

黄春阳, 黄娟, 钟晓宇, 等. 广西典型岩溶地区农田土壤重金属生态风险阈值研究——以Cd为例[J]. 中国岩溶, 2025, 44(1): 79-88.
DOI: 10.11932/karst2024y032

广西典型岩溶地区农田土壤重金属生态风险阈值研究 ——以Cd为例

黄春阳, 黄娟, 钟晓宇, 李杰, 李明钰

(广西地质调查院, 广西南宁 530023)

摘要: 镉(Cd)是一种对人体有害的非必需元素,也是农田土壤首要污染物,其在土壤-作物系统中生态风险阈值评估具有重要意义。文章系统采集了广西典型岩溶地区102组水稻作物及其根系土壤,利用Bur III分布拟合了广西典型岩溶区农田土壤中Cd的物种敏感性分布曲线(SSD),推导出能够保护95%水稻的土壤Cd安全阈值。结果表明,研究区土壤全量Cd超标率90.2%,而水稻籽实Cd仅有8.82%样品超过《食品中污染物限量》(GB 2762—2022)的限值。利用物种敏感性分布法,推导出土壤pH在5.5~6.5、6.5~7.5和7.5~8.5下,保护95%水稻不超标的土壤Cd安全阈值分别为0.22 mg·kg⁻¹, 1.08 mg·kg⁻¹和6.4 mg·kg⁻¹,评价结果的推导值正确率随着pH的升高由23.5%显著提高至92.1%。研究结果可以被认为是更准确的评估阈值,为广西典型岩溶地区Cd污染稻田安全生产提供科学的参考依据。

关键词: 岩溶地区; 土壤; 重金属; 生态风险阈值; Cd

创新点: 选取广西典型岩溶地质高背景区大宗农作物水稻及其根系土作为研究对象,以水稻主要超标元素Cd为例,基于野外大数据获得的剂量-效应关系模型,建立地质高背景区适用于种植水稻的土壤环境质量标准。

中图分类号: X53 **文献标识码:** A

文章编号: 1001—4810 (2025) 01—0079—10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

重金属对土壤污染具有长期性、隐蔽性和不可逆性,可以通过自然过程或人为输入进入环境中,不仅引起土壤质量退化,而且导致农产品产量和质量降低^[1]。研究表明不同土壤理化性质、水文地质、气

候条件、元素间的相互作用、不同作物品种等均会影响农作物对重金属元素的吸收^[2-7]。重金属从土壤向农作物迁移正是受到众多因素影响,导致区域土壤重金属超标率与同一产地农作物重金属超标率不一致^[8],表明当前土壤环境质量标准不能真正反映农产品质量安全和需求,缺乏针对不同地质背景、地理

基金项目: 全国土壤现状调查及污染防治国家专项(GZTR20060115, GZTR20070107, GZTR20080110); 关于广西土地质量地球化学学评价2013年度工作方案的批复(桂国土资函〔2013〕1728号); 关于下达2014年度广西土地质量地球化学评价项目任务书的函(桂国土资函〔2014〕877号); 广西科技基地和人才专项广西地矿局院士工作站(桂科AD17129052); 广西自然科学基金项目(2016GXNSFBA380106); 2018年度广西土地质量地球化学评价(桂国土资函〔2018〕69号); 广西关键矿产资源深部勘查人才小高地(桂组通字〔2019〕85号)

第一作者简介: 黄春阳(1983—),男,工程硕士,高级工程师,主要从事岩溶水文地质调查和地下水污染防治修复方面研究。E-mail: 79601738@qq.com。

通信作者: 李杰(1983—),男,博士,正高级工程师,主要从事生态地球化学和土壤污染修复方面研究。E-mail: lj@cug.edu.cn。

收稿日期: 2023—11—20

景观等特定区域的土壤环境质量标准,也就是说,目前的国家标准并不完全适合地质高背景区农产品质量安全。

2014 年 4 月公布的《全国土壤污染状况调查公报(2005—2013 年)》显示,Cd 是我国超标率最高的元素^[9]。一般情况下土壤中 Cd 主要来源人为活动和自然背景。特别是碳酸盐岩分布区 Cd 含量显著高于其他成土母岩背景区^[10-11]。我国地域辽阔,气候、土壤、耕作方式等地域性差异较大,依据全国《土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[12]进行统一评价,南方典型喀斯特地貌区往往存在土壤 Cd 超标(不超标),农产品 Cd 不超标(超标)等点位不匹配现象,造成能够生产安全农产品的土壤被划定为污染土壤,无法对土壤中 Cd 的生态风险准确识别和科学评价。因此,有必要建立喀斯特地貌区土壤 Cd 阈值,对确保 Cd 地质高背景区的农产品安全和提高土地利用率具有重要意义。

土壤重金属生态风险阈值研究是保障食品安全的基础,近年来关于土壤生态阈值的方法有评价因子^[13]、回归分析推导^[14]、物种敏感性分布等^[15],本文选取土壤质量标准推导的首选方法物种敏感性分布法^[16],与其他几种方法相比,物种敏感性分布法需要大量不同品种野外实测数据,具有高准确性且不确定度底的优点^[17]。该方法通过概率分布模型拟合污染物的毒理学数据,并根据可接受的风险水平,获取拟合曲线上不同百分位的浓度值作为基准值,由于其考虑到物种敏感性、土壤理化性质和生物有效性等因素,使推导出的土壤生态安全阈值更具有科学性、合理性和适用性。用于表征可食部分重金属含量与土壤重金属总量比值的生物富集因子,能够反映重金属从土壤向农作物累积特征,被广泛用于 SSD 曲线拟合中作物富集重金属的特征数据^[18]。

