

## 滇东耕地土壤铅安全阈值研究

韩东锦, 张乃明, 赵龙, 侯红

引用本文:

韩东锦, 张乃明, 赵龙, 侯红. 滇东耕地土壤铅安全阈值研究[J]. [农业环境科学学报](#), 2022, 41(10): 2190–2199.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0110>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [地质高背景区马铃薯安全生产的土壤镉风险阈值](#)

王旭莲, 刘鸿雁, 周显勇, 罗凯, 于恩江, 冉晓追

[农业环境科学学报](#). 2021, 40(2): 355–363 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0988>

#### [土壤镉污染北方小麦生产阈值及产区划分初探](#)

管伟豆, 肖然, 李荣华, 刘翔宇, 潘君廷, 黄永春, 张增强, 郭堤

[农业环境科学学报](#). 2021, 40(5): 969–977 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1151>

#### [我国20种典型土壤中锌对白符跳虫的毒性阈值及其预测模型](#)

王巍然, 林祥龙, 赵龙, 张家乐, 樊文华, 侯红

[农业环境科学学报](#). 2021, 40(4): 766–773 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1220>

#### [畜禽粪便中铜和锌污染现状及风险分析](#)

袁凯, 熊苏雅, 梁静, 李彦明, 乔玉辉, 李花粉, 陈清

[农业环境科学学报](#). 2020, 39(8): 1837–1842 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0142>

#### [设施农田土壤重金属污染评价及分区阈值研究](#)

曹志强, 韦炳干, 虞江萍, 孟敏, 李海蓉, 杨林生, 尹舒慧, 李峰, 张国印, 陈清

[农业环境科学学报](#). 2020, 39(10): 2227–2238 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0465>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

韩东锦, 张乃明, 赵龙, 等. 滇东耕地土壤铅安全阈值研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2190-2199.

HAN D J, ZHANG N M, ZHAO L, et al. Safe threshold value of lead in cultivated land soil in eastern Yunnan, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(10): 2190-2199.



开放科学 OSID

# 滇东耕地土壤铅安全阈值研究

韩东锦<sup>1,2,3</sup>, 张乃明<sup>1,3\*</sup>, 赵龙<sup>2\*</sup>, 侯红<sup>2</sup>

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 昆明 650201)

**摘要:**为科学划分受污染耕地的环境质量类别、精准判别污染土壤的食物链风险, 基于土壤-农作物野外协同采样结果开展受污染土壤重金属的安全阈值研究, 选择受地质高背景与人类活动叠加影响、耕地土壤超筛选值比例较大的滇东地区为研究区, 以谷物类农产品-土壤协同采样数据为基础, 同时考虑土壤理化性质, 通过分析样品中铅(Pb)的生物富集因子并利用物种敏感度分布法(SSD法)和建立回归模型推导不同pH范围下的耕地安全阈值。结果表明: 在pH≤6.5、6.5<pH≤7.5、pH>7.5范围下, SSD法推导的全量安全阈值分别为84.4、126.3 mg·kg<sup>-1</sup>和187.4 mg·kg<sup>-1</sup>, 推导的有效态阈值分别为20.7、52.1 mg·kg<sup>-1</sup>和104.5 mg·kg<sup>-1</sup>; 建立回归模型推导的不同pH范围(pH≤5.5、5.5<pH≤6.5、6.5<pH≤7.5、pH>7.5)下的有效态含量阈值分别为20.2、42.5、56.3 mg·kg<sup>-1</sup>和94.1 mg·kg<sup>-1</sup>。通过对研究区域内协同采样数据的验证和比对发现, 回归模型预测Pb有效态含量阈值正确率最高(88.1%), 建议将该预测值作为滇东区域农用地土壤环境质量类别动态调整的依据更为科学。

**关键词:**耕地土壤; 铅; 物种敏感度分布法; 阈值; 有效态含量

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)10-2190-10 doi:10.11654/jaes.2022-0110

## Safe threshold value of lead in cultivated land soil in eastern Yunnan, China

HAN Dongjin<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Naiming<sup>1,3\*</sup>, ZHAO Long<sup>2\*</sup>, HOU Hong<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Yunnan Soil Fertilizer and Pollution Remediation Engineering Laboratory, Kunming 650201, China)

**Abstract:** There is an urgent need to carry out research on the safety threshold of heavy metals in contaminated soil based on the results of soil-crop field co-sampling. In this study, eastern Yunnan, which is affected by the superposition of high geological background and human activities, was selected as the research area. Based on co-sampling data of the cereal agricultural products and soil, and considering the physical and chemical properties of the latter, the analysis of lead (Pb) in the samples was carried out. The bioconcentration factors of cultivated lands at different pH ranges were deduced using the species sensitivity distribution (SSD) method and by establishing a regression model of safety threshold values. According to the SSD results (pH≤6.5, 6.5<pH≤7.5, pH>7.5), the full-dose safety thresholds were 84.4, 126.3 mg·kg<sup>-1</sup>, and 187.4 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively, and the effective thresholds were 20.7, 52.1 mg·kg<sup>-1</sup>, and 104.5 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. A regression model was established to deduce the thresholds of available Pb content in soils at pH≤5.5, 5.5<pH≤6.5, 6.5<pH≤7.5, and pH>7.5, whereupon the values were revealed to be 20.2, 42.5, 56.3 mg·kg<sup>-1</sup>, and 94.1 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. Through verification and comparison of the co-sampling data in the study area, it was found that the regression model had the highest accuracy (88.1%) in predicting the threshold of available soil Pb content. It is suggested that the predicted value can be used as the basis for a more scientific dynamic adjustment of the categories of soil environmental quality of agricultural land in eastern Yunnan.

**Keywords:** cultivated soil; lead; species sensitivity distribution method; threshold value; available state content

收稿日期: 2022-01-30 录用日期: 2022-06-13

作者简介: 韩东锦(1995—), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 从事农田土壤环境基准研究。E-mail: 1549014553@qq.com

\*通信作者: 张乃明 E-mail: zhangnaiming@sina.com; 赵龙 E-mail: zhaolong1227@126.com

基金项目: 国家自然科学基金-云南联合基金项目(U2002210); 云南省重点研发计划项目(2018BC003)

**Project supported:** The National Natural Science Foundation of China-Yunnan Joint Fund Project(U2002210); Provincial Key Research and Development Program of Yunnan Province(2018BC003)

