

许根焰, 宋 静, 高 慧, 等. 贵州省白菜种植土壤镉风险管控标准研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1490–1497.

XU Gen-yan, SONG Jing, GAO Hui, et al. Derivation of risk screening and intervention values for cadmium-contaminated agricultural land based on Chinese cabbage in the Guizhou Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1490–1497.

## 贵州省白菜种植土壤镉风险管控标准研究

许根焰<sup>1,2</sup>, 宋 静<sup>1,2\*</sup>, 高 慧<sup>3</sup>, 张 厦<sup>4</sup>

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 荷兰瓦赫宁根大学, 6700AA; 4. 美国特拉华大学, DE19716)

**摘 要:**为制定针对具体作物的土壤Cd地方标准,以贵州省为典型区域,采集6种典型土壤开展人工Cd污染土壤盆栽试验,建立白菜可食部分Cd与土壤总Cd、HNO<sub>3</sub>-Cd及CaCl<sub>2</sub>-Cd之间的关系,以食品中污染物限量反推安全种植白菜的土壤Cd筛选值(RSVs50或RSVs95)和管制值(RIVs95),并进行适宜性验证。结果表明:土壤总Cd和两种有效态Cd均能与白菜可食部分Cd含量建立极显著的一元回归模型,考虑pH的多元回归模型R<sup>2</sup>值显著提高;5.5≤pH≤8.0时,土壤总Cd的筛选值RSVs50(0.8~1.7 mg·kg<sup>-1</sup>)和管制值RIVs95(2.8~8.4 mg·kg<sup>-1</sup>)均高于现行国家标准;5.5≤pH≤8.0时,基于0.43 mol·L<sup>-1</sup> HNO<sub>3</sub>提取态Cd的土壤筛选值和管制值随pH升高而增大;基于0.01 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>提取态的土壤Cd管控标准与土壤pH无关,筛选值RSVs95、RSVs50和管制值RIVs95分别为0.02、0.078、0.09 mg·kg<sup>-1</sup>;标准适宜性验证结果表明,现行土壤Cd筛选值和管制值均偏保守(保守率>68%),本研究推导的土壤总量和两种有效态Cd的筛选值RSVs50合适率均较高(>80%)。因此,为更好地指导农用地分类管理,有必要制定基于有效态和特定作物的地方土壤环境标准。

**关键词:**风险筛选值;风险管制值;土壤-作物迁移模型;镉

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)07-1490-08 doi:10.11654/jaes.2018-1629

### Derivation of risk screening and intervention values for cadmium-contaminated agricultural land based on Chinese cabbage in the Guizhou Province

XU Gen-yan<sup>1,2</sup>, SONG Jing<sup>1,2\*</sup>, GAO Hui<sup>3</sup>, ZHANG Sha<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Wageningen University of the Netherlands, 6700AA, Netherlands; 4. University of Delaware of the United States, DE19716, USA)

**Abstract:** The objective of this study was to derive regional soil Cd criteria for cultivated land. Six representative soils were collected from Guizhou plateau and were spiked with Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> in a pot experiment using Chinese cabbage. Two widely utilized extractants, 0.43 mol·L<sup>-1</sup> HNO<sub>3</sub> and 0.01 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>, were also included to evaluate the phytoavailability of Cd and were correlated to Cd concentrations in cabbage by either linear regression or multi-linear regression (log transformed). Soil Cd risk screening values (RSVs) and risk intervention values (RIVs) were back calculated based on food quality standards. The results indicated that total Cd and available Cd could be used to establish a highly significant regression model or multiple regression model for the Cd content in the edible parts of Chinese cabbage. Within the pH range (5.5≤pH≤8.0), the calculated soil Cd RSVs50 (0.8~1.7 mg·kg<sup>-1</sup>) and RIVs95 (2.8~8.4 mg·kg<sup>-1</sup>) were higher than the existing national standard (GB 15618—2018). The 0.43 mol·L<sup>-1</sup> HNO<sub>3</sub>-Cd based soil Cd criteria increased with increasing soil pH. The 0.01 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>-Cd based soil Cd criteria was independent of soil pH. RSVs95, RSVs50, and RIVs95 were 0.02, 0.078 mg·kg<sup>-1</sup>, and 0.09

