

doi: 10.12029/gc20220302

刘才泽, 王永华, 赵禁, 曾琴琴, 雷风华. 2022. 川东北地区水稻镉积累与生态健康风险评价[J]. 中国地质, 49(3): 695–705.

Liu Caize, Wang Yonghua, Zhao Jin, Zeng Qinqin, Lei Fenghua. 2022. Assessment of cadmium accumulation in rice and risk on human health in the northeast Sichuan Province[J]. Geology in China, 49(3): 695–705(in Chinese with English abstract).

## 川东北地区水稻镉积累与生态健康风险评价

刘才泽<sup>1</sup>, 王永华<sup>1</sup>, 赵禁<sup>2</sup>, 曾琴琴<sup>1</sup>, 雷风华<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 四川省地质调查院, 四川 成都 610081)

**摘要:**【研究目的】重金属镉主要通过“土壤-植物”系统进入食物链进而影响人体健康, 开展农作物镉积累研究对保障人类健康安全具有重要意义。【研究方法】系统采集了四川省东北部南充市、巴中市、广安市等地的土壤及水稻样品, 采用 ICP-MS 方法检测了土壤和水稻中的镉含量, 并运用 CART 决策树和相关系数法进行了数据分析。【研究结果】结果显示, 川东北地区表层土壤镉含量相对较低, 为 0.071 ~ 0.92 mg/kg, 平均 0.254 mg/kg, 几乎所有 (99.9%) 样品镉含量都低于标准限值; 水稻 (糙米) 镉含量差异性较大, 为 0.002 ~ 0.803 mg/kg, 平均 0.076 mg/kg, 超标率达 14.0%; 水稻镉超标区成人每日通过稻谷摄入的镉达 90.4 μg/d, 已超过允许摄入量标准 60 μg/d。【结论】土壤镉不超标而农作物镉超标的现象可能与土壤的低 pH、低 CaO、高 SiO<sub>2</sub> 等特点有关, 这一认识对于指导区域内粮食安全生产具有重要指导意义。

**关键词:** 镉; 土壤-水稻系统; 健康风险; 决策树; 农业地球化学调查工程; 川东北

**创新点:** 土壤和水稻综合调查发现土壤镉不超标但农作物超标的现象, CART 和相关系数法分析了其原因。

中图分类号: TS210.7; X836 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)03-0695-11

## Assessment of cadmium accumulation in rice and risk on human health in the northeast Sichuan Province

LIU Caize<sup>1</sup>, WANG Yonghua<sup>1</sup>, ZHAO Jin<sup>2</sup>, ZENG Qinqin<sup>1</sup>, LEI Fenghua<sup>1</sup>

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. Sichuan Institute of Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China)

**Abstract:** This paper is the result of agricultural geochemical survey engineering.

**[Objective]** As a heavy metal, cadmium (Cd) mainly enters the food chain through the "soil = plant" system and affects human health. It is great significant to study the accumulation of cadmium in crops to ensure human health and safety. **[Methods]** Soil and rice samples from Nanchong, Bazhong and Guang'an in the northeast Sichuan were collected. The cadmium content in soil and rice was analyzed by ICP=MS, and the data were statistically analyzed by CART decision tree and correlation coefficient methods. **[Results]** The research shows that the cadmium content of the soil in the northeast Sichuan is relatively low, ranging from 0.071 to 0.92 mg/kg and with an average value of 0.254 mg/kg. The cadmium content of almost all (99.9%) soil samples is below

收稿日期: 2020-03-23; 改回日期: 2022-05-10

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20221733、DD20190524、DD20160314) 资助。

作者简介: 刘才泽, 男, 1976 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事地球化学调查与研究; E-mail: liucaize@163.com。

the safety threshold. In contrast, the cadmium content of the rice (brown rice) varies from 0.002 to 0.803 mg/kg and with an average value of 0.076 mg/kg, 14.0% of which is above the safety threshold. The daily cadmium intake of adults reaches 90.4  $\mu\text{g}/\text{d}$  in the region with excessive cadmium in rice, exceeding the permissible cadmium intake of 60  $\mu\text{g}/\text{d}$ . **[Conclusions]** The phenomenon that cadmium content does not exceed the safety threshold in soil but it does in rice may be related to the characteristics of low pH, low CaO and high  $\text{SiO}_2$  of the soil. This recognition is great significance for guiding grain production in this region.

**Key words:** cadmium; soil-rice system; health risk; decision tree; agricultural geochemical survey engineering; Northeast Sichuan Province

**Highlights:** By the comprehensive survey of soil and rice, it was found that cadmium content does not exceed the safety threshold in soil but it does in crop, and the CART and correlation coefficient methods were used to analyze the reasons.

**About the first author:** LIU Caize, male, born in 1976, doctor, senior engineer, mainly engaged in geochemical survey and research; E-mail: liucaize@163.com.

**Fund support:** Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20221733, No.DD20190524, No.DD20160314).

## 1 引 言

自从日本富山县发现镉污染可能是“痛痛病”病因以来,镉的毒性就引发了人们的广泛关注(Friberg et al., 1974; 赵伯阳, 1983; 王克跃等, 1994; 程金金等, 2013)。镉主要通过“土壤-植物”系统进入食物链(Fergusson, 1990), 从而影响人体健康。因此, 学者们对“土壤-水稻”系统中镉的运移规律进行了大量研究(Asami, 1984; 成杭新等, 2012; 潘杨等, 2015; Zhou et al., 2018; Khaliq et al., 2019; 王亚婷等, 2020)。但这些研究主要聚焦于土壤污染区, 对土壤镉含量相对低的地区关注较少。

在有关农作物对土壤镉的吸收评价中, 多数学者采用线性模型进行拟合(吴启堂等, 1994; 金立新等, 2008; Römkens et al., 2011; 唐豆豆等, 2018; 熊婕等, 2019)。其中, 以弗兰德利希模型(Freundlich-Type Model)最为经典。然而, 植物对土壤重金属的吸收往往是一个非线性的过程(Li et al., 2004; Wang et al., 2018; Yang et al., 2020)。在机器学习的时代, 学者们开始选择非线性模型开展农作物金属含量的吸收预测研究(Zhang et al., 2008; Wang et al., 2018; 王院民等, 2019; Yang et al., 2020)。

综合1:20万水系沉积物测量结果显示, 四川盆地内镉背景值低于盆地周缘山区(王永华, 2019)。本文以盆地东北部为研究区, 开展土壤含量相对较低地区的水稻镉预测和健康风险评价。

## 2 研究区概述

研究区位于四川盆地东北部, 地理坐标:  $30^{\circ}7' \sim$

$32^{\circ}3' \text{N}$ ,  $105^{\circ}26' \sim 107^{\circ}45' \text{E}$ , 面积约17901  $\text{km}^2$ , 涉及南充市、广安市和巴中市下辖的13个区县(图1)。研究区地势北高南低, 北部以低山为主, 南部则以浅丘为主。属典型的亚热带湿润季风性气候, 四季分明。年平均气温 $17^{\circ}\text{C}$ 左右, 年平均降水量1100 mm左右。无霜期290~320 d, 日照时数年均1200~1500 h。