铅(Pb)是生物体非必需元素,在环境中具有迁移性,低浓度的Pb可对人体器官产生不可逆的损伤,高浓度的Pb可致癌或致人死亡。诸多研究表明Pb已成为影响食品安全的重要污染物,其毒害性已引起广泛的社会关注<sup>[1]</sup>。我国耕地土壤受重金属污染问题比较突出,其中Pb是超标率较高的重金属元素之一。有学者基于对2018年颁布的《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)的研究发现,现行的土壤Pb含量标准存在“过保护”或“欠保护”现象<sup>[2-3]</sup>,且该现象在我国西南等地尤为突出<sup>[4-7]</sup>。云南省素有“有色金属王国”之称,是我国矿产资源开发活动集中的区域<sup>[8]</sup>,部分地区Pb自然背景值达 $490.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,超过国家农用地土壤污染风险筛选值<sup>[9]</sup>,属于典型的Pb高背景值地区。加之受到矿业活动、农业耕作活动等因素的影响<sup>[10]</sup>,该地耕地土壤Pb含量超标,威胁到了农产品质量安全<sup>[11]</sup>。云南省东部是典型的地质高背景与人类活动叠加影响区,也是以种植玉米等谷物类作物为主的粮食主产区,针对该区域耕地土壤和主栽作物开展Pb安全阈值的研究,可为精准划分耕地土壤环境质量类别、实现受污染耕地安全利用提供科学依据。

目前,安全阈值的推导方法主要有物种敏感度分布(Species sensitivity distribution, SSD)法和评估因子(Assessment factor, AF)法<sup>[12-14]</sup>。SSD法基于物种对污染物敏感性差异分布,并通过物种的毒理数据来构建毒性数据的敏感曲线,选用合适的模型拟合,结果更为科学合理。AF法可测得敏感物种对污染物的无效应浓度。两者相比,AF法推导出的安全阈值存在不确定性,而SSD法能充分考虑物种多样性,已被美国、欧盟等多个国家和地区确立为制定Pb安全阈值的方法,如美国环保部通过SSD法制定的土壤筛选值为 $140 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,加拿大农用地土壤指导值为 $70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[15-16]</sup>。我国现行标准的制定方法包括SSD法和建立回归模型预测法。SSD法通过收集土壤-作物Pb生物富集因子,利用分布模型对作物富集因子和累积概率进行拟合,根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB/T 2762—2017)中Pb限量值反推获得安全阈值<sup>[17-20]</sup>。目前已有学者通过该方法推导安全阈值,如孟楠等<sup>[21]</sup>研究北方污灌区Pb低吸收小麦品种的富集特征并推导风险阈值,郑倩倩等<sup>[22]</sup>利用不同水稻品种富集镉的敏感性差异建立江苏典型水稻土镉的安全阈值。上述研究结果既保证了建立安全阈值方法的科学性,也考虑到了我国不同地域和不同土壤

类型对谷物类作物的差异,为滇东土壤推导谷物类安全阈值提供了参考。SSD法常见的分布模型如Logistic、Burn-III、Log-triangular等,该方法无特定的拟合模型,因此可根据具体情况进行选择。曾庆楠等<sup>[14]</sup>对不同SSD法分布函数拟合精度进行研究,发现Logistic函数模型最佳。经对比筛选,本研究最终采用Logistic函数,该函数的计算结果更具有实际意义。采用回归模型预测法对土壤和农产品中重金属含量以及土壤理化性质(如pH)进行多元回归分析,建立预测模型,依据食品中重金属限量标准,预测土壤Pb有效态含量安全阈值。

综上所述,本研究充分考虑滇东地区的实际情况,并参考我国耕地土壤标准制定方法体系,分别选用SSD法和建立回归模型预测法推导土壤Pb全量与有效态含量安全阈值,为我国耕地在高背景区的分类管理及后续的安全利用提供思路 and 依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域概况

研究区域位于云南省的东部,行政上包括昭通市、昆明市和曲靖市部分区县,该区域气候属亚热带季风气候,雨季集中在每年的5—10月,地貌属于滇东岩溶高原,区域内地带性土壤以红壤为主,成土母质以碳酸盐为主,种植面积最大的是玉米,零星分布有小麦。农用地详查结果显示该区域是云南省受重金属污染耕地面积最大、空间分布最集中、污染程度最重的区域。

### 1.2 样点布设和样品采集

布点采样是获取科研数据最基础的工作,做好土壤-谷物协同采样可为耕地土壤安全阈值的推导提供支撑。本次布点采样遵循以下原则:①优先选择土壤存在Pb污染的县区;②土壤类型均为红壤;③作物的采集既考虑滇东地区作物的产量和播种面积,又兼顾到栽培方式(裸露栽培和设施栽培),样品具有集中代表性,符合当地居民日常需求,因此以玉米为主,兼顾小麦。共采集100个土壤样品,包括79个玉米样品和21个小麦样品,同时记录作物品种名称,玉米主栽品种涉及9个(罗单566、会单4号、胜玉6号、保玉7号、会单888、金玉7号、广玉5号、地沃1号、宣黄4号),小麦主栽品种涉及4个(川麦107、济麦20、小光头麦、云麦42)。土样采集深度为0~20 cm,去除土样中的根茬、动物残体和石块等杂物,每个土壤样品采集1 kg,土样混合均匀后装入塑料密封袋,带回实验

室后风干过筛(2 mm)备用。参考《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T 395—2012)中的规定,每个采样地选用“S”型五点取样法,采样布点规格为5 m×5 m。土壤-谷物协同采样点位分布详见图1。

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 土样Pb全量和有效态含量的测定

土壤Pb全量测定参照《土壤中铅镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141—1997),将处理好的土壤样品用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消煮分解,然后使用火焰原子吸收法测定,使用仪器为原子吸收分光光度计AA6880。

土壤Pb有效态采用《土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法》(GB/T 23739—2009)中的DTPA法测定。所有药品均为优级纯。待测液制备:称取10 g过2 mm筛的风干土样置于塑料瓶中,加入25 mL DTPA浸提剂,25℃下加盖振荡120 min(180 r·min<sup>-1</sup>),然后用滤纸过滤。吸取过滤好的上清液2.5 mL置于塑

料瓶中,然后小心加入0.25 mL浓硝酸,再振荡15 min(不加盖)以驱除CO<sub>2</sub>。待测清液用原子吸收分光光度法直接测定,使用仪器为原子吸收分光光度计AA6880。

#### 1.3.2 农产品中Pb含量的测定

农产品中Pb含量采用石墨炉吸收光谱法消煮(GB 5009.12—2017)测定。样品消解后,经石墨炉原子化,在283.3 nm处测定其吸光度。在一定范围内Pb的吸光度值与Pb含量成正比,可通过与标准系列比较进行定量。

#### 1.3.3 土壤理化性质的测定

用pH计测定土壤pH,土壤悬浊液按照水和土样2.5:1配比。土样中有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化-外加热法测定。