基于室内盆栽试验获得的研究结果通常难以预测野外实际情况。本文尝试通过基于野外大数据获得的剂量-效应关系模型,从统计学角度确定最大概率保护大部分农作物质量安全的标准值。研究区属于西南典型岩溶区重金属高背景区^[19],本次选取当地大宗农作物水稻及其根系土作为研究对象,以水稻主要超标元素 Cd 为例,尝试建立地质高背景区适用于种植水稻的土壤环境质量标准,对当地污染防控和补充地质高背景区生态地球化学评价理论体系

具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西西南部边境,北纬 22°29′~23°05′、东经 106°39′~107°29′之间,地处南亚热带南沿,热量资源丰富,光照充足,气温较高,夏长冬短,雨量充沛,干湿季节分明,具有明显的南亚热带季风气候特点。地势北高、南略低,呈东西长、南北窄,形似蹲狮(东头西尾,北背南脚)地貌呈西北和东北角向南伸展状。出露地层有寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系和第四系,主要以泥盆系为主;土壤类型主要为棕色石灰土,广泛分布于石灰岩山的下坡,酸碱度呈中性,有时有少量铁锰粒或斑,土体较厚;其次为砖红壤性红壤,该类型土壤层次分化明显,富含铁铝,表层色较淡红,主要分布于西大明山地区。大新县国土面积约 2755 km²,其中岩溶发育面积占行政区面积约 83%,占广西岩溶区面积 3%。

1.2 样品采集与分析

大新水田面积约 162 km²,占行政区面积 10%,根据大新县土地利用现状与农业生产分布情况,选择代表性地块进行农产品采集。2018 年 7 月和 10 月于农作物收获季节采集早稻及其根系土 35 组、晚稻及其根系土 67 组,采样点位见图 1。样品的采集按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)执行^[20],采样点地块内视不同情况采用棋盘法、梅花点法、对角线法、蛇形法等进行多点取样,选取 3 个以上采样小区,每个小区水稻采集 10~20 株,水稻采样重量大于 500 g;在采集农作物时对应采集根系土,等量混合成一件土壤样品,土壤样品重量大于 1000 g。水稻脱穗脱粒装入聚乙烯密封袋送实验室分析,土壤样品室内阴干,全部过 10 目筛,送实验室分析。

样品分析测试由广西壮族自治区地质矿产测试研究中心完成。土壤全量元素 Cd 采用电感耦合等离子体质谱法(酸溶)(ICP-MS)测定;pH 采用玻璃电极法(ISE)测定。农作物中元素分析参照《生态地球化学动植物样品分析方法》(DZ/T 0253.1~4-2014),Cd 采用等离子体质谱法测定。样品分析测试方法及质量控制严格按照《多目标区域地球化学调查规

表 1 研究区根系土壤中重金属 Cd 质量浓度特征

Table 1 Content characteristics of heavy metal Cd in rhizosphere soil of the study area

元素	最小值/ mg·kg ⁻¹	最大值/ mg·kg ⁻¹	平均值/ mg·kg ⁻¹	标准差	变异系数	基于筛选值的 超标率/%	基于管控值的 超标率/%
Cd	0.244	114.52	6.57	19.52	2.97	90.20	15.69

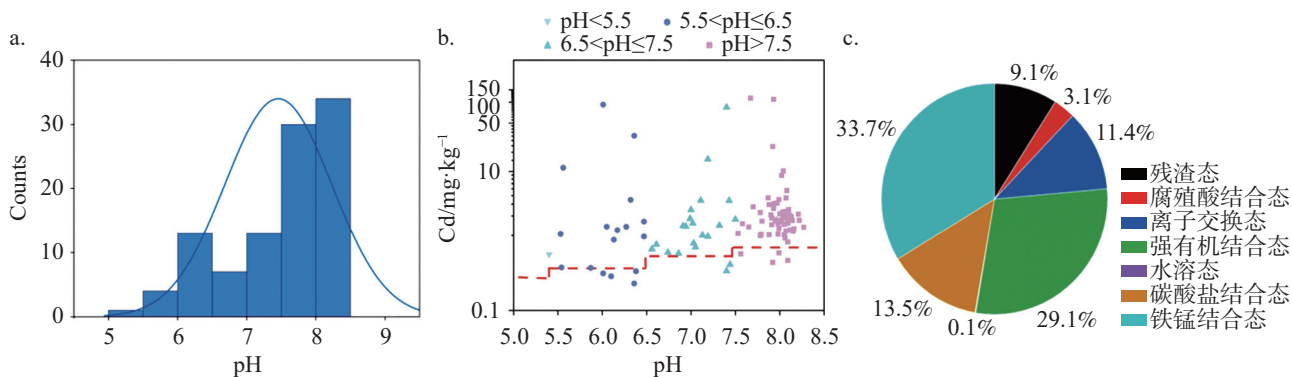


图 2 土壤重金属 Cd 分布特征

注: a. 土壤 pH 值分布图 b. 土壤 pH 和土壤 Cd 浓度的散点图, 红色虚线代表农用地土壤污染标准风险筛选值 c. 土壤重金属 Cd 不同形态分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of heavy metal Cd in soil

Note: a. distribution of soil pH; b. scatter plots of soil pH and soil Cd concentrations, with red dashed lines representing standard risk screening values for soil pollution in agricultural land; c. distribution characteristics of soil heavy metal Cd in different forms

应,对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境等可能存在风险,应加强对土壤环境质量和农产品安全的协同检测。

土壤重金属的赋存形态为研究重金属的来源、生物有效性提供了重要的信息^[29]。通过对土壤样品进行连续地化学提取分析,将重金属形态归纳为以下 7 种形态,其中水溶态、离子交换态被认为是生物有效组分,可以被植物利用且具有较大的迁移性和危害;碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、强有机结合态和铁锰氧化物结合态被认为是潜在生物有效组分,在强酸介质中可被植物利用,残渣态也称非有效态,一般通过与土壤矿物质或其他不易分解的有机质结合,不会被植物吸收,具有迁移能力弱、生物可利用性小和生态风险低等特点^[30-32]。根据研究区内 46 个根系土样品中重金属 Cd 不同形态基本统计特征见表 2 和图 2c,研究区根系土的 Cd 的生物潜在有效态含量高,而 Cd 的有效态和残渣态含量较低。其中,