收稿日期:2018-12-25 录用日期:2019-03-19

作者简介:许根焰(1993—),男,安徽安庆人,硕士研究生,从事土壤环境基准研究。E-mail:18155373588@163.com

\*通信作者:宋 静 E-mail:jingsong@issas.ac.cn

基金项目:中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-STZ-ZDTP-005)

Project supported: Science and Technology Service Network Program of Chinese Academy of Sciences (KFJ-STZ-ZDTP-005)

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively. Standard suitability assessment using field and literature data showed that the existing national soil Cd standard was rather conservative. The RSVs50 based on total Cd and two available Cd proposed in this study showed a high rate of correctness (>80%). The present study confirmed that for better risk management of agricultural land, the establishment of regional soil environmental standards based on available concentration and specific crops is required.

**Keywords:** risk screening values; risk intervention values; soil-crop transfer model; cadmium

2018年8月1日,生态环境部发布了《土壤环境质量 农用地土壤风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),遵循风险管控的思路。现行风险管控标准中旱地土壤镉(Cd)的风险筛选值沿用95标准,管制值主要基于大田水稻物种敏感度分布(SSD)模型的95%危害浓度(HC95)制定。然而,我国土壤重金属背景值呈现出区域化的态势。西南地区(云南、四川、贵州等)土壤中铅、镉、锌、铜、砷等重金属背景值远高于全国平均背景值<sup>[1]</sup>。以贵州省为例,根据全国土壤环境背景值调查结果<sup>[2]</sup>,贵州省土壤重金属背景值偏高,其中Cd的75%筛选值( $0.37\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )就已经高于现行土壤Cd的风险筛选值( $0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。根据现行标准规定,土壤重金属超过风险筛选值可能会存在土壤污染风险,需要通过土壤-作物协同监测确定农产品安全。这说明贵州省可能存在四分之一的土壤由于土壤地质背景的原因而增加土壤-作物协同监测的需求和成本。因此,该标准是否适用于指导西南地区特定农产品的种植,还需进一步验证。

《中华人民共和国土壤污染防治法》规定,国家支持土壤环境基准研究,各省可以制定严于国家的地方土壤污染风险管控标准。贵州省位于我国西南成矿带,农用地资源匮乏,有着“八山一水一分田”的土地分布特征。因此,研究贵州省农用地土壤重金属风险管控标准具有典型性和代表性。

重金属Cd在土壤-作物系统中的迁移较为活跃,容易通过食物链途径进入生物体并造成危害<sup>[3-5]</sup>。对于动物和绝大多数人群来说,饮食摄入是Cd暴露的主要途径<sup>[6-7]</sup>。土壤-作物迁移模型常用来描述土壤重金属Cd与作物可食部分Cd含量之间的关系<sup>[8-11]</sup>。作物对土壤重金属的吸收与其赋存形态而非重金属总量密切相关<sup>[12]</sup>。大量研究表明<sup>[12-15]</sup>,表征土壤重金属的直接有效库( $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CaCl}_2$ 提取态)和活性库( $0.43\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HNO}_3$ 提取态)均能与作物可食部分重金属建立极显著的相关关系,因此研究不同有效态Cd与作物Cd含量的相关关系,并推导基于有效量指标的风险管控标准具有重要意义。

为探讨新颁布的农用地土壤风险标准是否适用

于贵州高背景土壤,本研究选取了贵州省6种典型土壤(酸性/碱性石灰土、黄棕壤、黄壤、紫色土和红壤),开展人工Cd污染土壤的盆栽试验,建立白菜可食部分Cd与土壤总Cd、 $\text{HNO}_3$ 提取态以及 $\text{CaCl}_2$ 提取态Cd之间的关系,采用50%置信度模型预测线、95%预测上限和95%预测下限,并根据食品中Cd限量标准反推得到安全种植白菜的土壤Cd风险筛选值(RSVs50或RSVs95)与风险管制值(RIVs95)。此外,采用野外田间数据和文献数据对现行土壤Cd风险管控标准和本研究得到的土壤Cd风险管控标准分别进行标准适宜性的验证,以期为我国高背景地区土壤环境风险管控标准的制定积累基础数据,为该地区有效实施污染农用地的安全利用和风险管控提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

