刘佳凤,田娜娜,赵玉杰,等. 基于 Cubist 多元混合回归的稻米富集 Cd 模型构建研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6):1059–1065. LIU Jia-feng, TIAN Na-na, ZHAO Yu-jie, et al. Evaluation of cadmium accumulation in rice using a Cubist multivariate mixed regression model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6):1059–1065.

# 基于 Cubist 多元混合回归的稻米富集 Cd 模型构建研究

刘佳凤<sup>1,2</sup>,田娜娜<sup>1,2</sup>,赵玉杰<sup>2\*</sup>,周其文<sup>2</sup>,刘潇威<sup>2</sup>,袁<sup>1</sup>,郭新蕾<sup>2</sup>

(1.沈阳农业大学土地与环境学院,沈阳 110866; 2.农业部农产品质量安全环境因子控制重点实验室,天津 300191; 3.贵州省草地试验推广站,贵阳 550000)

**摘 要:**为了给农产品质量安全预测提供技术支撑,基于土壤环境因子对稻米富集镉(Cd)的影响在不同条件下存在差异性这一原 理,以湖南省典型区域为例,在土壤多参数检测获取基本大数据前提下,采用 Cubist 多元混合线性回归技术,构建了研究区土壤-稻 米 Cd 传输模型。结果表明,在所筛选的 23 个土壤理化参数中,Ca、Fe、S、Cd、Cl 和 pH 6 个参数对稻米富集 Cd 影响最为突出,并被 纳入 Cubist 模型中。土壤 Ca(以 CaO 计)与土壤 pH 在 Ca 含量小于 1%时线性显著相关,S 与土壤有机质(SOM)呈指数显著相关。土 壤 pH 对稻米富集 Cd 的影响在不同值阈范围内差异明显。研究表明,混合线性回归技术克服了传统多元回归仅能构建单一性质模 型的缺陷,可有效筛选及表征环境因子对稻米富集 Cd 的影响,是构建土壤-稻米 Cd 传输模型有效方法。 关键词:稻米;镉;Cubist

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)06-1059-07 doi:10.11654/jaes.2017-1740

#### Evaluation of cadmium accumulation in rice using a Cubist multivariate mixed regression model

LIU Jia-feng12, TIAN Na-na12, ZHAO Yu-jie2\*, ZHOU Qi-wen2, LIU Xiao-wei2, YUAN Xu3, GUO Xin-lei2

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2.Key Laboratory for Environmental Factors Control of Agro-product Quality Safety, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 3.Grassland Test and Extension Station of Guizhou Province, Guiyang 550000, China)

**Abstract**: To provide technical support for ensuring the quality and safety of agricultural products, the influences of soil environmental factors on the accumulation of cadmium(Cd) in rice under different conditions were studied. Based on the base date and soil parameters determined for the Hunan Province, a Cubist multivariate mixed linear regression model of Cd for soil-rice systems was built. The results suggested that among the 23 soil parameters evaluated the soil environmental factors of Ca, Fe, S, Cd, Cl, and pH had a significant influence on the enrichment of Cd and were therefore incorporated into the Cubist model. The Ca concentration (calculated using CaO concentration) had significant correlation with pH when the Ca content of the soil was less than 1%. In addition, S was significantly correlated with the soil organic matter(SOM) value. The influence of soil pH on the Cd concentration in rice differed among different thresholds. The Cubist mixed linear regression model overcame the shortcomings of multivariate regression, which can only be used to construct a single model. The Cubist model can effectively screen and characterize the effect of environmental factors on Cd accumulation in rice. Hence, it is an effective method for constructing a soil-rice Cd transport model.

