居民用地为主
		人口密度(ω_{22})	0.4	3	2010 年北京市五环内人口密度约为 15 000 人·km^{-2}
		饮食结构(ω_{23})	0.2	1	北京市饮用水与食物来源多样，安全管控

利用公式(9)计算 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的潜在空间风险值分别为 2.1、2.5、1.7 和 1.7,取其倒数为 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的风险系数,分别为 0.476、0.400、0.588 和 0.588.

2.5 土壤重金属环境承载力

基于公式(1)及表 6 中各参数值,计算北京市五环内住宅用地和公园绿地中 Cd、Cu、Pb 和 Zn 等重金属的土壤环境承载力,结果表明:从土地类型看,住宅用地总环境承载力略高于公园绿地,分别为 273 kt 和 245 kt;住宅用地的单位面积环境承载力约 500 $t \cdot km^{-2}$,远低于公园绿地的3 000 $t \cdot km^{-2}$.住宅用地土壤中各重金属元素的环境承载力由大到小依次为 Zn、Cu、Pb 和 Cd;公园绿地土壤中各重金属元素的环境承载力由大到小依次为 Cu、Pb、Zn 和 Cd.两种用地方式下土壤环境承载力的差异主要是由于土壤容量引起的,说明土壤环境评价标准对土壤环境承载力有显著影响.此外,由于两种用地方式下采样点均位于绿化区域,污染物累积主要受人为干扰影响,污染累积过程、暴露途径和暴露受体类似,因此本案例中住宅用地和公园绿地的土壤缓冲系数、累积系数和风险系数值未表现出明显差别.

从污染物种类看,各重金属元素的总环境承载力由大到小依次为 Cu、Zn、Pb 和 Cd.其中,研究区域 Cd 元素土壤承载力仅为 924 t,与其他元素相比,土壤环境承载水平较低,但由于 Cd 年均累积量较小,在以现有水平持续累积的情景下,Cd 含量达到建设用地风险筛选值所需年限较长.

表 6 土壤环境承载力参数

Table 6 Parameters of soil environmental carrying capacity

参数	Cd		Cu		Pb		Zn	
	住宅用地	公园绿地	住宅用地	公园绿地	住宅用地	公园绿地	住宅用地	公园绿地
土壤静容量/t	2 946.680	821.825	309 422.037	411 938.945	58 708.883	411 711.922	534 387.304	112 758.69
土壤缓冲系数	0.478	0.477	0.478	0.477	0.478	0.477	0.478	0.477
累积系数	1	1	1	1	1	1	1	1
风险系数	0.476		0.588		0.400		0.588	
土壤环境承载力/t	722.933	201.238	95 446.211	126 825.364	11 960.825	83 717.566	164 840.370	34 715.491
总环境承载力/t	924.171		222 271.575		95 678.391		199 555.861	

3 建议

(1)明确土壤环境承载力概念与内涵:明确区分土壤环境承载力与土壤环境容量,土壤环境承载力的概念既要强调土壤自身特性对污染物的净化缓冲作用,也应兼顾土地对人类生活生产的承载能力.加强土壤环境承载力理论研究,以及与土壤环境承载力密切相关的理论基础研究,建立能同时体现土壤环境系统动态性和区域差异性的土壤环境承载力理论与方法体系,充分发挥土壤环境承载力评价对区域土壤污染防治的支撑作用.

(2)完善土壤环境承载力评价框架:土地利用定位关系到土壤环境质量评价标准和土壤理化特征,及污染物在土壤系统的输入、输出途径和风险作用机制等方面,进而影响土壤环境承载力评价指标的选取和评价体系的实施.因而,土壤环境承载力评价体系应区分土地功能,按农用地和建设用地分别核算,整合土壤环境容量指标、土壤污染累积速率指标和土壤污染风险特征指标三个方面.