#### 1.1.1 供试土壤

供试土壤采自贵州省无明显人为污染的表层农用地土壤(0~20 cm),分别为酸性石灰土、黄棕壤、黄壤、红壤、紫色土和碱性石灰土6种土壤类型,分别采自安顺市普定县、威宁市草海镇、贵阳市花溪区、黔西南州安龙县、安顺市西秀区和贵州省关索镇等6个不同区域。将采集的新鲜土样经自然风干,去除杂物,过2、0.25、0.15 mm筛,备用。分别测定土壤基本理化性质以及重金属含量,土壤理化性质测定参考文献[16],重金属总量分析方法参考文献[17]。取20%的样品重复,土壤理化性质及重金属总Cd含量见表1。土壤pH范围在5.42~7.68,土壤有机质 $7.96\sim 51.44\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、阳离子交换量 $11.34\sim 36.95\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、重金属总Cd(本底值) $0.26\sim 1.35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤理化性质及土壤Cd含量变异系数较大。

#### 1.1.2 供试作物

供试作物为叶菜类白菜(优选极早快菜-*Brassica pekinensis* L.),作物种子由贵州省农业科学研究院提供,为贵州省主栽品种。

### 1.2 盆栽试验

温室盆栽试验于2017年9月至12月在本所温室

表1 供试土壤基本理化性质(n=6)

Table 1 Basic physicochemical properties of soil tested(n=6)

土壤类型 Soil types	pH	有机质 Organic matter/ g·kg <sup>-1</sup>	阳离子交换量 CEC/ cmol·kg <sup>-1</sup>	全氮 Total nitrogen/ g·kg <sup>-1</sup>	全磷 Total phosphorous/ g·kg <sup>-1</sup>	全钾 Total potassium/ g·kg <sup>-1</sup>	总Cd(本底值) Total Cd(CK)/ mg·kg <sup>-1</sup>
酸性石灰土	6.06	51.44	17.71	2.03	1.23	6.91	0.62
黄棕壤	5.60	37.41	20.79	0.99	0.45	15.18	1.35
黄壤	5.42	25.92	36.95	0.95	0.47	13.67	0.42
红壤	5.86	7.96	11.34	0.95	0.38	14.75	0.26
紫色土	6.43±0.06	37.6±0.17	21.29±0.32	1.41±0.03	0.80±0.15	16.17±0.21	0.36±0.014
碱性石灰土	7.68±0.07	32.3±0.04	19.33±0.11	1.38±0.02	0.89±0.06	21.98±0.17	0.28±0.022
CV/%	12.3	42.5	37.1	43.9	44.5	30.5	58.9

内进行。盆栽试验前,将所采集的土壤风干后过2 mm筛,以Cd的盐溶液[Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]形式添加到每种土壤中混匀。每种土壤分别设置添加Cd盐的对照组(CK)和4个浓度梯度组,即T1、T2、T3和T4,每个处理设置3个重复,共90组处理。土壤总Cd经HF-HClO<sub>4</sub>-HCl-HNO<sub>3</sub>消解后最终测定结果见表2。人工添加重金属Cd盐后,土壤维持60%~70%的田间持水量,在相同的情况下老化3个月。老化完成后,分别称取6.0 kg土样装入直径为30 cm、高25 cm的PVC塑料花盆。为保证作物正常生长,播种前所有处理施用1.584 g氯化钾、2.143 g尿素、1.917 g磷酸二氢钾作为底肥与土壤混匀。播种时撒入3~4颗白菜种子,待作物出苗,长势良好后,每盆只留一株。待白菜成熟后,将其叶片先用自来水清洗表面附着的泥土,再用去离子水和超纯水冲洗3遍,放置烘箱中105℃杀青20 min,后改为65℃烘至恒质量。

### 1.3 土壤有效态Cd测定

为研究不同浸提剂提取的土壤有效态Cd含量与白菜Cd含量的相关性,推导基于有效量指标的风险管控标准,本研究选用广泛使用的0.43 mol·L<sup>-1</sup> HNO<sub>3</sub>提取态<sup>[15]</sup>(总化学反应活性库)和0.01 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>提取态(直接有效库)表征土壤中Cd的生物有效性。具

体操作方法参考Houba等<sup>[18-19]</sup>的研究。

### 1.4 作物可食部分重金属Cd测定

将烘干的白菜用不锈钢植物粉碎机粉碎,再用10 mL浓硝酸(优级纯)和3 mL双氧水(优级纯)在150℃消化2 h,同时做试剂空白。消解和测定过程中插入5%的成分分析标准物质(甘兰,GSB-5)和10%的样品重复进行实验室质量控制。消化稀释液中重金属浓度用ICP-MS(America ThermoFisher, ICAP Qc)测定。