### 1.4 计算方法

#### 1.4.1 物种敏感度分布(SSD)法

SSD法推导步骤如下:①根据实际情况划分土壤pH范围。②在不同pH范围内计算生物富集因子(BCF),生物富集因子为农产品中Pb含量与土壤环境中Pb含量的比值,其公式如下:

$$BCF_1 = C_{\text{农产品}} / C_{\text{土壤Pb全量}}$$

$$BCF_2 = C_{\text{农产品}} / C_{\text{土壤Pb有效态含量}}$$

式中: $C_{\text{农产品}}$ 为谷物类农产品中的Pb含量,mg·kg<sup>-1</sup>。

③根据生物富集因子计算其累积概率,对数据进行参数拟合即可得到SSD曲线,并由EEC-SSD软件直接计算生态风险阈值(HC<sub>5</sub>)。本研究数据采用Logistic函数分布模型。

拟合方程如下:

$$y = \frac{a}{1 + x/x_0} \quad (1)$$

式中: $y$ 为累积概率; $x$ 为1/BCF; $a$ 、 $b$ 、 $x_0$ 为常数。

通过公式(1)反推1/BCF值,如公式(2)。以Pb为例,根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中规定的谷物类Pb标准限值0.2 mg·kg<sup>-1</sup>,按公式(3)推导获得土壤中Pb的安全阈值( $C_s$ )。

$$\frac{1}{BCF} = 10^{\frac{\lg(\frac{a}{y} - 1)}{b}} + \lg x_0 \quad (2)$$

$$C_s = 1/BCF \times C_R \quad (3)$$

式中: $C_R$ 为谷物类的重金属限值。

#### 1.4.2 建立回归模型推导

对土壤和农产品中重金属含量以及土壤理化性质进行多元回归分析,建立预测模型,依据食品中重金

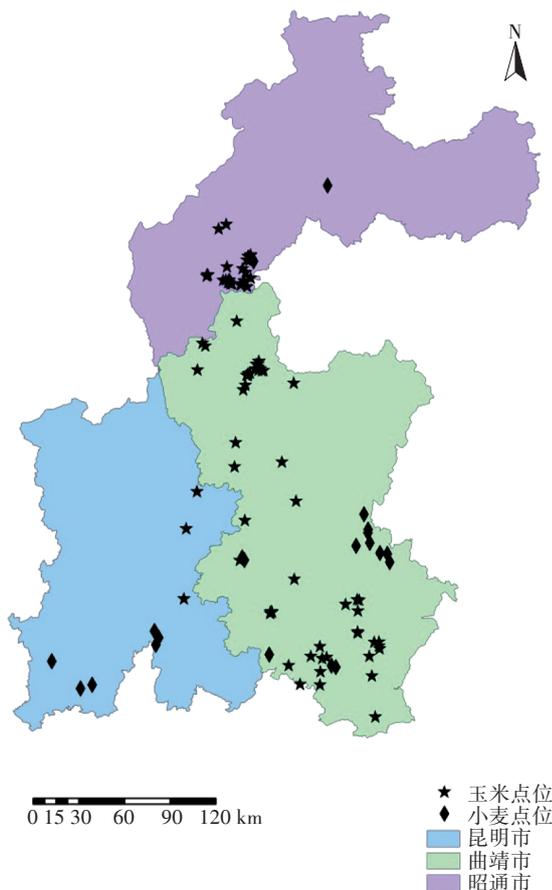


图1 土壤-谷物协同采样点位分布图

Figure 1 Study area and sampling point distribution of 100 groups of samples

属限量标准,推导安全阈值。回归方程式如下:

$$\lg C_{\text{农产品}}=a \times \lg C_{\text{土壤}}+b \times P+c \quad (4)$$

式中: $C_{\text{农产品}}$ 为农产品中污染物含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $C_{\text{土壤}}$ 为土壤中污染物含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $P$ 为土壤pH值; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为方程中参数。

#### 1.4.3 土壤Pb活度计算

Pb活度=农田土壤Pb有效态含量/农田土壤Pb全量 $\times 100\%$ 。

#### 1.5 数据处理和统计分析

使用Excel 2010软件对已有数据进行处理,通过91卫图助手(北京千帆世景科技有限公司开发的全球首款Google Earth卫星影像专业下载器)核实确定采样点位经纬度坐标,并通过ArcGIS 10.8绘制采样点位分布图。采用PASW Statistics 18.0软件对已有数据进行处理,包括均值聚类分析、回归分析等,最后通过国家生态环境基准计算软件(中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室开发的物种敏感度分布法使用系统)绘制拟合SSD曲线,包括输入公式、代入计算等。

## 2 结果与讨论

### 2.1 耕地土壤Pb污染特征

文献资料和采样结果表明,滇东耕地土壤Pb含量存在较大差异。“七五”期间云南省土壤背景值为9.50~490.00  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其中滇东土壤Pb含量范围为2.20~108.20  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,极显著高于全国土壤Pb含量范围(1.5~52.1  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )<sup>[23-24]</sup>。滇东地区土壤成土母质以碳酸盐岩类为主,该类成土母质的特征为土壤中Pb、Zn、Cd含量较高、土壤pH呈弱酸性,受该成土母质的影响,滇东地区土壤Pb背景值高于云南省Pb背

景值。该结论与实际采样和检测的土壤中Pb含量结果一致,具体如表1所示。

由表1可知,自然高背景与人为活动叠加区的耕地土壤中Pb含量的平均值和滇东地区背景值、云南省背景值差异显著,说明人为活动是导致其周边耕地Pb含量激增的主要原因。尹国庆等<sup>[25]</sup>的研究表明农用地土壤重金属主要来源为人为矿业活动,成土母质的影响较低,与本研究结果相符。

结合表2可知,研究区域农田土壤Pb的活度偏高,该结果与赵云杰等<sup>[26]</sup>和KENDIR等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。以往土壤Pb基准值的推导和基准值的确定都以土壤Pb全量作为依据,未考虑土壤Pb有效态含量的影响,因此按照现行标准的划分难以有效保护耕地质量。蒋宝<sup>[28]</sup>以建立的基于EDTA提取态SSD曲线,推导出了Cu的有效态安全阈值,说明重金属有效态也可作为推导土壤基准值的依据。本研究采用SSD法推导安全阈值,通过验证作物正确率来判断其适用性。

### 2.2 土壤理化性质分析

土壤理化性质是影响作物富集重金属的重要因素,也是回归模型推导的重要参数。不同研究结果表明,土壤重金属有效态含量不仅受全量影响,而且还与土壤类型、土壤pH和土壤有机质存在正相关关系<sup>[29-30]</sup>。因此,为探究土壤Pb全量、Pb有效态含量和谷物类Pb含量之间的关系,本研究选定调查区域普遍存在的红壤为调查对象,对其理化性质(土壤pH、土壤有机质含量)进行Pearson相关性分析,具体结果见表3。在此基础上,将谷物类作物Pb含量与土壤Pb全量和土壤Pb有效态含量进行线性拟合(图2),结果表明,谷物类作物Pb含量与土壤Pb有效态含量相关性更高( $R^2=0.759$ ),说明在该研究区