(3)构建土壤环境承载力信息数据库:区域土壤环境承载力核算需要大量的数据支撑.一方面,以农用地和重点行业企业用地为重点,基于土壤环境质量状况调查,掌握污染源分布与排放强度、土壤污染状况及空间分布、土壤理化性质和污染风险特征等信息;另一方面,逐步建立完善土壤环境监测网和监管体系,对农用地及重污染工矿企业进行加密监测和定期督察,实现土壤环境大数据的动态即时更新;第三,加强环保部门、国土部门、工业部门等多部门联动,整合集成土壤环境质量、产业布局、土地利用等相关数据.最终建立基于时空维度的涵盖大样本、多元数据和动态指标的土壤环境大数据库平台.

(4)开展土壤环境承载力核算试点:以典型区域为示范区,开展农用地和建设用地特征污染物的土壤环境承载力核算试点,全面了解土壤环境承载力的空间特征与水平差异,明确土壤环境承载力评价技术体系落实过程中存在的关键问题,不断优化完善土壤环境承载力评价的理论体系.基于土壤环境承载力核算结果,针对土壤环境正承载区以预防为主,实施遏制污染增量管理;针对土壤环境负承载区以治理为主,实施遏制增量和减少存量并轨管理;针对土壤环境承载力核算示范区实施控制污染变量管理,有助于遏制增量和减少存量,为土壤环境承载力反弹创造释放空间.

4 结论

(1)目前,北京市五环内住宅用地和公园绿地

具有一定的土壤环境承载余量,环境质量状况良好,土壤环境管理应以保护为主,加强污染热点区域及重点地块的监督管理,防范新增污染.

(2)从维持土壤功能的角度构建的土壤环境承载力综合评价指标体系,以土壤环境容量为基础、以土壤净化缓冲功能为核心,简洁明了,易于数据收集,不仅系统全面地反映了土壤对污染物质量和风险的接纳能力,还能动态衡量人类社会经济活动对土壤环境系统造成的影响.

(3)对土地功能、土壤质量、污染特性、社会经济与风险特征等不同量纲指标进行归一化处理,提出土壤环境承载力评价方法,实现了土壤环境承载力评价结果的量化表达和可比性,且创新性引入安全系数校正土壤环境绝对容量,从土壤污染空间异质性的角度保障了土地资源的安全可持续利用.

(4)所构建的土壤环境承载力综合评价指标体系和基于此提出的土壤环境承载力评价方法,只是对土壤环境承载力评价体系核心要素和关键指标的初步探索,虽存在一定的不确定性,尚有待完善,但其为今后的深入研究提供了重要的理论基础和研究思路.另外,选取北京市五环内建成区为研究区域,验证评价体系与方法的实用性和可操作性,为便于计算,并未对污染物输入输出的环境过程和风险作用机制作深入分析,而是直接引用已有研究结果作为数据输入,对大气沉降百分比、残留率等参数做了简单假设,通过专家访谈获取风险指标权重和分值.如上所述,数据收集、参数假设、专业判断等过程都可能在一定程度上影响评价结果的准确性,也是后期案例应用中需要深入探讨和重点改善的方面,通过不断完善框架、体系和方法,提高评价结果的精度和可靠性,最终推动我国土壤环境质量分类分级管控措施的有效落实.

参考文献:

[1] 李超. 土壤环境容量与承载力研究现状[J]. 资源节约与环保, 2016, (9): 302, 304.

[2] 周杰, 裴宗平, 靳晓燕, 等. 浅论土壤环境容量[J]. 环境科学与管理, 2006, **31**(2): 74-76.
Zhou J, Pei Z P, Jin X Y, *et al*. An overview for soil environmental capacity [J]. Environmental Science and Management, 2006, **31**(2): 74-76.

[3] 黄静, 靳孟贵, 程天舜. 论土壤环境容量及其应用[J]. 安徽农业科学, 2007, **35**(25): 7895-7896, 7953.
Huang J, Jin M G, Cheng T S. Soil environmental capacity and its application [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, **35**(25): 7895-7896, 7953.

[4] Jiang H, Ma Y H, Wang Q, *et al*. Reviews on soil environmental capacity and carrying capacity [J]. Agricultural Science & Technology, 2016, **17**(1): 217-222.