### 1.5 数据分析与处理

采用Excel 2013和SPSS 19.0进行数据统计分析,采用Origin Pro 2017制图。对重金属Cd的土壤-作物迁移预测模型(一元线性和多元逐步回归模型)进行数据分析:

$$\lg[\text{Cabbage-Cd}] = a \times \lg[\text{Soil-Cd}] + k \quad (1)$$

$$\lg[\text{Cabbage-Cd}] = a \times \lg[\text{Soil-Cd}] + b \times [\text{pH}] + c \times \lg[X_i] + k \quad (2)$$

式中:[Cabbage-Cd]为白菜可食部分Cd含量,mg·kg<sup>-1</sup>;[Soil-Cd]为土壤中总Cd或各有效态Cd含量,mg·kg<sup>-1</sup>;[X<sub>i</sub>]为土壤中有有机质或CEC等;k、a、b和c均为方程的回归系数。

为评价模型的预测精度,计算了平均绝对百分误

表2 供试土壤Cd盐添加后总Cd测定结果(mg·kg<sup>-1</sup>)Table 2 Total Cd contents after Cd addition in test soils(mg·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatments	酸性石灰土 Acid limestone soil	黄棕壤 Yellow brown soil	黄壤 Yellow soil	红壤 Red soil	紫色土 Purple soil	碱性石灰土 Alkaline limestone soil
CK	0.62	1.35	0.42	0.26	0.36	0.28
T1	0.71	1.62	0.51	0.31	0.44	0.39
T2	0.86	1.68	0.76	0.43	0.52	0.43
T3	0.96	1.91	0.83	0.77	0.73	0.75
T4	1.13	2.55	1.30	1.16	1.13	1.07

差(The mean absolute percentage error, MAPE)

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{[\text{Cd}]_i \text{实测值} - [\text{Cd}]_i \text{预测值}}{[\text{Cd}]_i \text{实测值}}} \quad (3)$$

式中:[Cd]<sub>i</sub>实测值为第*i*(1~30)个Cd处理土壤上作物白菜可食部分中Cd的实测含量,mg·kg<sup>-1</sup>;[Cd]<sub>i</sub>预测值为公式(1)或公式(2)的预测含量,mg·kg<sup>-1</sup>;n为模型数据量。MAPE越小表示模型的预测性越好。

## 1.6 风险筛选值与风险管制值的推导

种植白菜土壤总Cd及有效态Cd的风险筛选值与风险管制值的推导过程(图1):依据《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)规定的白菜Cd限量(0.2 mg·kg<sup>-1</sup>,鲜质量),利用土壤-白菜迁移模型的50%置信度模型预测线、95%预测上限和95%预测下限进行反推,分别得到白菜安全种植的贵州农用地土壤Cd风险筛选值(RSVs50和RSVs95)和风险管制值(RIVs95)。本研究中推导的风险筛选值是指土壤中污染物含量低于该值(RSVs50或RSVs95)的部分,白菜不符合食品质量安全标准等风险可以忽略;风险管制值(RIVs95)是指土壤中污染物含量超过该值的部分,白菜不符合食品质量安全标准等土壤污染风险的概率为95%,此时该土壤不适合种植该品种白菜。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤有效态Cd与总Cd的关系