重金属 Cd 的生物潜在有效态组分占总量的 71.64%,Cd 的生物有效态占总量的 11.5%,其中离子交换态占总量的 11.4%,而水溶态仅占总量的 0.1%,残渣态 Cd 占总量的 9.1%。土壤 pH 值是影响土壤中重金属有效态和植物吸收的重要因素。土壤 pH 值升高将可溶态 Cd 向难溶态转化,提高污染土壤 pH 值可有效降低土壤 Cd 的生物有效性,在酸性土壤条件下,土壤颗粒正电荷数量增加,限制了 Cd 离子在土壤颗粒表面的吸附,导致土壤中可交换 Cd 含量增加^[25]。邹佳玲等^[33]研究表明,土壤 pH 值增加,土壤交换态 Cd 含量显著降低,影响了水稻对 Cd 的吸收和累积。陈立伟^[34]等研究发现,使用土壤调理剂提高了稻田土壤 pH 值,Cd 的有效态含量降低 0.9%~24.1%。本研究 61.76% 土壤样品 pH 值大于 7.5(图 2a),可认为研究区土壤呈弱碱性。该结果表明当水稻籽实生长土壤 pH 值越高、Cd 的迁移能力越弱,水稻籽实吸收或转移的 Cd 越少。研究区土壤 Cd 形态虽然主要以

表 2 根系土中重金属 Cd 不同形态统计参数 (N=46, 单位:mg·kg⁻¹)

Table 2 Statistical parameters of different forms of heavy metal Cd in rhizosphere soil (N=46, unit: mg·kg⁻¹)

名称	残渣态	腐殖酸结合态	离子交换态	强有机结合态	水溶态	碳酸盐结合态	铁锰结合态
范围	0.018~3.40	0.002~1.250	0.034~5.460	0.002~54.700	0.001~0.052	0.024~5.850	0.030~41.300
平均值	0.390	0.133	0.492	1.252	0.004	0.583	1.451
变异系数	1.32	1.52	1.56	6.36	1.72	1.45	4.34

生物潜在有效态含量为主,但土壤 pH 主要为弱碱性,抑制了土壤 Cd 被植物吸收,在土壤 pH 没有变化的情况下不会对粮食安全产生影响。

2.2 水稻中重金属Cd 含量特征

对 102 件水稻籽实样品中 Cd 含量进行统计,结果见表 3。研究区内水稻籽实中重金属 Cd 含量变化范围为 0.005~1.95 mg·kg⁻¹,平均值为 0.09 mg·kg⁻¹,明显低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2022)中限量标准值 0.2 mg·kg⁻¹。根据水

稻籽实中 Cd 浓度分布图 3 可知,研究区超过 91.0% 的水稻籽实样品 Cd 浓度没有超过《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2022)^[35]规定的阈值,只有 8.82% 的水稻籽实样品 Cd 浓度超过 0.2 mg·kg⁻¹。尽管研究区根系土 Cd 含量浓度严重超过《土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB-15618-2018)中规定的风险筛选值和管制值,但通过对农产品水稻籽实调查结果显示,水稻籽实 Cd 浓度超标率相对较低,对当期水稻产业影响极为有限。

表 3 研究区水稻籽实重金属 Cd 含量特征
Table 3 Content characteristics of heavy metal Cd in rice grains of the study area

元素	最小值/ mg·kg ⁻¹	最大值/ mg·kg ⁻¹	平均值/ mg·kg ⁻¹	标准差	变异系数	超标率/%
Cd	0.005	1.95	0.09	0.26	2.85	8.82

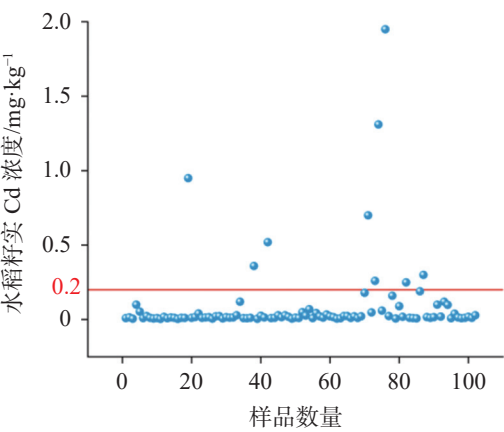


图 3 水稻籽实中 Cd 浓度分布图

注: 红线代表《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2022)水稻籽实限量标准值(0.2 mg·kg⁻¹)

Fig. 3 Distribution of Cd concentration in rice seeds

Note:The red line represents the standard value of rice grain limit (0.2 mg·kg⁻¹) in the National Standard for Food Safety:Limits of Contaminants in Food(GB2762-2022).

我们通过测定根系土和水稻籽实中 Cd 含量累积和分布特征,发现研究区土壤中重金属 Cd 含量高,存在土壤 Cd 超标和 Cd 富集效应,而水稻籽实中重金属 Cd 含量较低。有研究人员发现岩溶地区土壤中 Cd 的有效性低是高 Cd 背景研究区水稻中 Cd 浓度低的关键原因之一^[36]。Cd 的生物利用度较低,意味着 Cd 不易被水稻植株吸收并在籽粒中积累,研究区是广西典型岩溶区域,属于地质高背景区,其自身的重金属 Cd 含量高^[37]。刘意章等^[38]发现黑色岩系风化成土过程是岩溶区土壤 Cd 高富集的主要原因。