表1 滇东地区不同调查类型的耕地土壤Pb含量分布特征

Table 1 Characteristics of Pb content distribution in soils of cultivated land with different investigation types in eastern Yunnan

调查类型 Type of survey	最小值 Minimum/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	最大值 Maximum/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	平均值 Average value/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	中位值 Median value/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	土壤pH Soil pH	有机质含量 Organic matter content/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
高背景与人为活动叠加区	5.58	889.91	76.53	80.43	5.1~7.8	5.85~52.76
滇东地区背景值 <sup>[23-24]</sup>	2.20	108.20	47.05	37.24	4.5~8.0	$\geq 3.5$
云南省背景值 <sup>[23-24]</sup>	9.50	490.00	40.60	35.70	4.0~8.8	0.72~11.92

表2 研究区域耕地土壤中Pb活度分布(%)

Table 2 Distribution of Pb activity in cultivated soils in areas with different pollution causes (%)

调查类型 Type of survey	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Average value	中位值 Median	变异系数 Coefficient of variation
高背景与人为活动叠加区	4.0	87.6	37.6	33.5	53.0

域,有效态含量作为推导阈值的依据比全量推导阈值将更为有效。

由表3可知,土壤pH与土壤Pb全量、作物Pb含量呈极显著负相关( $R=-0.345, P<0.01$ 和 $R=-0.357, P<0.01$ ),与土壤Pb有效态含量呈显著负相关( $R=-0.332, P<0.05$ ),说明随着土壤pH的降低,对应点位的土壤Pb全量和有效态含量增加,其原因是土壤酸碱度可直接影响土壤元素活性,从而影响Pb在土壤中的形态及迁移性,使Pb在土壤中被活化,增加农产品可吸收的Pb量,这与王凌等<sup>[31]</sup>和LEI等<sup>[32]</sup>通过蔬菜类作物得到的结论一致。土壤Pb全量和土壤Pb有效态含量、作物Pb含量呈极显著正相关( $R=0.861, P<0.01$ 和 $R=0.677, P<0.01$ ),说明土壤Pb全量增加,对应点位的土壤Pb有效态含量也显著增加,表明土壤中Pb的生物有效性提高,作物更容易富集Pb。赵小学等<sup>[33]</sup>发现土壤Pb有效态含量和土壤Pb全量呈显著正相关,与本研究结果一致。在本研究中,土壤有机质含量和土壤Pb全量呈极显著正相关,与土壤Pb有效态含量呈显著正相关,但与作物Pb含量无相关性( $R=0.120$ ),其原因是有机质可改变Pb的形态,同时还影响土壤Pb有效态含量的提取,该现象与万红友等<sup>[34]</sup>

和王科等<sup>[35]</sup>的研究结论一致。

### 2.3 SSD法推导土壤安全阈值

分别以 $1/BCF_1$ 、 $1/BCF_2$ 作为横坐标、累积概率作为纵坐标,选择Logistic分布模型拟合得到不同pH范围下的SSD曲线(图3和图4)。根据输入数据自动计算出 $HC_5$ 等数值,并与现行国家标准对比后进行整合,结果如表4所示。

危险浓度(Hazardous concentration,  $HC_p$ ,  $p$ 为保护物种所占百分比),即保护 $(100-p)\%$ 物种不受影响时所允许的最大剂量浓度,根据实际情况一般选用 $HC_5$ 作为危害浓度<sup>[36]</sup>。此外,对于SSD法Logistic分布模型,检验该模型拟合优度的参数包括决定系数( $R^2$ )、均方根(RMSE)和K-S检验。当 $R^2$ 大于0.6时具有统计学意义, $R^2$ 越接近1,说明拟合优度越大,拟合结果越精准;RMSE也叫回归系统的拟合标准差,可反映出模型的精密度,RMSE越接近于0,说明拟合精确度越高;通过K-S检验可知分布模型是否符合理论分布,其中 $P>0.05$ 证明实际分布曲线与理论分布曲线不具有显著差异,即说明拟合效果好。表4中的结果表明分布模型推导的数值符合理论计算要求。从全量推导结果来看,酸性、中性土壤中的全量安全阈

表3 土壤-作物Pb含量与对应点位土壤理化性质的相关关系

Table 3 Correlation analysis between the Pb content in different receptors and soil physicochemical properties

项目 Item	土壤pH Soil pH	土壤Pb全量 Soil Pb content	土壤Pb有效态含量 Soil Pb available content	有机质含量 Organic matter content	作物Pb含量 Pb content of crop
土壤pH	—	-0.345**	-0.332*	-0.109	-0.357**
土壤Pb全量	-0.345**	—	0.861**	0.442**	0.677**
土壤Pb有效态含量	-0.332*	0.861**	—	0.294*	0.759**
土壤有机质含量	-0.109	0.442**	0.294*	—	0.120
作物Pb含量	-0.357**	0.677**	0.759**	0.120	—

注:\*\*表示在 $P<0.01$ 水平上极显著相关,\*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关。

Note:\*\* means extremely significant correlation at  $P<0.01$  level,\* means significant correlation at  $P<0.05$  level.

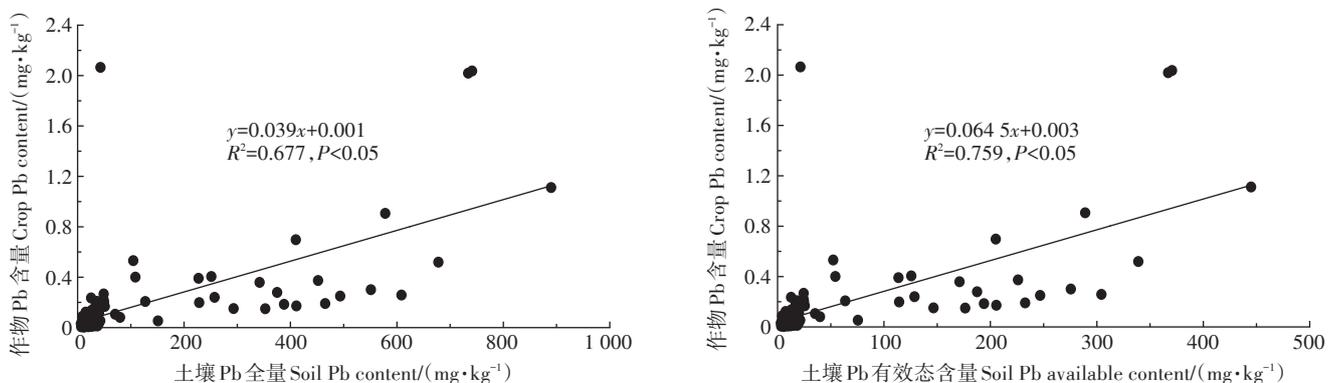


图2 谷物类农产品Pb含量与土壤Pb全量和Pb有效态含量的相关关系

Figure 2 Correlation between the Pb content of cereal agricultural products, total content of Pb in soil, and available content of Pb in soil