[5] 王静, 戴科伟, 张新华, 等. 典型电池工业园周边环境铅承载力研究[J]. 江苏科技信息, 2016, (13): 38-41.
Wang J, Dai K W, Zhang X H, *et al*. Research on lead environmental capacity in typical battery industrial zone [J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2016, (13): 38-41.

[6] 马辉英, 杨晓东, 吕光辉. 精河县重金属土壤环境容量及近百年趋势预测[J]. 新疆农业科学, 2016, **53**(8): 1521-1532.
Ma H Y, Yang X D, Lü G H. Tendency prediction about soil environmental capacity of heavy metals in Jinghe County in recent 100 years[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2016, **53**(8): 1521-1532.

[7] 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, **45**(3): 734-742.
Fu C C, Wang W Y, Pan J J, *et al*. Research of heavy metal environmental capacity in Lishui District, Nanjing[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, **45**(3): 734-742.

[8] 李志洋. 有机肥部分替代化学氮肥安全施用及土壤环境容量研究——以生菜和水稻为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
Li Z Y. Safety application of organic manure partial substitution chemical nitrogen fertilizer and soil environmental capacity-taking lettuce and rice as example [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

[9] Chwała M. Undrained bearing capacity of spatially random soil for rectangular footings [J]. Soils and Foundations, 2019, **59**(5): 1508-1521.

[10] Le C V. Estimation of bearing capacity factors of cohesive-frictional soil using the cell-based smoothed finite element method [J]. Computers and Geotechnics, 2017, **83**: 178-183.

[11] Pohjankukka J, Riihimäki H, Nevalainen P, *et al*. Predictability of boreal forest soil bearing capacity by machine learning [J]. Journal of Terramechanics, 2016, **68**: 1-8.

[12] Mondino E B, Fabrizio E, Chiabrando R. A GIS tool for the land carrying capacity of large solar plants [J]. Energy Procedia, 2014, **48**: 1576-1585.

[13] Hataf N, Sayadi M. Experimental and numerical study on the bearing capacity of soils reinforced using geobags[J]. Journal of Building Engineering, 2018, **15**: 290-297.

[14] 冯文选, 马吉胜, 何健, 等. 一种基于 RBF 代理模型的土壤承压特性拟合方法[J]. 计算机仿真, 2019, **36**(9): 5-9.
Feng W X, Ma J S, He J, *et al*. Fitting method of soil pressure subsidence characteristics based on RBF surrogate model [J]. Computer Simulation, 2019, **36**(9): 5-9.

[15] 李念春. 基于 PSR 模型的土壤环境承载力综合评价——以黄河三角洲高效生态经济区为例[J]. 国土资源科技管理, 2016, **33**(5): 117-125.
Li N C. Comprehensive evaluation based on soil environment carrying capacity PSR model: a case study in Yellow River Delta efficient ecological economic zone [J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2016, **33**(5): 117-125.

[16] 曾晓露. 大屯矿区复垦土壤环境承载力评价研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.
Zeng X L. Study on the carry capacity of reclaimed soil environment in Datun coal mining area [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2014.

[17] 王恒, 何雨明, 李静文, 等. 基于 O-E-R 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.

[18] 徐扬. 基于综合模型的土壤环境承载力评价分析——以山东省会城市群为例[J]. 西部资源, 2018, (6): 187-192.
Xu Y. Evaluation and analysis of soil environmental carrying

capacity based on comprehensive model-a case study of Shandong capital city group[J]. Western Resources, 2018, (6): 187-192.

[19] Sun T, Feng Z M, Yang Y Z, *et al*. Research on land resource carrying capacity: progress and prospects [J]. Journal of Resources and Ecology, 2018, **9**(4): 331-340.

[20] Beach T, Luzzadder-Beach S, Sweetwood R V, *et al*. Soils and agricultural carrying capacity[A]. In: Hutson S R (Ed.). Ancient Maya Commerce-Multidisciplinary Research at Chunchucmil[M]. Colorado: University Press of Colorado, 2017. 169-196.

[21] Zhang H W, Wang Z Q, Liu J F, *et al*. Selection of targeted poverty alleviation policies from the perspective of land resources-environmental carrying capacity[J]. Journal of Rural Studies, 2019, doi: 10.1016/j.jrurstud.2019.02.011.