简单线性分析发现,两种提取态Cd均能与土壤总Cd之间建立极显著的相关关系(Eq.1和Eq.2),且

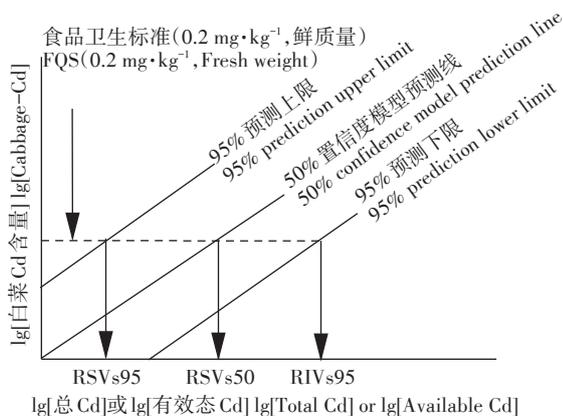


图1 基于作物白菜的土壤总Cd及有效态Cd的风险筛选值与风险管制值的推导示意图

Figure 1 Derivation of RSVs and RIVs based on total Cd and available Cd of soil

与0.43 mol·L<sup>-1</sup> HNO<sub>3</sub>提取态的相关性优于0.01 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>提取态( $R^2=0.964>0.865$ ),这与其他研究一致<sup>[13]</sup>。0.43 mol·L<sup>-1</sup> HNO<sub>3</sub>提取态重金属能够有效排除与生物有效性不相关的重金属形态(惰性态),且其操作快捷,因此在土壤污染风险评价中,可以考虑将0.43 mol·L<sup>-1</sup> HNO<sub>3</sub>提取态作为重要的评价手段。

$$[\text{HNO}_3\text{-Cd}] = 0.726 \times [\text{Total-Cd}] - 0.069 \quad R^2 = 0.964, \text{MAPE} = 0.075, P < 0.0001 \quad (\text{Eq.1})$$

$$[\text{CaCl}_2\text{-Cd}] = 0.047 \times [\text{Total-Cd}] - 0.016 \quad R^2 = 0.865, \text{MAPE} = 0.009, P < 0.0001 \quad (\text{Eq.2})$$

### 2.2 白菜对Cd的富集特征

人工添加Cd处理土壤上白菜可食部分的Cd含量见图2。白菜可食部分Cd含量分布范围为0.014~1.46 mg·kg<sup>-1</sup>,平均值为0.24 mg·kg<sup>-1</sup>(鲜质量)。人工添加Cd处理的土壤上有9个土壤对应的白菜可食部分Cd含量超标(0.2 mg·kg<sup>-1</sup>,鲜质量)。所有土壤( $n=30$ )中总Cd的超标率( $>0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )为97%,而白菜可食部分Cd的超标率为25%。在碱性石灰土(pH=7.68)上,土壤中总Cd超标( $1.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} > \text{RSVs}$ ,  $0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),但白菜总Cd并没有超标,说明土壤虽然超过国家规定的风险筛选值,但作物不一定超标。为确定农产品是否存在超标风险,需要通过食用农产品协同调查方法。

### 2.3 土壤-白菜Cd迁移预测模型的推导及影响因素

本研究采用一元线性回归分析建立白菜可食部分Cd含量与土壤总Cd和两种有效态Cd的土壤-作

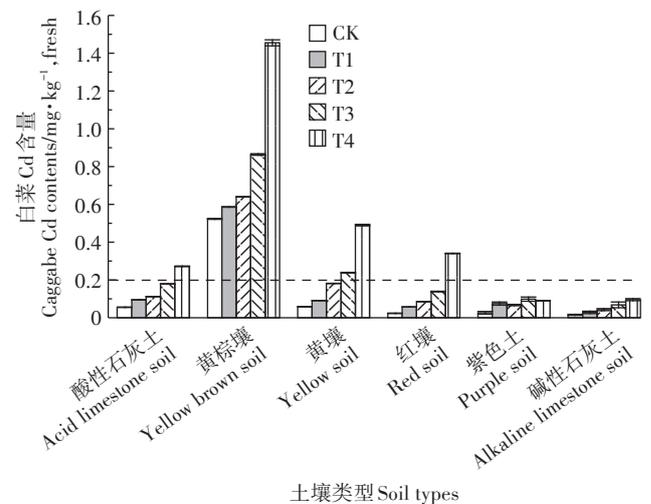


图2 不同Cd处理下白菜可食部分Cd含量( $n=30$ )

Figure 2 Cd concentration in the edible part of the cabbage under different Cd treatments( $n=30$ )

物迁移模型。土壤总Cd和各提取态Cd含量分别表示为Total-Cd、HNO<sub>3</sub>-Cd和CaCl<sub>2</sub>-Cd。如表3所示,白菜可食部分中的Cd含量与土壤中Total-Cd、HNO<sub>3</sub>-Cd和CaCl<sub>2</sub>-Cd含量均呈显著正相关( $R^2$ 分别为0.857、0.712和0.693)。各回归方程的平均绝对百分误差均较小(MAPE分别为0.18、0.26和0.18)。MAPE越小代表模型的预测能力越好。一般认为,对数转换能够保证数据的方差齐性,确保变异的一致性<sup>[20]</sup>。Ding等<sup>[21]</sup>对全国21种土壤上胡萝卜可食部分Cd含量与土壤中Cd含量进行线性拟合得到显著正相关关系( $R^2=0.32, P<0.001$ ),经对数转换后,两者相关性更好( $R^2=0.61, P<0.001$ )。