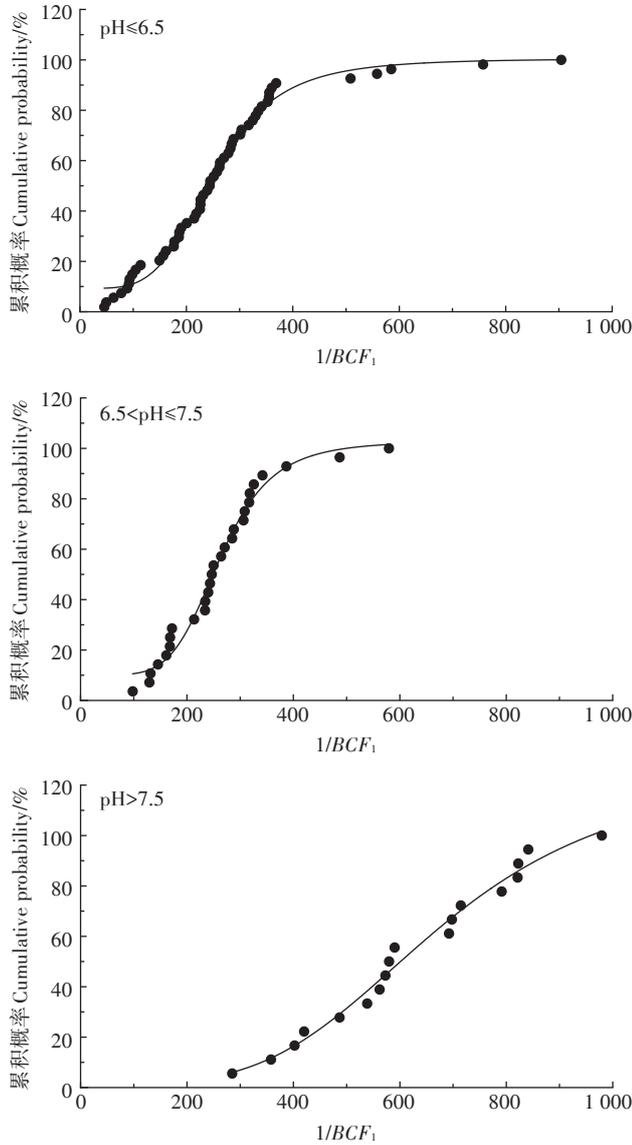


图3 不同pH范围耕地土壤谷物类Pb的SSD全量曲线

Figure 3 Curve of SSD-derived total amounts of grain-like Pb in cultivated soils at different pH ranges

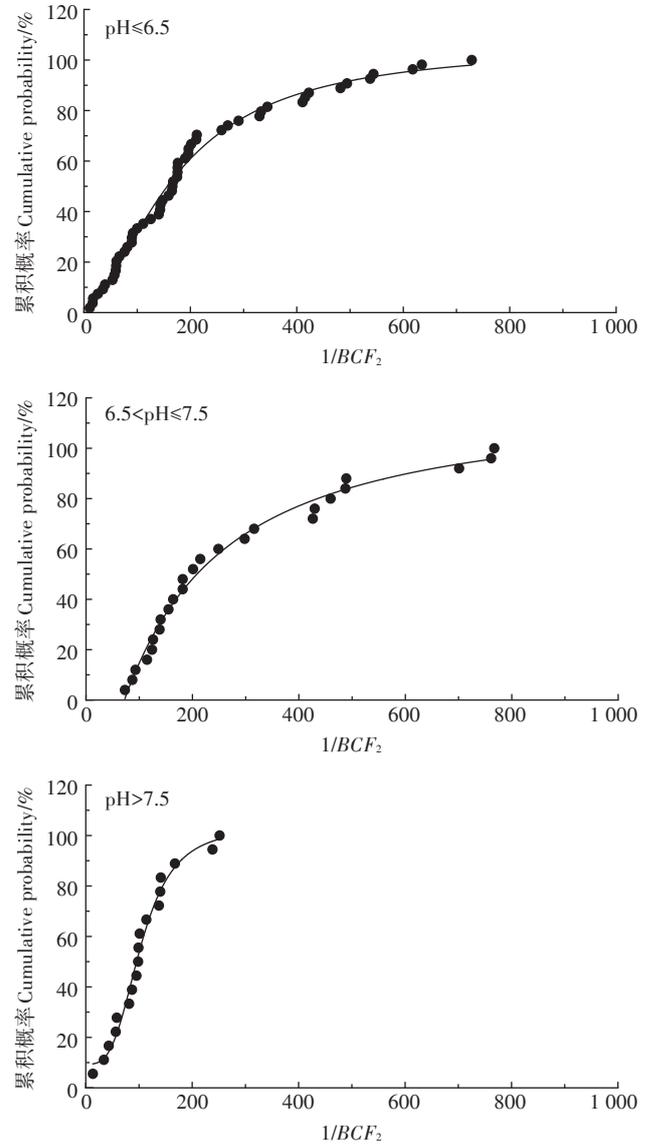


图4 不同pH范围内谷物类Pb的SSD有效态含量曲线

Figure 4 Curves of SSD-derived states of available contents of cereal Pb at different pH ranges

值( $84.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )比GB 15618—2018中的风险筛选值( $90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )低。在酸性土壤条件下,土壤对Pb离子吸附性降低<sup>[37]</sup>,Pb的迁移性和生物有效性提高,因此更容易被作物吸收。在 $\text{pH} > 7.5$ 的范围内推导出的全量结果( $187.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )比风险筛选值( $170 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )高。本研究基于土壤Pb全量推导出的不同pH范围下的安全阈值都高于郑丽萍等<sup>[38]</sup>基于土壤微生物、动物和植物的生态风险的土壤Pb环境基准值( $80.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),其结果与其他国家和地区的基准值或指导值相比处于中等保守的水平。王晓南等<sup>[39]</sup>通过生态毒理学实验和搜集本土物种文献数据,基于SSD法计算出保定潮土中保护陆生植物、无脊椎动物Pb土壤环境

基准值范围为 $31.7 \sim 58.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。以上研究认为,地域、受体(植物、动物、微生物)、土壤理化性质等因素的不同导致阈值研究结果存在较大差异,因此需要结合本土实际情况进行安全阈值的研究。从有效态含量推导结果来看,土壤pH增加,土壤重金属的有效态含量下降,土壤pH降低,重金属有效态含量增加。这一结果与周启星等<sup>[40]</sup>和李宁<sup>[41]</sup>的研究结论一致。目前国内暂无重金属有效态含量标准进行对比,因此可通过实际采样结果验证安全阈值的准确性。