值得注意的是,研究区超过 91.0% 的水稻籽实样品 Cd 浓度没有超过规定的阈值^[35],这一调查结果显示出相当乐观的结果。

2.3 土壤Cd 元素土壤质量限值推定

从上述结果可以看出,现行的土壤环境质量标准难以精准评价研究区土壤 Cd 污染水平,需要根据实际情况提出土壤环境质量基准。因此本研究基于物种敏感性分布法计算了保护 95% 水稻籽实土壤 Cd 的安全限值,评估研究区实际 Cd 污染水平。

由于土壤 pH 对土壤中重金属元素有着重要的影响,本文依照《土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)土壤 pH 划分区间,把研究区水稻划分为 3 类: 5.5<pH≤6.5 (17 组)、6.5<pH≤7.5 (21 组)和 pH>7.5 (63 组),水稻根系土中 pH<5.5 仅 1 组样品,不进行统计。根据上述公式 2 分别拟合 3 类数据 SSD 曲线,如表 4 和图 4 所示。从表 4 可知, Burr III 分布函数适合研究区 1/BCF 的拟合,拟合系数均在 0.92 以上。根据拟合结果显示,推导出研究区水田土壤 Cd 元素 pH 水平为 5.5<pH≤6.5、6.5<pH≤7.5 和 pH>7.5 时,对应的土壤 Cd 元素限值分别为 0.22 mg·kg⁻¹, 1.08 mg·kg⁻¹ 和 6.4 mg·kg⁻¹,低于此浓度, 95% 的水稻是相对安全的,即 95% 的稻米 Cd 浓度不会超过《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2022)中 0.2 mg·kg⁻¹。与 GB 15618-2018 规定的土壤环境质量限值比较可以发现,酸性土壤(5.5<pH≤6.5)

表 4 研究区基于 Burr III 拟合根系土 Cd 的安全阈值及方程参数

Table 4 Safety threshold and equation parameters of Cd in rhizosphere soil fitted based on Burr III in the study area

水田pH范围	b	c	k	R ²	HC ₅	推导土壤Cd生态阈值	GB 15618-2018
5.5<pH≤6.5	86.33	3.37	0.20	0.93	1.1	0.22	0.4
6.5<pH≤7.5	36.61	1.56	0.99	0.93	5.4	1.08	0.6
pH>7.5	169.89	2.84	0.63	0.99	32	6.4	0.8

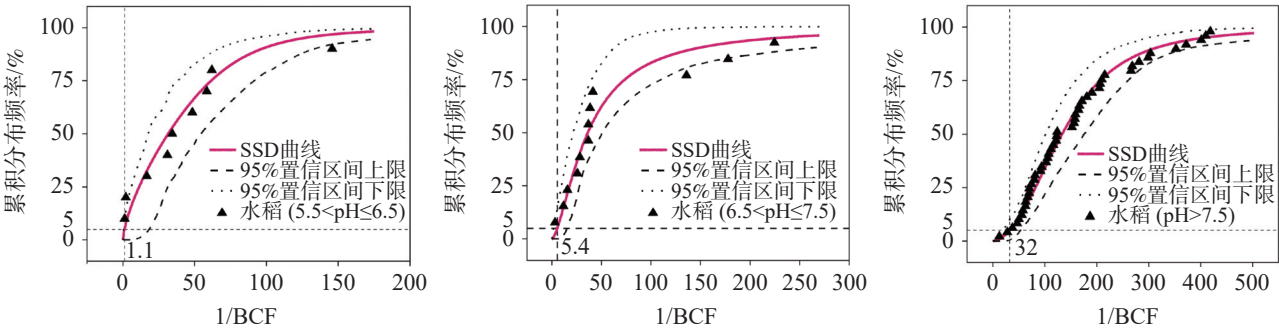


图 4 三个 pH 区间 Cd 富集系数的 SSD 曲线

Fig. 4 SSD curves of BCF value for Cd in three pH levels

环境中国家标准制定不够严谨, 过于宽泛, 而国标对于中性(6.5<pH≤7.5)和碱性(pH>7.5)土壤环境则制定过于严格, 这与前人研究结果一致^[39]。

2.4 土壤Cd 生态风险阈值可靠性评估

为了评估推导出的土壤 Cd 生态风险阈值的可靠性, 我们根据土壤环境质量标准程序验证了其适应性^[40]。本文定义在给定污染风险筛选值下, 土壤不超标且农作物不超标以及土壤超标且农作物超标为正确区, 土壤超标但农作物不超标为误判区, 土壤不超标但农作物超标为遗漏区。由表 5 和图 5 可知, 研究区不存在遗漏区, 水田土壤 Cd 元素在 5.5<pH≤6.5 国家标准给定的风险筛选值正确率要高于推导值正确率。随着 pH 升高, 推导值的正确率显著提高, 由 23.5% 提高到 92.1%, 而国家标准给定的筛选值正确率由 47.1% 降至 6.3%。以往的研究认为, 仅考虑

表 5 不同土壤 pH 值 Cd 元素对应的正确区和误判区样品数

Table 5 Numbers of samples in the correct zone and the wrong zone corresponding to Cd element in different soil pH values

pH变化范围	标准值	正确	误判
5.5~6.5	推导值0.22	4	13
	国标筛选值0.4	8	9
6.5~7.5	推导值1.08	12	9
	国标筛选值0.6	6	15
>7.5	推导值6.4	58	5
	国标筛选值0.8	4	59

土壤 pH 值来推导土壤阈值是不够的, 还应考虑其他相关的土壤性质^[39], 但本研究结果表明结合土壤总 Cd 浓度与 pH 可以很好地预测农产品的超标风险, 可见土壤 pH 是影响 Cd 吸收的唯一关键因素, 主要由于土壤 pH 会影响其他土壤性质, 进而影响作物对金属的吸收。