研究区是“四川红层”的组成部分, 主要出露侏罗纪-白垩纪地层。沙溪庙组( $J_2s$ )为紫红、紫灰色长石石英砂岩与粉砂岩、泥岩不等厚互层; 遂宁组( $J_3sn$ )以砖红色泥(页)岩为主, 夹粉砂岩、岩屑长石砂岩; 蓬莱镇组( $J_3p$ )为灰紫色长石石英砂岩、粉砂岩、泥岩不等厚互层; 苍溪组( $K_1cx$ )为砖红、紫灰色长石岩屑砂岩与黏土、粉砂岩不等厚互层; 白龙组( $K_1b$ )为灰紫、黄灰色细粒长石石英砂岩夹黏土岩、粉砂岩; 七曲寺组( $K_1q$ )为灰紫、紫红色厚-块状细粒长石石英砂岩与泥岩、粉砂岩互层(张建东等, 2015)。

土壤类型以紫色土为主, 占研究区面积的76.48%; 其次为水稻土, 占21.94%; 少量黄壤和新积土。土地利用类型主要分为水田、旱地、乔木林地、灌木林地、其他林地、草地、城镇住宅用地、水域等几类。

## 3 材料与方 法

### 3.1 样品采集

根据行业标准《多目标区域地球化学调查规范(1:250000)》(DZ/T0258-2014), 网格化采集研究区内土壤样品, 基本采样密度为1个点/ $\text{km}^2$ , 采样深度为0~20 cm, 3~5点混合, 共采集表层土壤样品18533

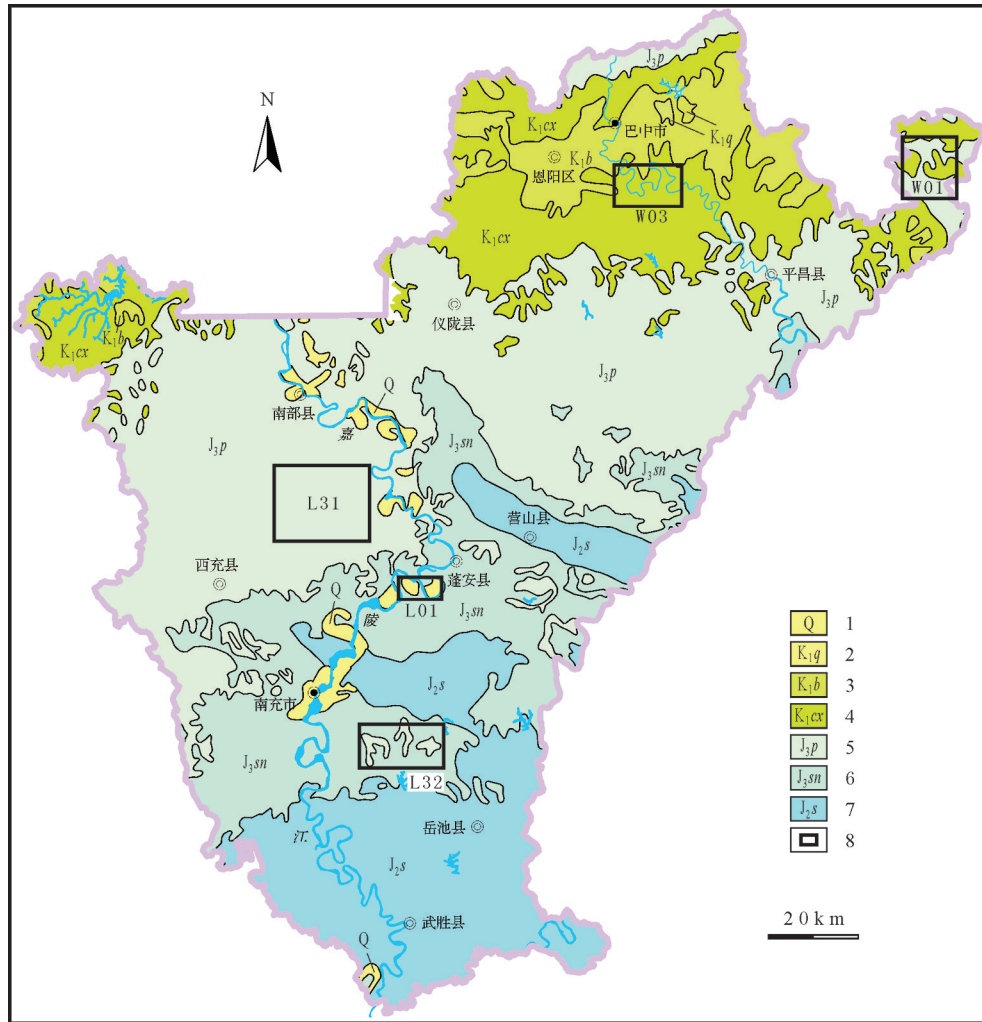


图1 研究区地质简图

1—第四系;2—下白垩系统七曲寺组;3—白龙组;4—苍溪组;5—上侏罗统蓬莱镇组;6—遂宁组;7—中侏罗统沙溪庙组;8—水稻样品采样区: W01—平昌县界牌—笔山;W03—巴州区梁永—金碑;L01—蓬安县三坝—马回;L31—南部县铁佛塘—八尔湖;L32—岳池县黄龙及邻区

Fig.1 Geological sketch map of the study area

1—Quaternary; 2—Qiqusi Formation of Lower Cretaceous; 3—Bailong Formation; 4—Cangxi Formation; 5—Penglaizhen Formation of Upper Jurassic; 6—Suining Formation; 7—Shaximiao Formation of Middle Jurassic; 8—Rice sampling area: W01—Jiepai—Bishan, Pingchang; W03—Liangyong—Jinbei, Bazhou; L01—Sanba—Mashui, Peng'an; L31—Tiefutang—Ba'erhu, Nanbu; L32—Huanglong, Yuechi, and its adjacent areas

件。原始样品干燥后用尼龙筛截取-0.8 mm(20目)粒级的样品,表层土壤样按每4 km<sup>2</sup>等重量组合成1件分析样品,共组合分析样品4629件(表1)。

同时完成平昌县界牌—笔山(W01)、巴州区梁永—金碑(W03)、蓬安县三坝—马回(L01)、南部县

铁佛塘—八尔湖(L31)、岳池县黄龙及邻区(L32)等5个典型区的水稻样品采集(图1)。样品采集过程中,选择种植面积大、成规模的、有一定种植年限的地块。以0.1~0.2 hm<sup>2</sup>为采样单元,在采样单元内选取10~20颗植株,采集稻穗,混合成样。共采集水稻

表1 研究区土壤镉统计参数(mg/kg)

Table 1 Statistical parameters of soil cadmium in study area (mg/kg)

元素	样品数	含量值范围	平均值	标准差	变异系数	其他地区背景值			
						全国	成都	渝东南	乌蒙山
Cd	4629	0.071~0.92	0.254	0.051	0.201	0.097 <sup>(1)</sup>	0.25 <sup>(2)</sup>	0.37 <sup>(3)</sup>	0.55 <sup>(4)</sup>