为进一步提高迁移模型的预测效果,本研究考虑了土壤理化性质对白菜富集土壤Cd的影响,并建立多元逐步回归模型。白菜可食部分Cd含量与土壤理化性质(如土壤pH、OM、CEC以及土壤Zn含量等)相关性分析表明,白菜可食部分Cd含量只与土壤pH之间存在显著的相关性( $r=-0.62, P<0.05$ ),与土壤有机质含量之间虽然不存在显著的相关关系( $F=0.007, P>0.93$ ),但与生物富集系数(BCFs)之间存在显著的相关关系( $r=0.39, F=10.17, P<0.05$ ),表明土壤有机质没有直接影响到Cd的生物有效性,但可能会影响到土壤溶液中溶解态Cd的活性而间接影响其生物有效

性<sup>[22]</sup>。多元回归分析结果表明(Eq.4和Eq.6),考虑土壤pH因素后,基于土壤总Cd和HNO<sub>3</sub>-Cd模型的预测效果得到了进一步提高(如HNO<sub>3</sub>-Cd,  $R^2$ 从0.712提高到0.919, MAPE从0.26降低到0.14),表明土壤pH是影响Cd生物有效性的最主要的因子。相关研究表明<sup>[12,23-25]</sup>,土壤pH是影响各种重金属吸附与解吸的重要因素,当土壤pH升高时,土壤中重金属的吸附量会随之增加,从而使土壤溶液中重金属的含量减少。这与本研究中土壤pH与白菜可食部分Cd含量呈负相关结果一致。

#### 2.4 种植白菜土壤Cd风险筛选值与风险管制值

依据Eq.3~Eq.7,由食品中Cd限量标准反推得到贵州省种植白菜土壤Cd的风险筛选值与风险管制值,结果见表4。土壤pH在5.5~8.0,基于Total-Cd的RSVs50(0.80~1.70 mg·kg<sup>-1</sup>)和RIVs95(2.80~8.40 mg·kg<sup>-1</sup>)分别高于现行的风险筛选值(0.3~0.6 mg·kg<sup>-1</sup>)和风险管制值(1.5~4.0 mg·kg<sup>-1</sup>),而RSVs95较接近现行的风险筛选值(图3)。HNO<sub>3</sub>-Cd的RSVs95、RSVs50和RIVs95随pH的升高分别从0.08、0.31、1.90 mg·kg<sup>-1</sup>增至0.27、2.00、28.50 mg·kg<sup>-1</sup>。CaCl<sub>2</sub>-Cd的模型对pH不敏感,RSVs95、RSVs50和RIVs95分别为0.02、0.08、0.09 mg·kg<sup>-1</sup>。现行和本研究得到的土壤Cd风险管控标准能否保护贵州省白菜安全生产,还

表3 人工污染盆栽试验土壤-白菜Cd迁移模型( $n=30$ )

Table 3 Regression equations for predicting Cd transfer from soil to cabbage( $n=30$ )

预测回归模型 Predictive regression model	拟合优度 $R^2$	平均绝对百分误差 MAPE	序号 No.
$\lg[\text{Cabbage-Cd}] = 1.7624 \times \lg[\text{Total-Cd}] + 0.629$	0.857	0.18	Eq.3
$\lg[\text{Cabbage-Cd}] = 1.599 \times \lg[\text{Total-Cd}] - 0.209 \times \text{pH} + 1.904$	0.944	0.12	Eq.4
$\lg[\text{Cabbage-Cd}] = 1.231 \times \lg[\text{HNO}_3\text{-Cd}] + 0.840$	0.712	0.26	Eq.5
$\lg[\text{Cabbage-Cd}] = 1.161 \times \lg[\text{HNO}_3\text{-Cd}] - 0.313 \times \text{pH} + 2.754$	0.919	0.14	Eq.6
$\lg[\text{Cabbage-Cd}] = 0.483 \times \lg[\text{CaCl}_2\text{-Cd}] + 1.136$	0.693	0.18	Eq.7