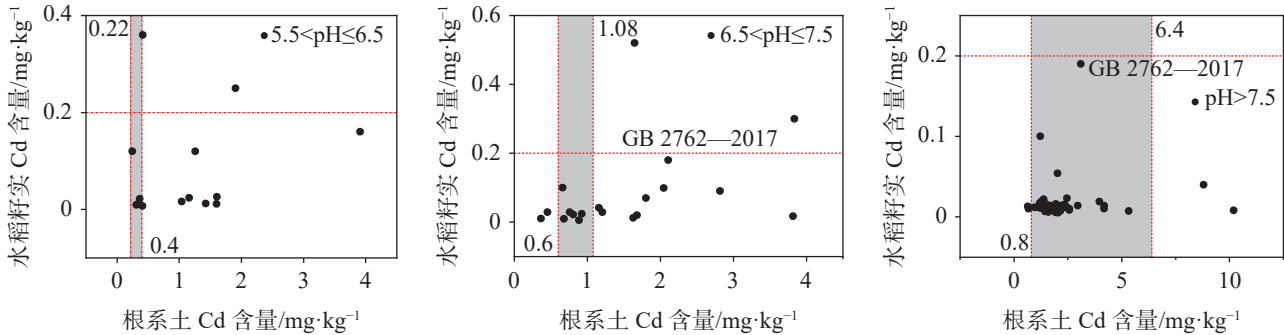


图 5 土壤 Cd 含量与水稻籽实 Cd 含量散点图

Fig. 5 Scatter plot of soil Cd content and Cd content in rice grains

为了研究广西典型岩溶地区农田土壤重金属Cd的生态风险阈值,本研究基于Burr III型分布函数拟合101组土壤样品的物种敏感性分布曲线,推导出研究区不同pH条件水稻安全生产的土壤Cd含量的阈值(图4)。土壤pH 5.5~6.5、6.5~7.5和7.5~8.5下,土壤Cd对应的污染风险筛选值分别为 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $6.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表4),值得注意的是,土壤pH为6.5~7.5和7.5~8.5下推导出的阈值高于现行国家标准对应的污染的风险筛选值(GB15618-2018),主要是因为土壤pH是影响土壤中Cd行为的重要因素之一,在碱性土壤中,土壤Cd与碳酸盐岩结合,并与OH等阴离子发生部分共沉淀,导致Cd的生物可利用度降低^[41],而在在CaO、 TFe_2O_3 、Mn和总Cd含量相对较低的酸性土壤中,水稻籽粒Cd积累量较高^[11]。研究结果证实研究区土壤重金属Cd含量较高而水稻籽实中的Cd含量较低,与前人研究结果一致。例如:涂峰等^[15]利用物种敏感性分布法,推导出苏南地区土壤pH 5.0~6.5、6.5~7.5、7.5~8.5下保护95%水稻品种糙米不超标的土壤全量Cd安全阈值分别为0.52、0.80、 $1.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均高于现行的风险筛选值(GB 15618-2018)。

此外,根据土壤Cd生态风险阈值可靠性评估也表明,随着pH升高,推导值的正确率显著提高,由23.5%提高到92.1%,而国家标准给定的筛选值正确率由47.1%降至6.3%(表5),表明研究提出的土壤Cd生态风险阈值在一定程度是合理的,能够满足研究区域水田土壤质量划分和管理需求。由于中国农田土壤环境质量差异较大,以及人为污染或自然活动下土壤Cd累积因子不同在实际的土壤质量评价过程中,土壤评价和农产品评价的结果存在许多差异,特别是在广西高地地质背景区,存在着“土壤重金属超标,而农产品重金属未超标”等评价结果不合适的情况。本研究的结果是确定满足95%水稻不超标情况下提出土壤Cd生态风险阈值,确保了在满足食品安全前提下不导致过度保护。因此,本研究结果得出的土壤Cd生态风险阈值更加合理可靠,与现行国家标准相比,可以被认为是更准确的评估阈值,为广西典型岩溶地区Cd污染稻田安全生产提供科学参考依据。

3 结 论

研究区根系土壤呈现出重金属Cd高富集特征,

超过90.2%的土壤样品Cd含量高于国内土壤环境质量标准中的风险筛选值(GB15618-2018),但研究区种植生物水稻籽实Cd含量较低,仅有8.82%的水稻籽实样品超过《食品中污染物限量》(GB 2762-2022)的限值,表明研究区土壤中Cd存在累积效应和低生物有效性。基于Burr III型分布函数拟合101组土壤样品,推导出稻田土壤pH 5.5~6.5、6.5~7.5和7.5~8.5下保护95%水稻不超标的土壤Cd对应的污染风险筛选值分别为 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $6.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。随着pH的升高,评价结果的推导值正确率由23.5%显著提高至92.1%。因此,建议土壤pH为6.5~7.5和7.5~8.5时,参考 HC_{95} 值调整研究区农用地土壤环境质量分级标准,以评价当地农用地的实际污染程度和土壤Cd暴露的健康风险,因地制宜制定农田土壤安全利用标准。

参考文献

- [1] 王静,魏恒,潘波.中国农田土壤Cd累积分布特征及概率风险评价[J].环境科学,2023,44(7):4006-4016.
WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo. Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China[J]. Environmental Science, 2023, 44(7): 4006-4016.
- [2] DENG Meihua, ZHU Youwei, SHAO Kan, ZHANG Qi, YE Guohua, SHEN Jing. Metals source apportionment in farmland soil and the prediction of metal transfer in the soil-rice-human chain[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 260: 110092.
- [3] Khanam Rubina, Kumar Anjani, Nayak A K, Shahidmd, Tripathi Rahul, Vijayakumar S, Bhaduridebarati, Kumar Upendra, Mohanty Sangita, Panneer-Selvam P, Chatterjee Dibyendu, Sathapathy B S, Pathak H. Metal(loid)s (As, Hg, Se, Pb and Cd) in paddy soil: Bioavailability and potential risk to human health[J]. Science of The Total Environment. 2020, 699: 134330.
- [4] CHANG Chuanyu, YIN Runsheng, ZHANG Hua, YAO Linjun. Bioaccumulation and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil-Rice System in a Typical Seleniferous Area in Central China[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2019, 38(7): 1577-1584.
- [5] ENYA Osim, LIN Chuxia, QIN Junhao. Heavy metal contamination status in soil-plant system in the Upper Mersey Estuarine Floodplain, Northwest England[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 146: 292-304.
- [6] DENG Siwei, YU Jiang, WANG Yating, XIE Shiqian, RAN Zongxin, WEI Wei. Distribution, transfer, and time-dependent variation of Cd in soil-rice system: A case study in the Chengdu plain, Southwest China[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195: 104367.