注:(1)~(4)分别来源于中国环境监测总站(1990)、陈德友等(2006)、王永华等(2019)、成杭新等(2019)。

样品 171 件(表 2, 图 2)。

### 3.2 样品分析测试

样品经四川省地质矿产勘查开发局成都综合岩矿测试中心分析测试。土壤样品烘干后混匀,并粉碎至 0.074 mm(-200 目)。土壤 Cd 采用 ICP-MS 分析,分析测试质量控制遵循行业标准(DZ/T0258—2014)的有关要求,检出限为 0.03 mg/kg,报出率为 100%,合格率 100%。同时分析的还有 CaO、pH、Ba 等 53 项指标。

水稻测试糙米 Cd 含量。稻谷用四分法分样,用砻谷机脱壳成糙米,先用清水冲洗干净,再用去离子水冲洗 3 遍,晾干,用专用粉碎机无污染加工至粒度(约 60 目)。糙米 Cd 同样采用 ICP-MS 方法分析,检出限为 0.0002 mg/kg,报出率为 100%,合格率 100%。

### 3.3 数学模型及方法

决策树是机器学习中有监督的分类方法。与其他方法相比,决策树具有结构简单、直观、容易理解、有较高的分类精度等优点。CART 假设决策树是二叉树,内部节点属性的取值为“是”和“否”,左分支是取值为“是”的分支,右分支是取值为“否”的分支。CART 算法采用基尼系数来选择划分规则,数据集 D 的基尼系数定义为:

$$Gini(D) = \sum p_k(1-p_k) = \sum 1-p_k^2$$

其中:  $p_k$  表示样本属于第  $k$  类的概率。

基尼系数反映了从数据集 D 中随机抽取 2 个样本,2 个样本不同类的概率。因此基尼系数越小,则数据集 D 的纯度越高。就整个决策树而言,可以用属性(变量)引起的基尼系数减小的程度(Mean Decrease Gini)来评估属性(变量)的重要程度。

以 5 个水稻采样区作为模型区建立数学模型。实际操作中在统计软件平台中完成决策树分类及预测过程,分类回归基于 CRT 增长方式。目标变量

为稻谷镉是否超标,模型区镉超标则为 1,不超标则为 0,非模型区为空值;自变量为土壤样品所获得的 54 个元素(指标)。采用 10%交叉验证,最大决策树深度为 5 层,父节点中的最小样本数为 5,子节点中的最小样本数为 2。

## 4 结果与分析

### 4.1 土壤镉含量与环境评价

从表 1 可知,川东北地区土壤 Cd 含量为 0.071 ~ 0.92 mg/kg,平均为 0.254 mg/kg,与成都地区相当(0.25 mg/kg),高于全国土壤(A层)背景值(0.097 mg/kg)。但低于盆地周缘的渝东南地区(0.37 mg/kg)和乌蒙山区(0.55 mg/kg)(成杭新等,2019;王永华等,2019),与水系沉积物地球化学图展布相一致(王永华,2019)。变异系数不大( $<0.5$ ),为 0.201,表明表层土壤 Cd 分布相对均匀。

根据《土壤环境质量》(GB15618—2018)有关要求对研究区土壤镉进行评价。结果显示,川东北地区土壤镉污染风险总体较低。4625 件样品低于污染风险筛选值,占样品总数的 99.9%;4 件样品高于污染风险筛选值,但低于污染风险管控值,仅占样品总数的 0.1%;无超过污染风险管控值样品。

### 4.2 水稻镉含量与安全评价

水稻(糙米)镉含量为 0.002 ~ 0.803 mg/kg,平均 0.076 mg/kg。与土壤 Cd 变异系数较小不同,水稻 Cd 变异系数较大,为 1.779,说明水稻镉存在局部富集。总体上,水稻镉积集系数(水稻 Cd/土壤 Cd)不是很高,5 个典型区平均为 0.29。但典型区 L01 和 W01 偏高,分别为 1.91 和 1.02;W03 次之,为 0.50;L32 和 L31 最低,分别为 0.13 和 0.03(表 2)。

《食品安全国家标准》(GB2762—2017)中,稻谷(以糙米计)镉限量指标为 0.2 mg/kg。经评价,171

表 2 典型区水稻镉含量特征(mg/kg)

Table 2 Statistical parameters of rice cadmium in typical area (mg/kg)

典型区 代号*	样品数	水稻 Cd						土壤 Cd	水稻 Cd/ 土壤 Cd
		含量值范围	平均值	标准差	变异系数	超标数	超标率	平均值	土壤 Cd
W01	27	0.009 ~ 0.66	0.221	0.176	0.796	15	55.5 %	0.217	1.02
W03	30	0.007 ~ 0.67	0.116	0.135	1.116	5	16.7 %	0.230	0.50
L01	4	0.225 ~ 0.803	0.411	0.267	0.649	4	100 %	0.215	1.91
L31	78	0.002 ~ 0.055	0.01	0.009	0.85	0	0 %	0.299	0.03
L32	32	0.004 ~ 0.18	0.032	0.045	1.406	0	0 %	0.239	0.13
合计	171	0.002 ~ 0.803	0.076	0.135	1.779	24	14.0 %	0.261	0.29