Keywords: rice; cadmium; Cubist

收稿日期:2017-12-21 录用日期:2018-03-29

作者简介:刘佳凤(1993—),女,辽宁铁岭人,硕士研究生,主要从事环境危害因子风险评估研究。E-mail:18722057617@163.com

<sup>\*</sup> 通信作者:赵玉杰 E-mail:yujiezhao@126.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0800301-01);农产品质量安全环境因子风险评估重大专项(GJFP2017012);贵州省重大科技专项 ([2013]6024)

Project supported: The National Key Research and Development Program(2016YFD0800301-01); The Special Fund for Key Program of Environmental Factors Risk Assessment of Agro-products Quality Safety (GJFP2017012); The Special Fund for Key Program of Science and Technology of Guizhou Province, China([2013]6024)

我国是受土壤镉(Cd)污染危害较严重的国家, 土壤 Cd 污染不但对生态环境产生危害,而且还会通 过食物链危害人体健康<sup>III</sup>。由于水稻是易吸收 Cd 的 农作物,农田Cd污染严重危害了粮食安全,对人体 健康造成潜在风险四。据 2014 年国土资源部、环境保 护部公布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国 土壤总的超标率为 16.1%, 其中 Cd 的超标率为 7.0%,在无机污染物中污染最为严重<sup>[3]</sup>。但相关研究 也表明,土壤重金属 Cd 与稻米 Cd 含量很多情况并 不存在线性关联。土壤超标但农产品不超标,土壤不 超标而农产品超标的情况在很多地区均有发现。如何 构建土壤 Cd 与稻米 Cd 之间的关联关系, 解析土壤 环境因子对稻米富集 Cd 的影响是土壤环境质量监 测亟需解决的问题之一[4-9。当前,将农田土壤 Cd 与稻 米 Cd 之间建立关联模型的常用方式是构建多元线性 或非线性回归方程,模型构建考虑的参数主要为土壤 pH、有机质(SOM)、阳离子交换量(CEC)、土壤 Fe/Mn 氧化物或土壤质地等[7-9]。多元回归方法构建土壤-稻 米 Cd 传输模型的缺陷在于无法有效考虑土壤环境 因子在不同条件下对稻米吸收 Cd 影响能力的差别, 而模型构建时仅考虑土壤 pH、SOM 等少量环境因 子,也往往忽视其他因素对稻米富集 Cd 的影响。

近年来,由 Rule Quest 公司开发的 Cubist 混合 线性回归决策树算法有效弥补了线性回归方法无法 区分自变量不同情景模式对因变量影响能力存在差 别的问题。Cubist 模型是一种强有力的基于规则的 预测模型,每个规则都关联一个多元线性回归子模 型,规则与模型的匹配完善了单一模型带来的不 足,从而提升了模型预测精度<sup>[10]</sup>。Cubist 模型自发明 以来,已被广泛应用于遥感影像识别分类、数字土 壤制图中<sup>[11-12]</sup>,而将 Cubist 应用于土壤-稻米 Cd 传 输模型的构建中还少见报道。本研究在对土壤理化 性质进行多参数分析基础上,采用 Cubist 技术构建 土壤-稻米 Cd 传输模型,以期为稻米质量安全预测 及产地污染治理修复环境因子筛选提供技术支撑。

## 1 材料与方法

#### 1.1 样品采集

本研究的样品采集自我国湖南省存在稻米 Cd 污染风险的 6 个区县,采样时间为 2016 年 10 月下 旬,水稻类型为晚稻。采集根际土壤和对应的水稻籽 粒样品共 140 对,采样区包括稻米 Cd 高、中、低风险 种植区。记录采样点经纬度及周边环境状况,每个样 农业环境科学学报 第 37 卷第 6 期

品采集 50 株左右水稻,相对应的水稻根际土采集 1 kg 左右,深度为 0~20 cm。根际土样品采集后带回实 验室,经过自然风干,去除土样中的植物残体、石块 等,运用四分法取土研磨过 2 mm 尼龙筛;取混合均 匀后的土壤 200 g,过 20 目尼龙筛;取其中 50 g 用于 检测土壤 pH、质地,其余 150 g 缩分至 50 g,过 100 目尼龙筛,用于检测重金属全量以及采用 X 射线能 谱法测定分析其他元素含量参数值。稻米样品采集 后用自来水洗去表面附着的泥土,再用蒸馏水冲洗 两遍,晒干后用砻谷机去糙,然后再粉碎成糙米,制 成糙米样品,四分法过 40 目尼龙筛备用。