表4 基于作物白菜的贵州省农用地土壤Cd风险筛选值与风险管制值

Table 4 RSVs and RIVs for Cd based on cabbage in Guizhou agricultural land

模型 Model	pH	Total-Cd			0.43 mol·L <sup>-1</sup> HNO <sub>3</sub> -Cd			0.01 mol·L <sup>-1</sup> CaCl <sub>2</sub> -Cd		
		RSVs95	RSVs50	RIVs95	RSVs95	RSVs50	RIVs95	RSVs95	RSVs50	RIVs95
多元模型	5.5	0.30	0.80	2.80	0.08	0.31	1.90	—	—	—
	6.0	0.33	0.93	3.40	0.12	0.58	4.70			
	6.5	0.36	1.08	4.30	0.15	0.78	7.30			
	7.0	0.40	1.26	5.40	0.18	1.08	11.50			
	7.5	0.43	1.47	6.80	0.22	1.48	18.30			
	8.0	0.48	1.70	8.40	0.27	2.00	28.50			
一元模型		0.89	0.96	1.09	0.56	0.64	0.80	0.02	0.08	0.09



对点野外田间数据进行验证,在当前研究中标准适宜性验证数据有限,接下来还需要扩大数据量进一步研究。本研究仅考虑了贵州省当地普遍种植的白菜(优选极早快菜)品种,未考虑不同品种白菜的生物富集差异,因此在接下来的研究中需要综合考虑这些因素以确定更合理的土壤Cd风险管控标准。

### 3 结论

(1)野外田间数据和文献数据验证结果表明,现行风险管控标准中风险筛选值与风险管制值偏保守。

(2)本研究推导基于土壤总Cd与有效态Cd的筛选值(RSVs50)合适率。综合土壤分析操作快捷性和作物依附性,建议进一步开展基于有效态和特定作物土壤污染风险管控标准的研究,制定地方土壤环境标准。

#### 参考文献:

- [1] 骆永明, 滕应. 我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 145-152.  
LUO Yong-ming, TENG Ying. Regional differences in soil pollution and strategy of soil zonal governance and remediation in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 145-152.
- [2] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.  
China Environmental Monitoring Station. Background value of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [3] Wang G, Su M Y, Chen Y H, et al. Transfer characteristics of cadmium and lead from soil to the edible parts of six vegetable species in south-eastern China[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(1): 127-135.
- [4] Bi X, Feng X, Yang Y, et al. Environmental contamination of heavy metals from zinc smelting areas in Hezhang County, western Guizhou, China[J]. *Environment International*, 2006, 32(7): 883-890.
- [5] Ax E, Lampa E, Lind L, et al. Circulating levels of environmental contaminants are associated with dietary patterns in older adults[J]. *Toxicology Letters*, 2015, 75(3): 93-102.
- [6] 张红振, 骆永明, 章海波, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究 V. 镉在土壤-作物系统中的富集规律与农产品质量安全[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 628-638.  
ZHANG Hong-zhen, LUO Yong-ming, ZHANG Hai-bo, et al. Study on soil environmental quality guidelines and standards V. Modeling of cadmium uptake in soil-crop systems for human food safety in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4): 628-638.
- [7] He P, Lu Y, Liang Y, et al. Exposure assessment of dietary cadmium: Findings from Shanghainese over 40 years, China[J]. *BMC Public Health*, 2013, 13(1): 590.
- [8] McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micronutrients - food safety issues[J]. *Field Crops Research*, 1999, 60(1/2): 143-163.
- [9] Römken P F A M, Guo H Y, Chu C L, et al. Prediction of cadmium uptake by brown rice and derivation of soil-plant transfer models to improve soil protection guidelines[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(8): 2435-2444.
- [10] Franz E, Römken P, Van R L, et al. A chain modeling approach to estimate the impact of soil cadmium pollution on human dietary exposure[J]. *Journal of Food Protection*, 2008, 71(12): 2504-2513.
- [11] Rodrigues S M, Pereira E, Duarte A C, et al. Derivation of soil to plant transfer functions for metals and metalloids: Impact of contaminant's availability[J]. *Plant and Soil*, 2012, 361(1/2): 329-341.
- [12] 高慧, 宋静, 吕明超, 等. DGT和化学提取法评价贵州赫章土法炼锌区污染土壤中镉的植物吸收有效性[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 1992-1999.  
GAO Hui, SONG Jing, LÜ Ming-chao, et al. Evaluation of cadmium phytoavailability in soils from a zinc smelting area in Hezhang County, Guizhou Province, using diffusive gradients in thin films and conventional chemical extractions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10): 1992-1999.
- [13] 张厦, 宋静, 高慧, 等. 回归模型法推导油菜田土壤Cd限值的不确定性[J]. 环境科学研究, 2016, 29(8): 1170-1179.  
ZHANG Sha, SONG Jing, GAO Hui, et al. Uncertainties of soil-crop transfer models for deriving critical values of Cd in rape planting soils [J]. *Research of Environmental Science*, 2016, 29(8): 1170-1179.
- [14] Brus D J, Li Z, Song J, et al. Predictions of spatially averaged cadmium contents in rice grains in the Fuyang Valley, P.R. China[J]. *Journal of Environment Quality*, 2009, 38(3): 1126-1136.
- [15] Groenenberg J E, Römken P F A M, Zomeren, André Van, et al. Evaluation of the single dilute (0.43 M) nitric acid extraction to determine geochemically reactive elements in soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(4): 2246-2253.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.  
LU Ru-kun. Analytical methods of soil agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [17] 刘仙娜, 冷家峰, 邓保军. 石墨炉原子吸收分光光度法测定土壤中的镉[J]. 化学分析计量, 2002, 11(5): 26-27.  
LIU Xian-na, LENG Jia-feng, DENG Bao-jun. Determination of cadmium in the soil by Graphite furnace atomic absorption spectrophotometry[J]. *Chemical Analysis and Meterage*, 2002, 11(5): 26-27.
- [18] Houba V J G, Novozamsky I, Lee J J V D. Soil testing and plant analysis in Western Europe[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1992, 23(17-20): 2029-2051.
- [19] Houba V J G, Temminghoff E J M, Gaikhorst G A, et al. Soil analysis procedures using 0.01 M calcium chloride as extraction reagent[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2000, 31(9/10): 1299-1396.
- [20] Römken P F, Brus D J, Guo H Y, et al. Impact of model uncertainty on soil quality standards for cadmium in rice paddy fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(17): 3098-3105.
- [21] Ding C F, Zhang T, Wang X, et al. Prediction model for cadmium transfer from soil to carrot (*Daucus carota* L.) and its application to derive soil thresholds for food safety[J]. *Journal of Agricultural and*