注:\*列中的代号含义见图 1。

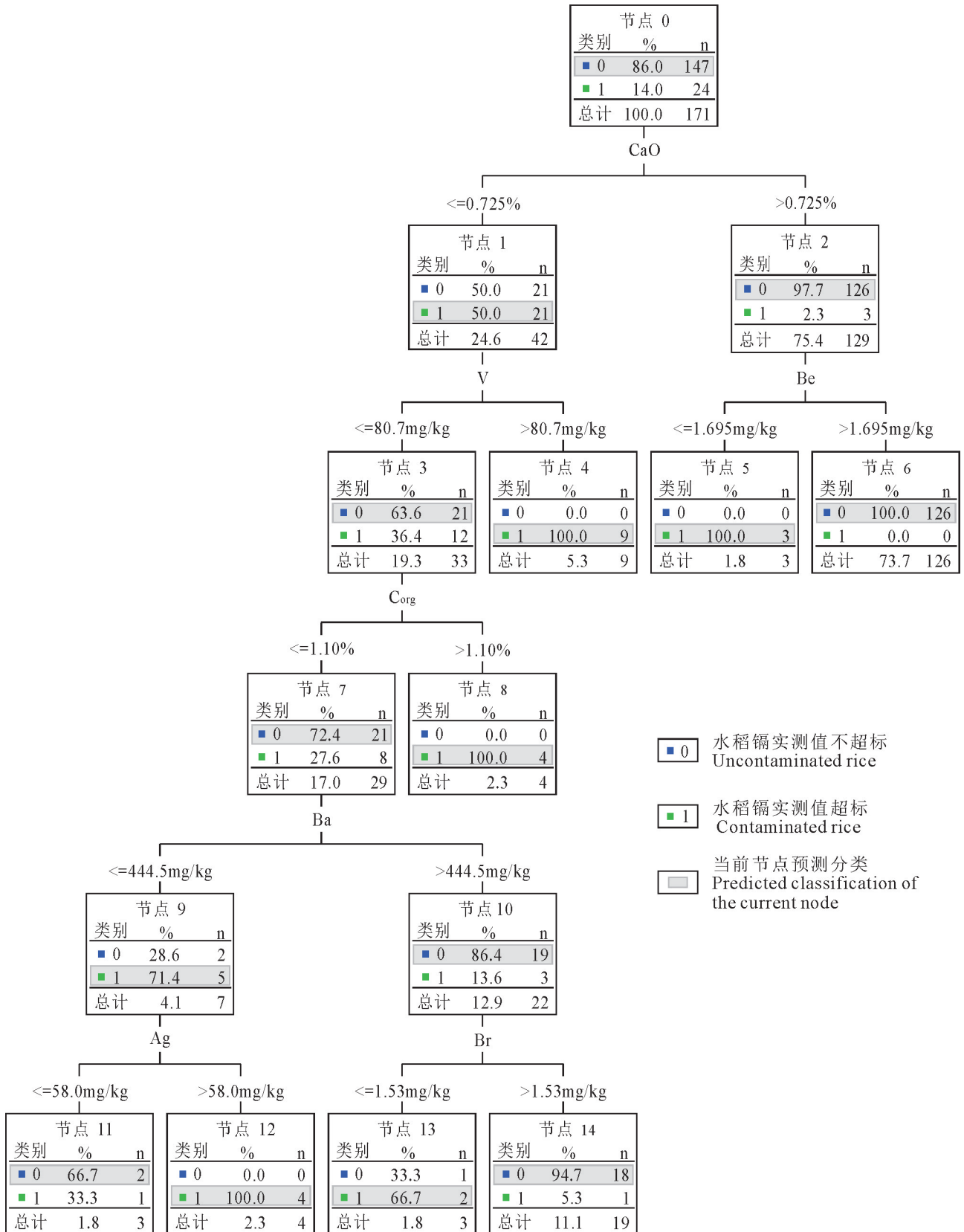


图2 研究区水稻镉的CART评价模型(自变量为土壤元素含量)  
Fig.2 CART assessment model of rice cadmium in study area(independent variables are elements in soil)

件水稻样品中,24件样品超过标准限值,超标率14.0%。其中W01超标15件,超标率55.5%;W03超标5件,超标率16.7%;L01超标4件,超标率100%;L31和L32水稻镉均不超标。该区存在土壤含量不超标而水稻含量超标的现象,与洞庭湖区、浙江富阳、辽河流域等地的研究结果相一致(余涛等,2008;李志博等,2008;Zhao et al.,2009;成杭新等,2012)。

#### 4.3 水稻镉吸收模型及预测

以5个水稻采样区为模型区,通过10%交叉验证的方式构建了CART决策树,分类结果如表3和图2所示。从表3中可知,模型对171件样品中168件进行了正确分类,包括不超标样品146件,超标样品22件,模型正确率高达98.2%。

将模型推广至整个研究区,评价结果显示,水

稻镉预测超标区主要集中在巴中市平昌县、巴州区、恩阳区,以及仪陇县东北部和南部县西北部;嘉陵江沿岸有零星分布;在广安市武胜县和岳池县,有一环(点)状分布(图3)。全区预测超标率达8.9%,略低于模型区。

## 5 讨论

### 5.1 水稻镉与土壤元素之间的关系

从图2中得知,最终参与分类的有CaO、V、Be、C<sub>org</sub>、Ba、Ag、Br等土壤元素(指标)。在决策树的第1层,当土壤CaO $\leq$ 0.725%时,水稻镉超标率达50%(节点1);而当土壤CaO $>$ 0.725%时,水稻镉超标率仅为2.3%(节点2)。在第4层,当土壤Ba $\leq$ 444.5mg/kg时,水稻镉超标率为71.4%(节点9);当土壤

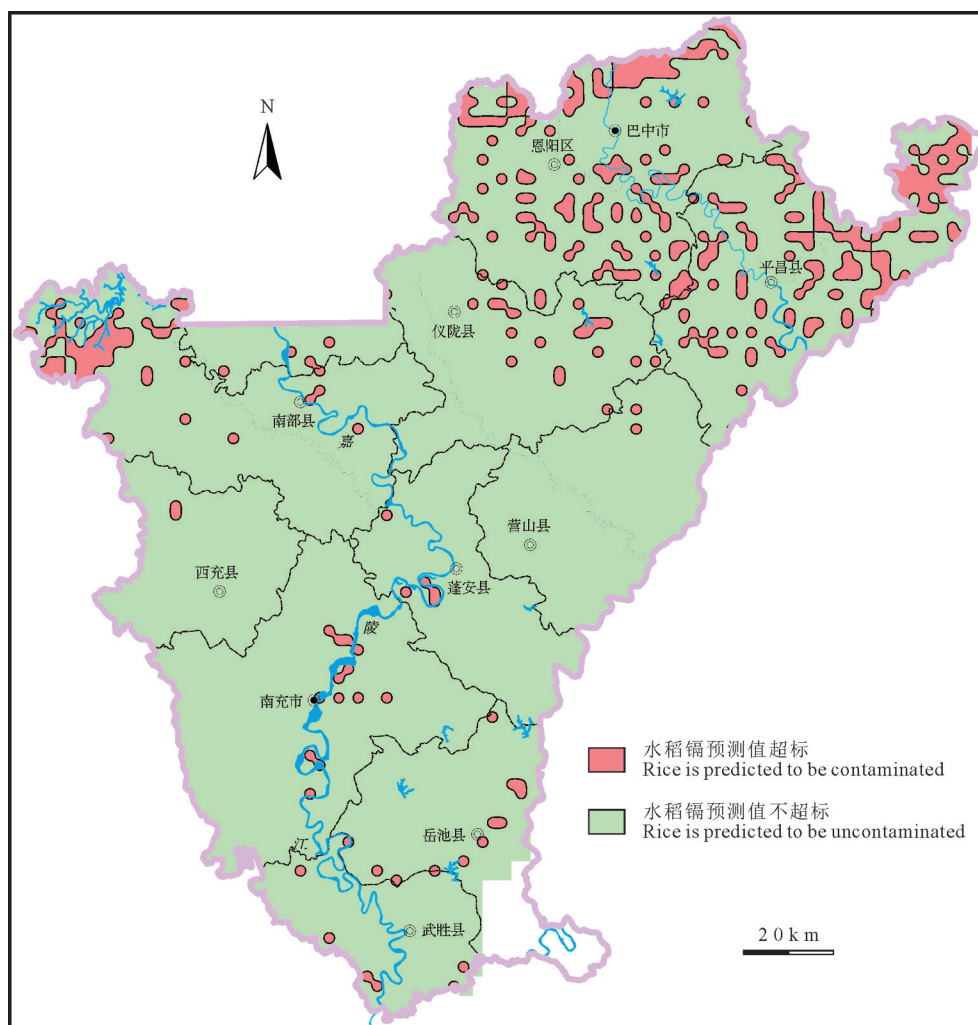


图3 研究区水稻镉预测评价图

Fig.3 Prediction of cadmium in rice in study area

表3 模型区CART分类结果

序号	实测样品		预测分类		
	分类	件数	不超标件数	超标件数	正确率
1	不超标	147	146	1	99.3%
2	超标	24	2	22	91.7%
总计		171	148	23	98.2%