- [7] RAN Jing, WANG Dejian, WANG Can, ZHANG Gang, ZHANG Hailin. Heavy metal contents, distribution, and prediction in a regional soil-wheat system[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 422-431.
- [8] 唐豆豆, 袁旭音, 汪宜敏, 季峻峰, 文字博, 赵万伏. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(1): 18-26.
- TANG Dou-dou, YUAN Xu-yin, WANG Yi-min, J. I. Jun-feng, WEN Yu-bo, ZHAO Wan-fu. Enrichment characteristics and risk prediction of heavy metals for rice grains growing in paddy soils with a high geological background[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 18-26.
- [9] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 李小飞, 张晓霞. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(9): 1689-1692.
- Chen Nengchang, Zhang Yuji, He Xiaofeng, Li Xiaofei, Zhang Xiaoxia. analysis of the report on the national general survey of soil contamination[J]. *Journal of Agro-Environment science*, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [10] 罗慧, 刘秀明, 王世杰, 刘方, 李颖. 中国南方喀斯特集中分布区土壤 Cd 污染特征及来源[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(5): 1538-1544.
- LUO Hui, LIU Xiu-ming, WANG Shi-jie, LIU Fang, L. I. Ying. Pollution characteristics and sources of cadmium in soils of the karst area in South China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(5): 1538-1544.
- [11] LI Cheng, YANG Zhongfang, YU Tao, HOU Qingye, LIU Xu, WANG Jue, ZHANG Qizuan, WU Tiansheng. Study on safe usage of agricultural land in karst and non-karst areas based on soil Cd and prediction of Cd in rice: A case study of Heng County, Guangxi[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 208: 111505.
- [12] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行)[S]. 北京, 2018: 2018-06-22.
- Ministry Of Ecology And China, State Administration For Market State Administration For Market Regulation. Soil Environmental Quality: Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land (Trial)[S]. Beijing, China, 2018: 2018-06-22.
- [13] 许芮, 曹石, 刘猛, 张惠, 刘月涵, 吕诗, 段亚军, 张玉坤, 杨志新. 设施黄瓜菜田土壤镉污染预测模型及阈值研究[J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2020, 28(10): 1630-1636.
- X. U. Rui, CAO Shi, LIU Meng, ZHANG Hui, LIU Yuehan, LYU Shi, DUAN Yajun, ZHANG Yukun, YANG Zhixin. Prediction model and threshold of soil cadmium contamination in cucumber greenhouses[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(10): 1630-1636.
- [14] 范琼, 冯剑, 邹冬梅, 酒元达, 苏初连, 吴小芳, 吴彬, 赵敏. 重金属 Cd 在树仔菜-土壤系统中的富集迁移及安全阈值研究[J]. *中国瓜菜*, 2022, 35(11): 86-92.
- FAN Qiong, FENG Jian, ZOU Dongmei, JIU Yuanda, S. U. Chulian, W. U. Xiaofang, W. U. Bin, ZHAO Min. Accumulation and transformation of heavy metal Cadmium in Sauropus androgynus-soil system and its safety thresholds[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2022, 35(11): 86-92.
- [15] 涂峰, 胡鹏杰, 李振炫, 张绪美, 潘云俊, 孔呈, 孙永泉, 邱一格, 吴龙华, 骆永明. 苏南地区 Cd 低积累水稻品种筛选及土壤 Cd 安全阈值推导[J]. *土壤学报*, 2023, 60(2): 435-445.
- T. U. Feng, H. U. Pengjie, L. I. Zhenxuan, ZHANG Xumei, PAN Yunjun, KONG Cheng, SUN Yongquan, QIU Yige, W. U. Longhua, LUO Yongming. Screening of Low-Cd-accumulating Rice Varieties and Derivation of Soil Cd Safety Threshold in Southern Jiangsu[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(2): 435-445.
- [16] 和君强, 贺前锋, 刘代欢, 黄放, 唐春敏. 土壤镉食品卫生安全阈值影响因素及预测模型: 以长沙某地水稻土为例[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1181-1194.
- H. E. Junqiang, H. E. Qianfeng, LIU Daihuan, HUANG Fang, TANG Chunmin. Major Factors Affecting Threshold of Soil Cd for Food Health Safety and Relevant Prediction Models: A Case Study of Paddy Soil in Changsha[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1181-1194.
- [17] 陈艳楠, 钱雨欣, 李志美, 何伟, 徐福留. 中国土壤铜的区域分级基准建立及生态风险评估初探[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(3): 448-458.
- CHEN Yannan, QIAN Yuxin, LI Zhimei, HE Wei, XU Fuli. Preliminary study on regional grading benchmarking and ecological risk assessment of copper in Chinese soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(3): 448-458.
- [18] 张竞元, 王学东, 梁力川, 段桂兰. 我国典型土壤中 Co 对生物的毒害及其阈值推导[J]. *地学前缘*, 2023, 31(2): 137-146.
- ZHANG Jingyuan, WANG Xuedong, LIANG Lichuan, DUAN Guilian. Derivation of ecotoxicity thresholds for Co in soils in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(2): 137-146.
- [19] WEN Yubo, LI Wei, YANG Zhongfang, ZHANG Qizuan, JI Junfeng. Enrichment and source identification of Cd and other heavy metals in soils with high geochemical background in the karst region, Southwestern China[J]. *Chemosphere*, 2020, 245: 125620.
- [20] 中华人民共和国国土资源部. 土地质量地球化学评价规范[S]. 北京, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China: 2016: 2016/6/12.
- Ministry Of Land And China. Specification of Land Quality Geochemical Assessment[S]. Beijing, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China: 2016: 2016/6/12.
- [21] 中华人民共和国国土资源部. 多目标区域地球化学调查规范 (1: 250 000)[S]. 北京, 2014.
- Hua ren min gong Zhong. Specification of Multi-Purpose Regional Geochemical Survey[S]. Beijing, 2014.
- [22] 中华人民共和国国土资源部. 生态地球化学评价动植物样品分析方法[S]. 北京, 全国国土资源标准化技术委员会, 2014.
- [23] CAI Limei, ZHOU Yongzhang, MO Liping, LI Huizhen, DOU Lei, ZHANG Jingru, YOU Jing. Bioavailability and soil-to-crop transfer of heavy metals in farmland soils: A case study in the Pearl River Delta, South China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235(Apr.): 710-719.
- [24] RAJ Deep, MAITI Subodh Kumar. Sources, bioaccumulation,