#### 2.4 回归模型法推导的安全阈值

基于谷物类Pb含量与土壤理化性质的相关性分析等结果,通过PASW Statistics 18.0软件将相关因子

表4 不同pH范围土壤Pb全量、有效态含量安全阈值

Table 4 Thresholds of total and available Pb contents in soils of different pH ranges

项目 Item	pH范围 pH range	HC <sub>s</sub> /(mg·kg <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	RMSE	P(K-S)
全量	pH≤6.5	84.4	0.97	0.051	>0.05
	6.5<pH≤7.5	126.3	0.97	0.046	>0.05
	pH>7.5	187.4	0.91	0.070	>0.05
有效态含量	pH≤6.5	20.7	0.95	0.059	>0.05
	6.5<pH≤7.5	52.1	0.98	0.038	>0.05
	pH>7.5	104.5	0.91	0.066	>0.05
GB 15618—2018 风险筛选值	pH≤5.5	70	—	—	>0.05
	5.5<pH≤6.5	90	—	—	>0.05
	6.5<pH≤7.5	120	—	—	>0.05
	pH>7.5	170	—	—	>0.05

表5 不同pH范围耕地土壤Pb有效态含量HC<sub>s</sub>  
Table 5 Threshold of the state of available Pb content in cultivated soil in different pH ranges

pH范围 pH range	有效态含量 HC <sub>s</sub> Available content HC <sub>s</sub> /(mg·kg <sup>-1</sup> )
pH≤5.5	20.2
5.5<pH≤6.5	42.5
6.5<pH≤7.5	56.3
pH>7.5	94.1

引入公式(4),建立回归方程,如公式(5)所示,分别将GB 2762—2017中谷物类Pb的限值(0.2 mg·kg<sup>-1</sup>)和GB 15618—2018中土壤Pb的风险筛选值代入计算,得到不同pH范围的有效态HC<sub>s</sub>(表5)。

$$\lg C_{农产品} = 0.46 \lg C_{全量} + 3.79 \lg C_{有效态含量} - 1.43 \times P + 1.54 (R^2 = 0.736) \quad (5)$$

### 2.5 安全阈值结果验证

参照夏家淇<sup>[2]</sup>的研究思路,分别将验证结果以正确率和错误率的形式体现。正确率包括:土壤Pb含量超标,对应点位农产品Pb含量超标;土壤Pb含量不超标,对应点位农产品Pb含量不超标。错误率包括:土壤Pb含量不超标,对应点位农产品Pb含量超标;土壤Pb含量超标,对应点位农产品Pb含量不超标。划分结果如表6所示。

由表6可知,根据土壤Pb全量制定的风险筛选值和安全阈值正确率不足80%,基于本研究全量推导

安全阈值正确率(76.5%)高于GB 15618—2018风险筛选值正确率(73.1%),说明现行标准的制定方法可行,但对研究区域的适用性较低。通过比较全量安全阈值和有效态安全阈值发现,基于有效态含量推导的安全阈值正确率更高,其中回归模型预测有效态HC<sub>s</sub>的正确率最高(88.1%),充分证明研究区域中土壤Pb有效态含量安全阈值的适用性。土壤重金属全量和其有效态含量没有固定的线性关系,影响土壤重金属有效态含量的变化因素除土壤理化性质外,土层深度、土地利用方式和使用其他化学物质都会综合影响重金属有效态含量的变化<sup>[42-44]</sup>。不同有效态含量的提取方法和浸提剂也会直接影响土壤Pb有效态含量的测定<sup>[45-46]</sup>。因此,验证结果有一定的局限性,仅适用于研究区域收集的数据,但该方法可用于制定我国其他不同成土母质或不同土壤利用类型的耕地安全阈值,作为现行标准的补充和延伸,优先考虑农产品中重金属含量,才能更合理地进行耕地质量类别划分并保护农产品的质量和产量<sup>[47-49]</sup>。基于本研究的结果,研究区域耕地质量类别划分依据建议参考表7。

### 3 结论

(1)滇东地区属于高地质背景和人为活动叠加影响区,谷物类作物主产区耕地土壤Pb含量平均值为

表6 参照不同pH范围的划分结果

Table 6 Refer to the division results of different pH ranges

名称 Name	方法 Method	正确率 Correct rate/%	错误率 Error rate/%
GB 15618—2018 风险筛选值	SSD法	73.1	26.9
基于本研究全量推导安全阈值	SSD法	76.5	23.5
基于本研究有效态含量推导安全阈值	SSD法	82.5	17.5
回归模型预测有效态HC <sub>s</sub>	建立回归模型预测	88.1	11.9

表7 滇东地区自然高背景与人为活动双重影响下耕地质量类别划分依据

Table 7 Classification basis of cultivated land quality under the dual influence of natural high background and human activities in eastern Yunnan

作物Pb含量 Crop Pb content	土壤Pb有效态含量 Available Pb content in soil	质量分类 Classification
未超过限值	未超过回归模型预测有效态含量安全阈值	优先保护类
	超过回归模型预测有效态含量安全阈值	安全利用类
超过限值	未超过回归模型预测有效态含量安全阈值	安全利用类
	超过回归模型预测有效态含量安全阈值	严格管控类

76.53 mg·kg<sup>-1</sup>, 远高于云南省土壤 Pb 背景值 (40.60 mg·kg<sup>-1</sup>) 和滇东地区背景值 (47.05 mg·kg<sup>-1</sup>)。

(2) 通过 SSD 法推导不同 pH 范围 (pH≤6.5、6.5<pH≤7.5、pH>7.5) 耕地土壤 Pb 全量安全阈值分别为 84.4、126.3 mg·kg<sup>-1</sup> 和 187.4 mg·kg<sup>-1</sup>; 有效态安全阈值分别为 20.7、52.1 mg·kg<sup>-1</sup> 和 104.5 mg·kg<sup>-1</sup>。

(3) 应用回归模型推导不同 pH 范围 (pH≤5.5、5.5<pH≤6.5、6.5<pH≤7.5、pH>7.5) 耕地土壤 Pb 有效态安全阈值分别为 20.2、42.5、56.3 mg·kg<sup>-1</sup> 和 94.1 mg·kg<sup>-1</sup>。

(4) 数据验证结果显示利用回归模型预测的 Pb 安全阈值正确率最高 (88.1%), 其次是基于 SSD 法推导出的有效态安全阈值 (82.5%), 两者皆高于全量安全阈值的正确率 (73.1%、76.5%)。

#### 参考文献:

[1] LI Z Y, MA Z W, HUANG L, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468/469: 843–853.

[2] 夏家淇. 农用地块土壤污染分类标准制订方法探讨[J]. 生态与环境学报, 2019, 35(3): 405–408. XIA J Q. Methods for derivation of site specific standard for management of contaminated agricultural soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(3): 405–408.