Ba>444.5 mg/kg 时,水稻镉超标率 13.6% (节点 10)。由此可见,土壤中的CaO、Ba等元素含量与水稻镉是否超标具有重要的指示意义。

模型同时对各元素重要性进行了评价,重要性排序依次为Ba、Zr、CaO、pH、Sr、F、……。其中Zr、pH、Sr等并未最终入选决策树模型,是因为这些元素与入选的元素之间具有一定的相关性。在模型优选决策规则时,为其他元素所替代。这些土壤元素(指标)与水稻镉之间也具有显著的相关关系(表4),其重要性也是不容忽视的。

从决策树及其变量重要性评价结果来看,与水稻镉超标有关的主要元素大致可分为四大类:第一类为与土壤酸碱度有关的元素(指标),如CaO、pH等。该组元素(指标)与水稻镉的负相关关系最为显著。前人研究显示,土壤酸碱度是影响水稻镉累积的最重要因素之一(余涛等,2006;李志博等,2008;Zhao et al.,2009;成杭新等,2012)。酸性环境下,Cd以离子态( $Cd^{2+}$ )的形式运移和聚集,有利于农作物的吸收(Fergusson,1990;Alloway,2013)。第二类为高场强元素(如Zr),其与水稻镉含量呈显著正相关。高场强元素往往以高价态(如:+4价)形

式赋存于土壤中,根系表面的交换顺序次于正二价的 $Cd^{2+}$ (徐红宁等,1995;Alloway,2013),导致Cd优先进入植物根系和地上部分。第三类为大离子亲石元素组合,如Ba、Sr等。该组元素与高场强元素刚好相反,往往以低价态(如:+2价)形式赋存于土壤中,根系表面的交换顺序优于正二价的 $Cd^{2+}$ (徐红宁等,1995;Alloway,2013)。当浓度较大时,对土壤Cd的有效性具有抑制作用。第四类为与土壤有机质有关的元素组合(如 $C_{org}$ 、Br等),该组元素与水稻镉的相关关系不是很显著。

需要特别指出的是,土壤中Cd元素含量并未入选决策树模型。其与水稻Cd含量不是呈正相关关系,而是呈显著的负相关关系。正如Fergusson(1990)所总结的,与镉总量相比,土壤性质是决定生物有效性更为关键的因素。作为农作物积集度很高的Cd元素,其农作物含量最高可达土壤总量的10倍(Kabata-Pendias et al.,1984;Alloway,2013)。只要土壤酸碱度等有利于 $Cd^{2+}$ 的运移和吸收,农作物Cd就可能高度聚集,甚至远超土壤中的含量(余涛等,2006;李志博等,2008;Zhao et al.,2009;成杭新等,2012)。研究区内,当土pH<5.5时,农作物积集系数明显增大。如蓬安县三坝—马回地区(L01),土壤pH值为4.98~5.02,水稻积集系数达1.91。这种环境下,即使土壤Cd不超标,水稻Cd也容易超标。

## 5.2 水稻镉与成土母岩之间的关系

进一步分析可知,水稻Cd不仅与土壤微量元素有关,还与土壤宏量元素有关。除以上提到的CaO

表4 水稻镉与土壤重要微量元素和氧化物的相关关系

元素	水稻	土壤							
		Cd	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>
水稻	Cd	1	-0.79	-0.70	-0.68	-0.63	-0.48	-0.48	0.77
土壤	CaO	-0.79	1	0.69	0.60	0.26	0.42	-0.08	-0.85
	pH	-0.71	0.82	0.52	0.53	0.19	0.28	-0.10	-0.65
	Sr	-0.70	0.35	0.33	0.34	0.38	0.26	0.75	-0.39
	Ba	-0.66	0.18	0.30	0.36	0.50	0.37	0.49	-0.29
	Zr	0.66	-0.69	-0.73	-0.74	-0.49	-0.57	0.03	0.76
	F	-0.63	0.59	0.84	0.74	0.69	0.81	-0.08	-0.75
	Be	-0.61	0.46	0.80	0.80	0.86	0.87	0.13	-0.69
	Cd	-0.52	0.46	0.59	0.50	0.36	0.51	-0.02	-0.49
	V	-0.33	0.40	0.78	0.65	0.71	0.91	-0.21	-0.60
	Br	0.21	-0.18	-0.01	0.00	0.07	0.12	0.08	0.09
	$C_{org}$	-0.20	-0.09	0.05	0.00	0.12	0.12	0.03	-0.01
	Ag	0.11	-0.05	-0.06	-0.02	-0.02	-0.04	0.14	0.06

注:水稻Cd、土壤Cd、CaO取对数值,其余为实测值;水稻样品171件,土壤样品4629件;当相关系数绝对值>0.3时,其相关性具统计学意义。

外,与水稻镉相关的还有MgO、K<sub>2</sub>O、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O、SiO<sub>2</sub>等氧化物。其中SiO<sub>2</sub>含量与水稻中Cd含量呈显著的正相关关系,相关系数绝对值仅次于CaO,为-0.77(P<0.01)。其余均与水稻Cd呈显著的负相关关系(表4)。

水稻Cd与土壤氧化物的关系,一方面可能与模型筛选出的各大类元素有关。模型筛选出的四大类元素中,前三类与氧化物具有显著的相关性(表4)。土壤CaO等与MgO、K<sub>2</sub>O、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等呈正相关,与SiO<sub>2</sub>呈负相关;Zr元素刚好相反;Ba、Sr等元素则与Na<sub>2</sub>O等呈正相关。另一方面,也可能是Na、K、Mg等元素在根系表面的交换顺序优于Cd元素所致(徐红宁等,1995;Alloway,2013)。土壤Cd与CaO、MgO等呈正相关,与SiO<sub>2</sub>呈负相关,这可能是土壤Cd与水稻Cd呈负相关的一个原因。

地球化学图上,土壤氧化物与成土母岩之间具有很好的对应关系。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、MgO主要在中侏罗统沙溪庙组(J<sub>2s</sub>)和上侏罗统遂宁组(J<sub>3sn</sub>)地层区富集;Na<sub>2</sub>O主要在中侏罗统沙溪庙组(J<sub>2s</sub>)地层区富集;CaO主要在上侏罗统遂宁组(J<sub>3sn</sub>)和蓬莱镇组(J<sub>3p</sub>)地层富集。SiO<sub>2</sub>总体上与上述各氧化物相反,主要在下白垩统(K<sub>1</sub>)地层区富集(图4 a~g)。

区域内岩石化学风化不是很强烈,土壤中物质组分主要是地质时期的产物(唐时嘉等,1984)。中侏罗世至早白垩世,沉积物源从东部逐渐转化为西北部,古气候则从湿润气候逐渐转为干旱气候。沙溪庙组(J<sub>2s</sub>)和遂宁组(J<sub>3sn</sub>)物源主要来自东部,前者属湿润气候河流相沉积,后者属半湿润、半干旱气候湖泊相沉积;蓬莱镇组(J<sub>3p</sub>)物源区较多,以西北部为主,属半干旱气候河流相沉积;白垩纪早期(K<sub>1</sub>)物源主要来自西北部,属干旱、半干旱湖泊相沉积;第四系(Q)物源也主要来自西北部(范璞等,1980;唐时嘉等,1984;周勇等,2011;尹福光等,2016)。