- health risks and remediation of potentially toxic metal(loid)s (As, Cd, Cr, Pb and Hg): an epitomised review[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(2): 108.
- [25] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 曾庆楠, 夏晴. 土壤 pH 对镉形态影响的研究进展[J]. *土壤*, 2020, 52(3): 439-444.
- DOU Weiqiang, A. N. Yi, QIN Li, LIN Dasong, ZENG Qingnan, XIA Qing. Advances in Effects of Soil pH on Cadmium Form[J]. *Soils*, 2020, 52(3): 439-444.
- [26] WEN Yubo, LI Wei, YANG Zhongfang, ZHUO Xiaoxiong, GUAN Dong-Xing, SONG Yinxian, GUO Chao, JI Junfeng. Evaluation of various approaches to predict cadmium bioavailability to rice grown in soils with high geochemical background in the karst region, Southwestern China[J]. *Environmental Pollution*. 2019: 113645.
- [27] 侯青叶, 杨忠芳, 余涛, 夏学齐, 成杭新, 周国华. 中国土壤地球化学参数[M]. 北京: 地质出版社, 2024.
- [28] 肖高强, 陈杰, 白兵, 李元彬, 朱能刚. 云南典型地质高背景区土壤重金属含量特征及污染风险评价[J]. *地质与勘探*, 2021, 57(5): 1077-1086.
- XIAO Gaoqiang, CHEN Jie, BAI Bing, L. I. Yuanbin, ZHU Nenggang. Content Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of Typical High Geological Background Areas, Yunnan Province[J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(5): 1077-1086.
- [29] ADAMO Paola, IAVAZZO Pietro, ALBANESE Stefano, AGRELLI Diana, De VIVO Benedetto, LIMA Annamaria. Bioavailability and soil-to-plant transfer factors as indicators of potentially toxic element contamination in agricultural soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 500/501: 11-22.
- [30] 李杰, 朱立新, 康志强. 南宁市郊周边农田土壤-农作物系统重金属元素迁移特征及其影响因素[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 43-52.
- LI Jie, ZHU Lixin, KANG Zhiqiang. Characteristics of transfer and their influencing factors of heavy metals in soil-crop system of peri-urban agricultural soils of Nanning, South China[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 43-52. doi: 10.11932/karst2018y01
- [31] 湛金吾, 孙一铭, 杨占南, 张显强, 孙敏. 三峡库区云阳消落带土壤重金属形态及其在植物中的富集和转移[J]. *中国岩溶*, 2012, 31(4): 415-422.
- CHEN Jin-wu, SUN Yi-ming, YANG Zhan-nan, ZHANG Xian-qiang, SUN Min. Soil heavy metal's form and their enrichment and transfer in plants in the water level fluctuating zone at Yunyang in Three Gorge reservoir area[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(4): 415-422. doi: 10.3969/j.issn.1001-4810.2012.04.010
- [32] 余飞, 罗恺, 王佳彬, 李瑜, 周皎, 王锐, 余亚伟, 张云逸. 重庆岩溶地质高背景区土壤-农作物系统重金属累积特征及影响因素[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(1): 71-83.
- YU Fei, LUO Kai, WANG Jiabin, LI Yu, ZHOU Jiao, WANG Rui, YU Yawei, ZHANG Yunyi. Characteristics and influencing factors of heavy metal accumulation in soil-crop system in the karst area with high geological background of Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(1): 71-83. doi: 10.11932/karst20230106
- [33] 邹佳玲, 辜娇峰, 杨文弢, 周航, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒. 不同 pH 值灌溉水对土壤 Cd 生物有效性及稻米 Cd 含量的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(4): 1508-1514.
- ZOU Jialing, GU Jiaofeng, YANG Wentao, ZHOU Hang, ZHANG Ping, PENG Peiqin, LIAO Bohan. Effects of different pH values of irrigation water on soil Cd bioavailability and Cd content in rice[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(4): 1508-1514. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2016.0284
- [34] 陈立伟, 杨文弢, 周航, 高子翔, 辜娇峰, 张铭洋, 廖柏寒. 土壤调理剂对土壤-水稻系统 Cd、Zn 迁移累积的影响及健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(4): 1635-1641.
- CHEN Liwei, YANG Wentao, ZHOU Hang, GAO Zixiang, GU Jiaofeng, ZHANG Mingyang, LIAO Bohan. Effects of combined amendment on transport and accumulation of Cd and Zn in soil-rice system and the related health risk assessment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(4): 1635-1641.
- [35] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S]. 2022.
- Hua ren min gong Zhong, Jia shi chang jian Guo. Maximum Levels of Contaminants in Foods[S]. 2022.
- [36] 张倩, 韩贵琳. 贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评估[J]. *环境科学*, 2022, 43(6): 3269-3277.
- ZHANG Qian, HAH Gui-lin. Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(6): 3269-3277.
- [37] 杨琼, 杨忠芳, 张起钻, 刘旭, 卓小雄, 吴天生, 王磊, 韦雪姬, 季峻峰. 中国广西岩溶地质高背景区土壤-水稻系统 Cd 等重金属生态风险评价[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(8): 1317-1331.
- Yang Qong, Yang Zhongfang, Zhang Qizhuan, Liu Xu, Zhuo Xiaoxiong, Wu Tiansheng, Wang Lei, Wei Xueji, Ji Junfeng. Ecological risk assessment of Cd and other heavy metals in soil-rice system in the karst areas with high geochemical background of Guangxi, China. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(7): 1126-1139, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9763-0>
- [38] 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕. 西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(6): 2877-2884.
- LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, NING Zeng-ping, SHUANG Yan, L. I. Hang, M. A. Liang, CHEN Hai-yan. Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(6): 2877-2884.
- [39] LI Xuzhi, DU Junyang, SUN Li, ZHANG Ya, FENG Yanhong, ZHENG Liping, WANG Guoqing, HUANG Xinghua. Derivation of Soil Criteria of Cadmium for Safe Rice Production Applying Soil-Plant Transfer Model and Species Sensitivity Distribution[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(14): 8854.
- [40] 宋静, 许根焰, 骆永明, 高慧, 唐伟. 对农用地土壤环境质量类别划分的思考: 以贵州马铃薯产区 Cd 风险管控为例[J]. *地学*