[3] 陈世宝, 王萌, 李杉杉, 等. 中国农田土壤重金属污染防治现状与问题思考[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 35–41. CHEN S B, WANG M, LI S S, et al. Current status of and discussion on farmland heavy metal pollution prevention in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(6): 35–41.

[4] 李洋, 张乃明, 魏复盛. 滇东高背景区菜地土壤健康风险评价与基准[J]. 中国环境科学, 2020, 40(10): 4522–4530. LI Y, ZHANG N M, WEI F S. A benchmark study on soil health risks of vegetable fields in a high-cadmium background area in eastern Yunnan[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(10): 4522–4530.

[5] 韩东锦, 赵龙, 张乃明, 等. SSD 法对西南碳酸盐岩母质区稻田土壤镉污染类型划分研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34(2): 409–418. HAN D J, ZHAO L, ZHANG N M, et al. Classification of Cd contaminated paddy soils in carbonate parent material area of southwest China by species sensitivity distribution method (SSD)[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(2): 409–418.

[6] 涂宇, 刘鸿雁, 朱恒亮, 等. 贵阳市典型污染区蔬菜和水稻重金属富集特征及质量评价[J]. 山地农业生物学报, 2020, 39(1): 1–8. TU Y, LIU H Y, ZHU H L, et al. Enrichment characteristics and quality assessment of heavy metals in vegetable and rice in typically polluted areas of Guiyang[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2020, 39(1): 1–8.

[7] 韦业川, 张新英, 秦贱荣, 等. 广西铅锌矿企业周边农产品重金属污染及健康风险评估[J]. 南宁师范大学学报(自然科学版), 2020, 37(1): 81–85. WEI Y C, ZHANG X Y, QIN J R, et al. Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural products around lead-zinc mining industries in Guangxi[J]. *Journal of Nanning Normal University(Natural Science Edition)*, 2020, 37(1): 81–85.

[8] 张乃明. 环境土壤学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013. ZHANG N M. *Environmental pedology*[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2013.

[9] 郎笛, 王宇琴, 张芷梦, 等. 云南省农用地土壤生态环境基准与质量标准建立的思考及建议[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(1): 74–86. LANG D, WANG Y Q, ZHANG Z M, et al. The establishment of soil eco-environmental benchmark and environmental quality standards for agricultural land in Yunnan Province[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2021, 16(1): 74–86.

[10] SONG W E, CHEN S B, LIU J F, et al. Variation of Cd concentration in various rice cultivars and derivation of cadmium toxicity thresholds for paddy soil by species-sensitivity distribution[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(9): 1845–1854.

[11] 杨牧青, 康宏宇, 刘源, 等. 云南会泽某铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染特征与评价[J]. 山东农业科学, 2017, 49(4): 72–77. YANG M Q, KANG H Y, LIU Y, et al. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in soil surrounding a lead and zinc smelter in Huize of Yunnan Province[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2017, 49(4): 72–77.

[12] JACOBS J A, LEHR J H, TESTA S M. Metals associated with acid rock drainage and their effect on fish health and ecosystems[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2014.

[13] JANSSEN C R, HEJIERCK G G, SCHAMPELAERE K A C D, et al. Environmental risk assessment of metal: Tools for incorporating bioavailability[J]. *Environment International*, 2003, 28(8): 793–800.

[14] 曾庆楠, 安毅, 秦莉, 等. 物种敏感性分布法在建立土壤生态阈值方面的研究进展[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(3): 1220–1224. ZENG Q N, AN Y, QIN L, et al. Advances on species sensitivity distribution in deriving soil ecological thresholds[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(3): 1220–1224.

- [15] SIMON C, JO J. Using soil guide line values[R]. Bristol: U. K. Environment Agency, 2009.
- [16] HOSFORD M. Human health toxicological assessment of contaminants in soil[R]. Bristol: U. K. Environment Agency, 2009.
- [17] QI Y J, YAO Z W, MA X D, et al. Ecological risk assessment for organophosphate esters in the surface water from the Bohai Sea of China using multimodal species sensitivity distributions[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 820: 153172.
- [18] JINHEE P, SANG D K. Derivation of predicted no effect concentrations (PNECs) for heavy metals in freshwater organisms in Korea using species sensitivity distributions (SSDs)[J]. *Minerals*, 2020, 10(8): 697.
- [19] 文晨, 杨虹, 卢学强, 等. 基于物种敏感性分布法的生态风险评价研究进展[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(1): 353-357. WEN C, YANG H, LU X Q, et al. Research advances in the ecological risk assessment based on the species sensitivity distributions[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(1): 353-357.
- [20] MOREIRA R A, DA SILVA MANSANO A, ROCHA O. The toxicity of carbofuran to the freshwater rotifer, *Philodina roseola*[J]. *Ecotoxicology*, 2015, 24(3): 604-615.
- [21] 孟楠, 王萌, 雷小琴, 等. 基于物种敏感性分布(SSD)的耐盐与Pb低吸收小麦筛选研究及应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(5): 947-956. MENG N, WANG M, LEI X Q, et al. Screening low Pb-uptake and high salinity tolerance wheat cultivars using species sensitivity distribution (SSD) and its application[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2019, 27(5): 947-956.
- [22] 郑倩倩, 王兴祥, 丁昌峰. 基于物种敏感性分布的江苏省典型水稻土Cd安全阈值研究[J]. 土壤, 2019, 51(3): 557-565. ZHENG Q Q, WANG X X, DING C F. Food safety thresholds of cadmium in two typical paddy soils of Jiangsu Province based on species sensitivity distribution[J]. *Soils*, 2019, 51(3): 557-565.
- [23] 中国环境监测总站. 中华人民共和国土壤环境背景值图集[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994: China National Environmental Monitoring Centre. Atlas of soil environment background values of the People's Republic of China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1994.
- [24] 魏复盛. 中国土壤元素背景值[M]. 2版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. WEI F S. Chinese soil element background values[M]. 2nd Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [25] 尹国庆, 江宏, 王强, 等. 安徽省典型区农用地土壤重金属污染成因及特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1): 96-104. YIN G Q, JIANG H, WANG Q, et al. Analysis of the sources and characteristics of heavy metals in farmland soil from a typical district in Anhui Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 96-104.
- [26] 赵云杰, 马智杰, 张晓霞, 等. 土壤-植物系统中重金属迁移性的影响因素及其生物有效性评价方法[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(3): 177-183. ZHAO Y J, MA Z J, ZHANG X X, et al. Influencing factors of heavy metal mobility and evaluating methods of heavy metal bioavailability in soil-plant system[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2015, 13(3): 177-183.
- [27] KENDIR E, KENTEL E, SANIN F D. Evaluation of heavy metals and associated health risks in a metropolitan wastewater treatment plant's sludge for its land application[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2015, 21(6): 1631-1643.
- [28] 蒋宝. 土壤铜镍长期老化行为及有效态生态阈值研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017. JIANG B. Long-term aging behavior of soil added nickel and copper and ecological thresholds based on extractable copper in soils[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [29] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 土壤有效态Cd、Cu、Pb的分布特征及影响因素研究[J]. 地理科学, 2010, 30(2): 254-260. ZHONG X L, ZHOU S L, LI J T, et al. Soil available Cd, Cu, Pb distribution characteristic and its influencing factors[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(2): 254-260.
- [30] 杨梦丽, 马友华, 黄文星, 等. 土壤Cd和Pb有效态与全量和pH相关性研究[J]. 广东农业科学, 2019, 46(4): 74-80. YANG M L, MA Y H, HUANG W X, et al. Study on the correlation between available state, total amount and pH of soil Cd and Pb[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2019, 46(4): 74-80.
- [31] 王凌, 张国印, 张小龙, 等. 蔬菜土壤重金属生物有效性及有效态与全量相关性研究[J]. 华北农学报, 2011, 26(增刊1): 85-88. WANG L, ZHANG G Y, ZHANG X L, et al. Study on the bioavailability of heavy metal and correlation between the available concentration and the total in vegetable soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(Suppl 1): 85-88.
- [32] LEI B K, FAN M S, CHEN Q, et al. Soil and vegetables enrichment with heavy metals from geological sources in Gilgit, northern Pakistan[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73(7): 1820-1827.
- [33] 赵小学, 姚东平, 成永霞, 等. 铅冶炼区土壤重金属总量和有效态含量的函数分析[J]. 中国环境监测, 2017, 33(1): 68-74. ZHAO X X, YAO D P, CHENG Y X, et al. Function analysis on the total and available contents of heavy metal in soils of a lead smelting area[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, 33(1): 68-74.
- [34] 万红友, 周生路, 赵其国. 苏南经济快速发展区土壤有效态铅、镍含量影响因素及分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1566-1573. WAN H Y, ZHOU S L, ZHAO Q G. Influencing factors and distributing characteristics of soil available Pb and Ni in the region with high economy development of south Jiangsu Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1566-1573.
- [35] 王科, 邓劲松, 李浩, 等. 成都市果园土壤铅分布特征及其有效性影响因素研究[J]. 四川农业科技, 2019(11): 40-42. WANG K, DENG J S, LI H, et al. Study on the distribution characteristics of soil lead in orchards in Chengdu and the influencing factors of its effectiveness[J]. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 2019(11): 40-42.
- [36] STRAALEN N M V, POSTHUMA L. Theory of ecological risk assessment based on species sensitivity distributions[J]. *Palaeo-Geography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2002, 175(1/2/3/4): 249-272.
- [37] VALLES A M C, OLMOS M M A, LLORENS E, et al. Redox potential and pH behavior effect on arsenic removal from water in a con-