北部大巴山造山带富含长英质组分(尹福光等,2016),导致下白垩统(K<sub>1</sub>)高Si低Ca;其余地层则多为低Si高Ca。湿润、半湿润气候有利于Al、Fe、K、Mg等难溶组分的聚集,沙溪庙组(J<sub>2s</sub>)和遂宁组(J<sub>3sn</sub>)地层中,其氧化物含量偏高;反之则低。蓬莱镇组(J<sub>3p</sub>)无论是物源,还是沉积古气候,都介于两者之间,氧化物含量也介于两者之间。物质组分的

表5 研究区镉摄入量估算

Table 5 Estimation of daily cadmium intake in study area

预测分类	样品数	水稻Cd含量/(mg/kg)		稻谷Cd摄入量/(μg/d)	
		范围	平均	范围	平均
不超标	148	0.002~0.28	0.033	0.51~71.7	8.36
超标	23	0.019~0.803	0.353	4.87~205	90.4
合计	171	0.002~0.803	0.076	0.51~205	19.4

注:稻谷Cd摄入量按每人每天摄入256.26g生米计算。

差异,最终导致了水稻镉含量及超标率上的差异。白垩系苍溪组(K<sub>1cx</sub>)、白龙组(K<sub>1b</sub>)和第四系(Q)预测超标率分别为25.4%、14.0%和22.2%;其余预测超标率较低(图4h)。

### 5.3 居民镉摄入量及健康风险评价

根据颜玲等(2018)关于四川省居民膳食结构调查结果,区域内成年人谷物摄入量为256.26g/d。可据此估算出研究区内成人稻谷Cd摄入量为0.51~205μg/d,平均为19.4μg/d。其中预测超标区为4.87~205μg/d,平均90.4μg/d(表5),已超过联合国粮农组织和世界卫生组织的允许摄入量标准(ADI)60μg/d。如果加上通过蔬菜、肉类等的摄入量,健康风险形势不容乐观。

## 6 结 论

(1)研究区土壤镉含量低于外围土壤背景值,几乎所有(99.9%)样品含量都低于土壤环境质量标准限值。

(2)生态效应调查结果显示,局部地区水稻镉含量偏高,已超过食品安全国家标准限值,总体超标率为14.0%,存在污染风险。

(3)根据决策树等分析,水稻镉预测超标区内成人的镉摄入量达90.4μg/d,高于全区平均值(19.4μg/d),已超过允许摄入量(60μg/d),存在健康风险。

(4)综合分析得知,预测超标区土壤以低pH、低CaO、高SiO<sub>2</sub>等为特点,与下伏的下白垩统(K<sub>1</sub>)地层组有关,是地质时期的产物。

(5)土壤镉不超标而农作物镉超标的现象,对地区乃至其他重金属低背景区的生态健康风险都具有重要的警示意义。应加强重金属低背景区农作物镉的调查工作,查清以广大农村为主的粮食产区的生态健康风险状况,为新一轮的乡村振兴计划



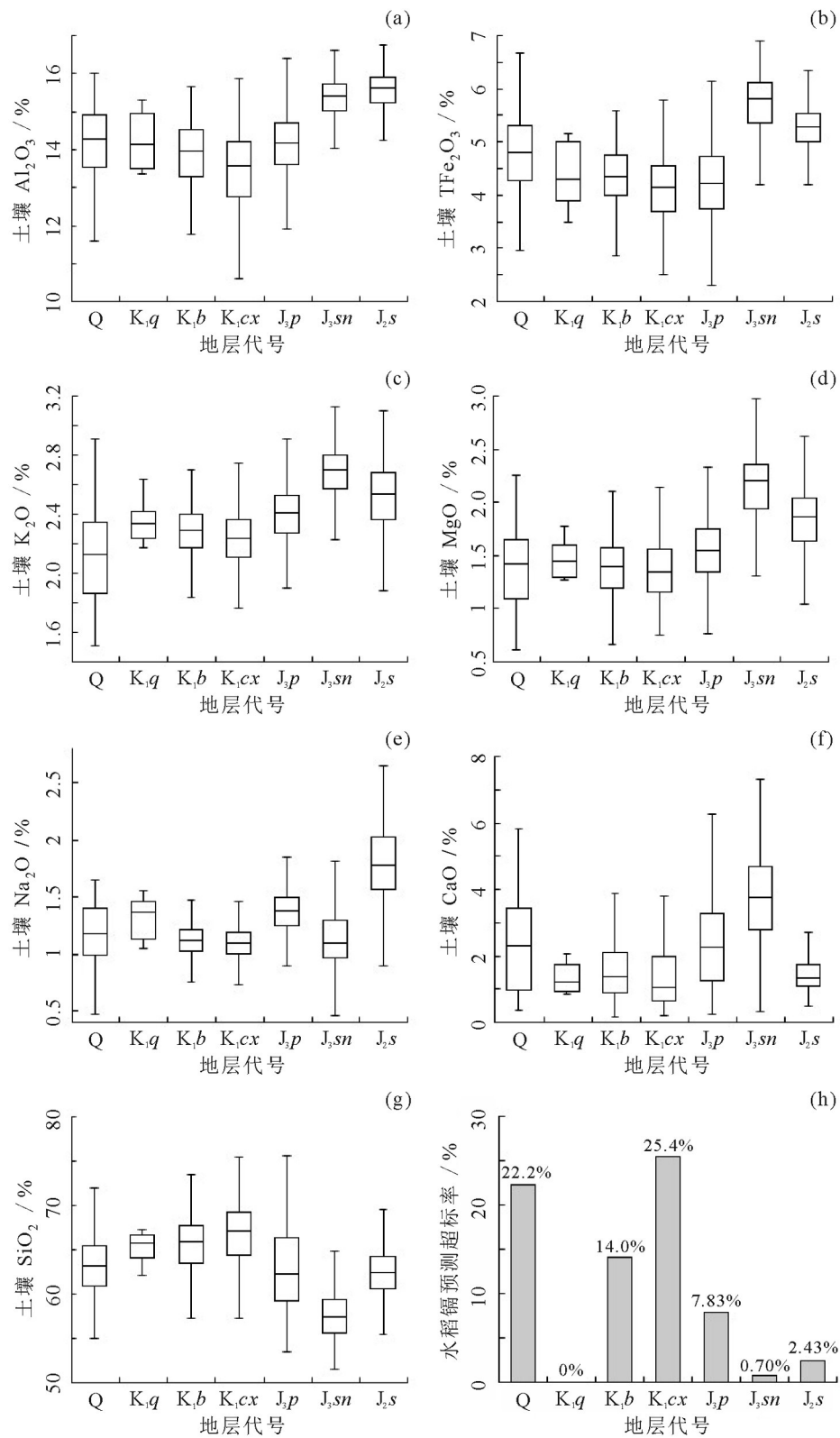


图4 土壤氧化物及水稻预测镉超标率与下伏地层相关关系(地层代号参见图1)