- Food Chemistry*, 2013, 61(43):10273-10282.
- [22] Zhang S, Song J, Chen Y W, et al. Derivation of regional risk screening values and intervention values for cadmium-contaminated agricultural land in the Guizhou plateau[J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(8):2366-2377.
- [23] 胡宁静, 骆永明, 宋 静. 长江三角洲地区典型土壤对镉的吸附及其与有机质、pH 和温度的关系[J]. *土壤学报*, 2010, 44(2):437-443.
- HU Ning-jing, LUO Yong-ming, SONG Jing. Influence of soil organic matter, pH and temperature on Cd sorption by four soils from Yangtze River delta[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 44(2):437-443.
- [24] Pan Y Y, Koopmans G F, Bonten L T C, et al. Influence of pH on the redox chemistry of metal (hydr) oxides and organic matter in paddy soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(10):1713-1726.
- [25] 李志博, 骆永明, 宋 静. 基于稻米摄入风险的稻田土壤镉临界值研究:个案研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(1):76-81.
- LI Zhi-bo, LUO Yong-ming, SONG Jing. Critical values for Cd in paddy field based on Cd risk of rice consumption: A case study[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1):76-81.
- [26] Römkens P F, Guo H Y, Chu C L, et al. Prediction of cadmium uptake by brown rice and derivation of soil-plant transfer models to improve soil protection guidelines[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(8/9):2435-2444.
- [27] 周 涛. 贵阳市城郊菜地土壤重金属污染状况及其对蔬菜安全的影响评价[D]. 贵阳:贵州大学, 2006.
- ZHOU Tao. Present situation and evaluation of heavy metal pollution of vegetable garden soils and vegetables in Guiyang City suburbs[D]. Guiyang: Guizhou University, 2006.
- [28] 罗 美. 贵阳市郊区菜地土壤蔬菜系统中镉污染分析及调控研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2008.
- LUO Mei. Analysis and regulation cadmium pollution of soil-vegetables system in suburb Guiyang[D]. Guiyang: Guizhou University, 2008.