[22] Wang M E, Faber J H, Chen W P, *et al*. Effects of land use intensity on the natural attenuation capacity of urban soils in Beijing, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **117**: 89-95.

[23] Van Wijnen H J, Rutgers M, Schouten A J, *et al*. How to calculate the spatial distribution of ecosystem services—natural attenuation as example from The Netherlands[J]. Science of the Total Environment, 2012, **415**: 49-55.

[24] 谢天. 北京市居民区绿地土壤污染生态效应与净化功能评价[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2018.
Xie T. Ecological effects of pollution and purification function of residential green space soils in Beijing[D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2018.

[25] Mulligan C N, Yong R N. Natural attenuation of contaminated soils[J]. Environment International, 2004, **30**(4): 587-601.

[26] Legaz B V, De Souza D M, Teixeira R F M, *et al*. Soil quality, properties, and functions in life cycle assessment: an evaluation of models[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, **140**: 502-515.

[27] Greiner L, Keller A, Grêt-Regamey A, *et al*. Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services[J]. Land Use Policy, 2017, **69**: 224-237.

[28] Morgado R G, Loureiro S, González-Alcaraz M N. Chapter 3-changes in soil ecosystem structure and functions due to soil contamination[A]. In: Duarte A C, Cachada A, Rocha-Santos T (Eds.). Soil Pollution: from Monitoring to Remediation[M]. Amsterdam: Academic Press, 2018. 59-87.

[29] Haslmayr H P, Geitner C, Sutor G, *et al*. Soil function evaluation in Austria—Development, concepts and examples[J]. Geoderma, 2016, **264**: 379-387.

[30] Guarino C, Spada V, Sciarrillo R. Assessment of three approaches of bioremediation (natural attenuation, landfarming and bioagumentation-assistited landfarming) for a petroleum hydrocarbons contaminated soil[J]. Chemosphere, 2017, **170**: 10-16.

[31] Xie T, Wang M E, Su C, *et al*. Evaluation of the natural attenuation capacity of urban residential soils with ecosystem-service performance index (EPX) and entropy-weight methods [J]. Environmental Pollution, 2018, **238**: 222-229.

[32] Liu R, Wang M E, Chen W P, *et al*. Spatial pattern of heavy metals accumulation risk in urban soils of Beijing and its influencing factors[J]. Environmental Pollution, 2016, **210**: 174-181.

[33] 陈潇霖, 杨丹, 胡迪青, 等. 北京土壤重金属分布及评价——以五环以内为例[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(12J): 78-81.
Chen X L, Yang D, Hu D Q, *et al*. Beijing City soil heavy metal distribution and evaluation: take inner 5th ring road area for an example[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **35**(12J): 78-81.

[34] 曹振宇, 张昕蕊, 杨小明, 等. 北京城区土壤与灰尘中重金属的健康风险评价[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2014, **41**(2): 93-98.
Cao Z Y, Zhang X R, Yang X M, *et al*. Health risk assessment of heavy metals in dust and soil samples from Beijing[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2014, **41**(2): 93-98.

[35] GB 36600-2018, 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
GB 36600-2018, Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of development land[S].

[36] DB11/T 811-2011, 场地土壤环境风险评价筛选值[S].
DB11/T 811-2011, Screening levels for soil environmental risk assessment of sites[S].

[37] Peng C, Wang M E, Chen W P, *et al*. Mass balance-based regression modeling of Cd and Zn accumulation in urban soils of Beijing[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, **53**: 99-106.

[38] Peng C, Ouyang Z Y, Wang M E, *et al*. Vegetative cover and PAHs accumulation in soils of urban green space [J]. Environmental Pollution, 2012, **161**: 36-42.

[39] Chen T B, Zheng Y M, Lei M, *et al*. Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China[J]. Chemosphere, 2005, **60**(4): 542-551.

[40] 游娟. 北京市机动车重金属排放通量的估算及影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.

[41] Pan Y P, Wang Y S. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(2): 951-972.

HUANJING K0EXUE Vol. 41 No. 5
Environmental Science (monthly) May 15, 2020

CONTENTS