Fig.4 Correlation between oxides in soil, predicted cadmium exceedance rate in rice and under lying strata (see Fig.1 for geological code)

提供有力的科技支撑。

## References

- Alloway B J. 2013. Bioavailability of elements in soil [C]// Selinus O, Essentials of Medical Geology (2nd ed.). Springer, Dordrecht, Netherlands, 351–373.
- Asami T. 1984. Pollution of soils by cadmium [C]// Nriagu J O. Changing Metal Cycle and Human Health, Springer Verlag, Berlin, Germany, 95–111.
- Chen Deyou, Jin Lixin, Li Zhonghui. 2006. Report on Multi-objective Regional Geochemical Survey of Chengdu Economic Zone [R]. Chengdu: Sichuan Geological Survey Institute (in Chinese).
- Cheng Hangxin, Peng Min, Han Wei. 2019. Report on the Second Level Project of 1: 250000 Land Quality Geochemical Survey in the High Background Area of Heavy Metals in Southwest China [R]. Langfang: Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geosciences, 103 (in Chinese).
- Cheng Hangxin, Yang Xiaobo, Li Kuo, Liu Fei, Yang Ke, Nie Haifeng, Peng Min, Zhao Chuandong, Liu Yinghan. 2012. Geochemical early warning for soil acidification and its adverse biological effect of Cd in rice and maize seeds in the catchment area of Liaohu, Liaoning Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 42 (6) : 1889–1895 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Jinjin, Song Jing, Chen Wenchao, Yu Haibo, Huang Yujuan, Wu Longfa, Luo Yongming. 2013. The ecotoxicity effects of cadmium on microorganism in udic-ferrosols and aquic-cambosols[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 8(4): 577–586 (in Chinese with English abstract).
- China Environmental Monitoring Station. 1990. Background Values of Soil Elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 28–87 (in Chinese).
- Fan Pu, Luo Binjie, Huang Ruchang, Shen Ping, Hui Rongyao, Shao Hongshun, Wang Youxiao, Rong Guanghua. 1980. Formation and migration of continental oil and gas in China ( I ) [J]. Science in China, 4: 357–362 (in Chinese).
- Fergusson J E. 1990. The Heavy Elements: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects [M]. Oxford, UK.
- Friberg L, Piscator M, Nordberg G F, Kjellström T. 1974. Cadmium in the Environment (2nd ed.) [M]. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Jin Lixin, Hou Qingye, Bao Yuhan, Xu Zhou, Li Zhonghui, Yang Zhongfang, Chen Deyou. 2008. Ecological security and residents health risk assessment on polluted farmland by cadmium in Deyang Region[J]. Geoscience, 22 (6) : 984–989 (in Chinese with English abstract).
- Kabata-pendias A, Pendias H. 1984. Trace Elements in Soils and Plants [M]. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Khaliq M A, James B, Chen Y H, Saqib H S A, Li H H, Jayasuriya P, Guo W. 2019. Uptake, translocation, and accumulation of Cd and its interaction with mineral nutrients (Fe, Zn, Ni, Ca, Mg) in upland rice[J]. Chemosphere, 215 : 916–924.
- Li F, Fu B, Wang X. 2004. Cadmium and zinc transfer from soil to plant: Potential use of two mathematical models[J]. Journal of Liaoning University, 31(3) :193–198.
- Li Zhibo, Luo Yongming, Song Jing, Wu Longfa, Zhao Qiguo. 2008. Critical values for Cd in paddy field based on Cd risk of rice consumption: A case study[J]. Acta Pedologica Sinica, 45 (1) : 76–81 (in Chinese with English abstract).
- Pan Yang, Zhao Yujie, Zhou Qiwen, Liu Xiaowei, Zhang Tieliang, Xu Yaping, Li Ye, Lu Wenkui. 2015. Influence of soil pH on cadmium absorption by rice in main rice production region of South China[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 43 (16): 235–238 (in Chinese with English abstract).
- Römkens P, Brus D J, Guo H Y, Chu C L, Chiang C M, Koopmans G F. 2011. Impact of model uncertainty on soil quality standards for cadmium in rice paddy fields[J]. Science of the Total Environment, 409 : 3098–3105.
- Tang Doudou, Yuan Xuyin, Wang Yimin, Ji Junfeng, Wen Yubo, Zhao Wanfu. 2018. 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, 37(1): 18–26 (in Chinese with English abstract).
- Tang Shijia, Sun Dejiang, Luo Youfang, Zhou Dahai. 1984. The fertility of purple soil in relation to the characteristics of parent material in Sichuan Basin[J]. Acta Pedologica Sinica, 21 (2) : 123–133 (in Chinese with English abstract).
- Wang Keyue, Jin Tai, Liu Qizhan, Hua Haogen, Fang Yaoming, Zhou Xilei. 1994. Toxic effect of cadmium on kidney [J]. Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases, 12 (3): 24–26 (in Chinese).
- Wang X, Li X, Ma R, Li Y, Wang W, Huang H, Xu C, An Y. 2018. Quadratic discriminant analysis model for assessing the risk of cadmium pollution for paddy fields in a county in China[J]. Environmental Pollution, 236 : 366–372.
- Wang Yating, Dang Yuan, Du Yanling, Yu Jiang, He Yuting, Shen Jie, Deng Siwei, Tao Hongqun. 2020. Availability and main driving mechanism of heavy metal cadmium in typical paddy soils in Chengdu Plain [J]. Jiangsu Agricultural Science, 48 (1): 225–231 (in Chinese).
- Wang Yonghua. 2019. Geochemical Atlas of Southwest China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 92–93 (in Chinese).
- Wang Yonghua, Liu Caize, Zeng Qinjin. 2019. Report on 1: 250000 Geochemical Survey of Land Quality in Chengdu-Chongqing Area[R]. Chengdu: Chengdu Center, China Geological Survey, 165 (in Chinese).
- Wang Yuanmin, Chen Dongxiang, Tong Gguijie, Yuan Daohao, Li Fufu, Wu Shaohua. 2019. Spatial recognition and prediction of rice Cd over-standard based on decision tree model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 15(11): 1475–1483 (in Chinese with English abstract).
- Wu Qitang, A Morel J L, Guchert A. 1994. A mechanistic mathematical model for prediction the uptake of heavy metals by plants[J]. Acta Pedologica Sinica, 31 (1) : 68–76 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Jie, Zhu Qihong, Huang Daoyou, Zhu Hanhua, Xu Chao, Wang Shai, Wang Hui. 2019. Prediction model for the accumulation of