前缘, 2019, 26(6): 192-198.

Song Jing, Xu Genyan, Luo Yongming, Gao Hui, Tang Wei. some thoughts on the clssification of soil environmental quality for agricultural land: taking risk control of Cd in potato producing area of Guizhou as an example[J]. Earth Science Frontiers,

2019, 26(6): 192-198.

[41] LI Lijun, JIANG Bao, LI Kun, LI Jumei, MA Yibing. Accurate derivation and modelling of criteria of soil extractable and total cadmium for safe wheat production[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 261: 115092.

Study on ecological risk threshold of farmland soil in typical karst regions of Guangxi: A case study of Cadmium

HUANG Chunyang, HUANG Juan, ZHONG Xiaoyu, LI Jie, LI Mingyu

(Guangxi Institute of Geological Survey, Nanning, Guangxi 530023, China)

Abstract Cadmium (Cd) is a non-essential element harmful to human health and is a primary pollutant in agricultural soils. It is important to assess the ecological risk threshold of Cd in soil-crop systems. Previous studies have demonstrated that soils in the karst regions of Southwest China are anomalously enriched in Cd due to geogenic processes. Therefore, it is imperative to propose an effective method for accurately evaluating ecological risk threshold of Cd in agricultural soils within karst regions. Rice is the most widely cultivated cereal crop in Daxin County and is also the crop with the highest Cd exposure in the human diet. In this study, 102 sets of rice crops and their rhizosphere soils were systematically collected from typical karst regions in Guangxi Province. With the use of the Bur III distribution, the species sensitivity distribution (SSD) curves for Cd in agricultural soils of typical karst regions in Guangxi were fitted, and a soil Cd safety threshold was established to protect 95% of rice crops.

The results show that 90.2% of Cd in soil samples exceeded the screening value established by The National Environmental Quality Standard for Soil (GB 15618-2018). However, the Cd content in rice grains cultivated in those fields was quite low, and only 8.82% of the samples surpassing the Limit of Contaminants in Food (GB 2762-2022). This suggests a spatial mismatch in the Cd levels between the soil and the rice grains. Specifically, there are three primary scenarios: (i) the soil exceeds the Cd limit, but the rice remains safe; (ii) both the soil and the rice exceed the Cd limit; and (iii) the soil is within safe Cd levels, yet the rice exceeds the limit. In the study area, higher soil pH values correspond to reduced mobility of Cd, resulting in lower absorption and transfer of Cd by rice grains. Although the soil Cd form is mainly dominated by the content of bioavailable state, the soil pH is mainly weakly alkaline, which inhibits the absorption of soil Cd by plants. Under conditions where soil pH remains unchanged, changes in the soil will not pose a threat to food safety. This is one of the key reasons for the low Cd concentration in rice grown in high Cd soil. The existing standards of soil environmental quality are insufficient for the accurate evaluation of the level of Cd pollution in the soil of the study area. Given this, it is essential to establish the benchmark of soil environmental quality that can reflect the actual conditions. Therefore, using SSD, this study calculated the safety threshold for soil Cd to protect 95% of rice grains and evaluated the actual Cd pollution level in the study area. Based on SSD, the derived soil Cd safety thresholds for protecting 95% of rice grains under soil pH conditions of 5.5–6.5, 6.5–7.5 and 7.5–8.5 are $0.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $1.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and $6.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. Compared with the limits of soil environmental quality stipulated by GB15618-2018, it is evident that the national standard is overly lenient for acidic soil ($5.5 < \text{pH} \leq 6.5$) but overly stringent for neutral ($6.5 < \text{pH} < 7.5$) and alkaline ($\text{pH} > 7.5$) soils. The derived value accuracy of evaluation results significantly increased from 23.5% to 92.1% with increasing pH values. In contrast, the screening value accuracy specified by national standards dropped from 47.1% to 6.3%. Therefore, the research results can be considered as more accurate evaluation thresholds, providing a scientific reference for safe production in Cd-contaminated rice paddies in typical karst regions of Guangxi.

Key words karst region, soil, heavy metal, ecological risk threshold, Cadmium

(编辑 张玲)