- structed wetland mesocosm[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2014, 33(4):1332-1339.
- [38] 郑丽萍, 龙涛, 冯艳红, 等. 基于生态风险的铅(Pb)土壤环境基准研究[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(6):1030-1035. ZHENG L P, LONG T, FENG Y H, et al. Environmental quality criteria for lead in soil based on ecological risk[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(6):1030-1035.
- [39] 王晓南, 陈丽红, 王婉华, 等. 保定潮土铅的生态毒性及其土壤环境质量基准推导[J]. 环境化学, 2016, 35(6):1219-1227. WANG X N, CHEN L H, WANG W H, et al. Ecotoxicological effect and soil environmental quality criteria of lead in the fluvo-aquic soil of Baoding[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(6):1219-1227.
- [40] 周启星, 滕涌, 展思辉, 等. 土壤环境基准/标准研究需要解决的基础性问题[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1):1-14. ZHOU Q X, TENG Y, ZHAN S H, et al. Fundamental problems to be solved in research on soil-environmental criteria/standards[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1):1-14.
- [41] 李宁. 基于不同终点测定土壤铅的生态风险阈值及其预测模型[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016. LI N. The toxicity thresholds (EC<sub>x</sub>) of Pb and its predicted models based on various endpoint determination[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [42] 黄家鑫, 许胜超, 龚庆杰, 等. 云南会泽东北部地区重金属环境污染评价[J]. 地球学报, 2022, 43(1):93-100. HUANG J X, XU S C, GONG Q J, et al. Environmental assessment of heavy metal contamination in the northeast of Huize County, Yunnan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2022, 43(1):93-100.
- [43] 周江明. 中国耕地重金属污染现状及其人为污染源浅析[J]. 中国土壤与肥料, 2020(2):83-92. ZHOU J M. The present status of heavy metals pollution in farmland soils and analysis of polluting sources in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(2):83-92.
- [44] 张新帅, 钟伟, 湛方栋, 等. 铅锌矿区周边玉米根系低分子量有机酸、根际土壤镉铅形态与植株镉铅累积特征[J]. 山地农业生物学报, 2021, 40(3):7-14. ZHANG X S, ZHONG W, ZHAN F D, et al. Characteristics of low-molecular-weight organic acids secreted by roots, Cd and Pb forms and accumulation characteristics in *Zea mays* L. grown in a lead-zinc mining area[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2021, 40(3):7-14.
- [45] XIONG T, AUSTRUY A, PIERART A, et al. Kinetic study of phytotoxicity induced by foliar lead uptake for vegetables exposed to fine particles and implications for sustainable urban agriculture[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 46(8):16-27.
- [46] 杨金燕, 杨肖娥, 何振立. 采用浸提法探讨土壤中来源铅的生物有效性[J]. 环境生态学, 2020, 2(9):31-37. YANG J Y, YANG X E, HE Z L. The bioavailability of exogenous lead in soils studied by extraction method[J]. *Environmental Ecology*, 2020, 2(9):31-37.
- [47] 袁国军, 卢绍辉, 梅象信, 等. 农用地土壤污染风险管控标准延伸理解及其评价标准现状分析[J]. 中国农学通报, 2020, 36(2):84-89. YUAN G J, LU S H, MEI X X, et al. Extended understanding of soil pollution risk management standards for agricultural lands and the status of evaluation standards[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(2):84-89.
- [48] 应蓉蓉, 张晓雨, 孔令雅, 等. 农用地土壤环境质量评价与类别划分研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(1):18-25. YING R R, ZHANG X Y, KONG L Y, et al. Technical analysis of soil environmental quality evaluation and category classification of agricultural land[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(1):18-25.
- [49] 刘娟, 李洋, 张敏, 等. 滇东农田土壤铅污染健康风险评估及基准研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1):241-250. LIU J, LI Y, ZHANG M, et al. Health risk assessment and benchmark of lead pollution in agricultural soils in east Yunnan, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(1):241-250.

(责任编辑:李丹)