- cadmium in rice in typical paddy fields of south China[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 38 (1): 22-28 (in Chinese with English abstract).
- Xu Hongning, Yang Jurong, Xu Jialin. 1995. Cd uptake by crops and root cation exchange capacity [J]. *Agro-Environmental Protection*, 14 (4) :150-153 (in Chinese).
- Yan Ling, Liu Ming, Liu Mengmeng, Xu Yi. 2018. Trend on dietary structure among residents in Sichuan Province from 2002 to 2012[J]. *Journal of Hygiene Research*, 47 (5) :716-720 (in Chinese with English abstract).
- Yang J, Zhao C, Yang J, Wang J, Li Z, Wan X, Guo G, Lei M, Chen T. 2020. Discriminative algorithm approach to forecast Cd threshold exceedance probability for rice grain based on soil characteristics[J]. *Environmental Pollution* 261 : 1-12.
- Yin Fuguang, Sun Jie, Ren Fei, Sun Zhiming, Wang Fangguo. 2016. *Regional Geology of Southwest China* [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 21-39 (in Chinese).
- Yu Tao, Yang Zhongfang, Zhong Jian, Cheng Xinbing. 2008. Factors affecting the geochemical behavior of heavy metal elements Pb and Cd in soil[J]. *Earth Science Frontiers*, 15(5): 067-073 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X, Lin F, Jiang Y, Wang K, Wong M T F. 2008. Assessing soil Cu content and anthropogenic influences using decision tree analysis[J]. *Environmental Pollution*, 156 (3): 1260-1267.
- Zhang Jian, Hu Shihua, Qin Yulong, Hu Chaoyun, Liu Xiaohu, Yu Rulong, Wang Kangming, Lou Kangfa. 2015. *Geological Structure and Mineralization in Sichuan Province* [M]. Beijing: Science Press, 1-244 (in Chinese).
- Zhao Boyang. 1983. Current situation of cadmium toxicology research in Japan [J]. *Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases*, (4): 242-244 (in Chinese).
- Zhao K, Zhang W, Zhou L, Liu X, Xu J, Huang P. 2009. Modeling transfer of heavy metals in soil- rice system and their risk assessment in paddy fields[J]. *Environmental Earth Sciences*, 59 (3) : 519-527.
- Zhou Yong, Li Xianghui, Sun Yong. 2011. Sedimentary facies and its paleoclimate significance for the upper Jurassic Penglaizhen Formation in Mingzhu Town, Shehong, Sichuan[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 31 (2) : 18-20 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Z, Chen Z, Pan H, Sun B, Zeng D, He L, Yang R, Zhou G. 2018. Cadmium contamination in soils and crops in four mining areas, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 192 : 72-84.
- 程金金, 宋静, 陈文超, 余海波, 黄玉娟, 吴龙华, 骆永明. 2013. 镉污染对红壤和潮土微生物的生态毒理效应[J]. *生态毒理学报*, 8 (4) : 577-586.
- 范璞, 罗斌杰, 黄汝昌, 沈平, 惠荣耀, 邵宏舜, 王有孝, 荣光华. 1980. 中国陆相油气的形成与运移( I ) [J]. *中国科学*, 4 : 357-362.
- 金立新, 侯青叶, 包雨函, 徐洲, 李忠惠, 杨忠芳, 陈德友. 2008. 德阳镉污染农田区生态安全性及居民健康风险评估[J]. *现代地质*, 22 (6) : 984-989.
- 李志博, 骆永明, 宋静, 吴龙华, 赵其国. 2008. 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*, 45 (1) : 76-81.
- 潘杨, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮, 徐亚平, 李野, 吕文魁. 2015. 南方稻区土壤pH变化对稻米吸收镉的影响[J]. *安徽农业科学*, 43 (16) : 235-238.
- 唐豆豆, 袁旭音, 汪宜敏, 季峻峰, 文字博, 赵万伏. 2018. 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*, 37 (1) : 18-26.
- 唐时嘉, 孙德江, 罗有芳, 周大海. 1984. 四川盆地紫色土肥力与母质特性的关系[J]. *土壤学报*, 21 (2) : 123-133.
- 王克跃, 金泰, 刘起展, 华浩根, 方耀明, 周希雷. 1994. 镉对肾脏的毒作用[J]. *中华劳动卫生职业病杂志*, 12 (3) : 24-26.
- 王亚婷, 党媛, 杜焰玲, 余江, 何玉亭, 沈杰, 邓思维, 陶红群. 2020. 成都平原典型稻作土壤重金属镉有效性及主要驱动机制[J]. *江苏农业科学*, 48 (1) : 225-231.
- 王永华. 2019. *中国西南地区地球化学图集* [M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 92-93.
- 王永华, 刘才泽, 曾琴琴. 2019. 成渝地区1:25万土地质量地球化学调查成果报告[R]. 成都: 中国地质调查局成都地质调查中心, 165.
- 王院民, 陈东湘, 全桂杰, 颜道浩, 李富富, 吴绍华. 2019. 基于决策树模型的水稻镉超标空间识别及预测研究[J]. *生态与农村环境学报*, 35 (11) : 1475-1483.
- 吴启堂, Morel J L, Guchert A. 1994. 一个定量植物吸收土壤重金属的原理模型[J]. *土壤学报*, 31 (1) : 68-76.
- 熊婕, 朱奇宏, 黄道友, 朱捍华, 许超, 王帅, 王辉. 2019. 南方典型稻区稻米镉累积量的预测模型研究[J]. *农业环境科学学报*, 38 (1) : 28-34.
- 徐红宁, 杨居荣, 许嘉琳. 1995. 作物对Cd的吸收与根系阳离子交换容量[J]. *农业环境保护*, 14 (4): 150-153.
- 颜玲, 刘敏, 刘蒙蒙, 许毅. 2018. 2002—2012年四川省居民膳食结构变化[J]. *卫生研究*, 47 (5): 716-720.
- 尹福光, 孙洁, 任飞, 孙志明, 王方国. 2016. *中国西南区域地质* [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 21-39.
- 余涛, 杨忠芳, 钟坚, 程新彬. 2008. 土壤中重金属元素Pb、Cd地球化学行为影响因素研究[J]. *地学前缘*, 15 (5): 67-73.
- 张建东, 胡世华, 秦宇龙, 胡朝云, 刘啸虎, 俞如龙, 王康明, 娄康发. 2015. *四川省地质构造与成矿* [M]. 北京: 科学出版社, 1-244.
- 赵伯阳. 1983. 日本镉毒理研究现状[J]. *中华劳动卫生职业病杂志*, (4): 242-244.
- 中国环境监测总站. 1990. *中国土壤元素背景值* [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 28-87.
- 周勇, 李祥辉, 孙勇. 2011. 四川射洪县明星镇上侏罗统蓬莱镇组岩相及古气候意义[J]. *四川地质学报*, 31 (2): 18-20.

## 附中文参考文献

- 陈德友, 金立新, 李忠惠. 2006. 成都经济区多目标区域地球化学调查报告[R]. 成都: 四川省地质调查院.
- 成杭新, 敏敏, 韩伟. 2019. 西南重金属高背景区1:25万土地质量地球化学调查二级项目成果报告[R]. 廊坊: 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 103.
- 成杭新, 杨晓波, 李括, 刘飞, 杨柯, 聂海峰, 彭敏, 赵传冬, 刘英汉. 2012. 辽河流域土壤酸化与作物籽实镉生物效应的地球化学预警[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42 (6) : 1889-1895.