#### 1.2 化学分析

本研究除测定土壤常规理化参数外,还采用高能 偏振能量色散 X 射线荧光能谱法检测土壤大量金属 及非金属元素含量,检测参数达 60 项,以尽可能明确 采样点土壤理化性质。其中 pH、有机质的测定分别采 用电位法、重铬酸钾滴定法,具体参见《土壤农业化学 分析方法》及《土壤农化分析》(第三版)<sup>[13-14]</sup>。DOC 利 用 TOC 分析仪测定<sup>[15]</sup>。土壤中重金属 Cd 全量采用三 酸消解法(浓 HNO<sub>3</sub>、HF 和 HClO<sub>4</sub>体积比为 10:4:1), 稻米样品 Cd 为双酸(浓 HNO<sub>3</sub> 和 HClO<sub>4</sub>体积比为 10: 1)消解,用 ICP-MS 测定<sup>[16]</sup>。土壤重金属 As、Hg 采用浓 HNO<sub>3</sub> 消解法,运用原子荧光测定 As、Hg 的含量<sup>[17]</sup>。采 用 PANalytical 公司 X 射线能谱法测定其他元素含 量,仪器型号为 Epsilon5。土壤检测平行样分析相对 偏差不能大于 10%。

#### 1.3 分析方法简介

Cubist 模型是一种连续变量分类回归决策树方法,其每一条规则被定义为树的单独路径,树的节点是一系列线性模型。预测时将数据空间划分为若干个子空间,分别对子空间数据建模,以提高预测精度。 Cubist 规则的建立方法与回归树模型类似,详尽地对自变量值和训练数据集搜索遍历后找到最初的分裂,通过不断减小叶节点的错误率来调整分裂结果<sup>[18-19]</sup>。 具体模型及应用方式可参看相关使用说明<sup>[20]</sup>。

#### 1.4 数据分析

本文模型以 R 3.2.2 所载程序包 Cubist 0.2.1 进行混合线性模型构建;SPSS 22.0 进行数据描述性统计分析及多元回归分析建模。

### 2 结果与讨论

#### 2.1 土壤理化参数描述性统计分析

根据经验,我们从60多个土壤理化参数中筛查

出 23 个参数作为建模及土壤环境质量评价初选参数 进行统计分析,各参数检测结果见表1。结果表明,采 样区土壤 pH 值范围为 4.81~8.22, 负的偏度值及平均 值小于7的统计表明,虽然大部分土壤偏酸性,但也 有部分采样区土壤 pH 呈现碱性,说明采样区土壤类 型具有明显差别。研究区土壤 SOM 含量的范围为 1.55%~8.54%,均值是4.42%,土壤肥力较高。检测数 据统计结果表明,除土壤 Cd 超过《土壤环境质量标 准》(GB 15618—1995)2级标准值比较严重外,其他 金属或类金属含量如 Cu、Zn、Pb、Ni、As、Hg、Cr 均处 于未污染或仅有个别点位超标情况,基本不会影响建 模讨程。

#### 2.2 土壤-稻米 Cd 传输多元混合模型

首先采用 GritBot 分析并去除数据异常值<sup>[21]</sup>,本 数据共集中发现7个异常数据,因此建模所用数据实 际为133个,然后将数据分为培训数据及验证数据两 类,其中验证数据从全部数据中随机抽取20个。培训 数据集构建的 Cubist 模型见表 2。各因子条件贡献及 模型贡献见表 3。模型预测稻米 Cd(R Cd)含量与实

际检测值散点图见图 1。模型培训数据集预测值与实 际检测值在稻米 Cd 含量表现出良好的一致性。培训 数据检测值与预测值全部数据相关系数为0.97,在稻 米 Cd 含量小于 0.6 mg·kg<sup>-1</sup> 时为 0.81,验证数据检测 值与预测值也显著相关,线性关系模型决定系数为 0.86。说明 Cubist 模型能真实反映土壤因子对稻米吸 收 Cd 的影响。

表 3 表明, 在检测的 23 个土壤参数中, 有 6 个达 到了显著影响稻米对 Cd 吸收富集的程度,从而被纳 入了 Cubist 模型参数。其中 pH、CaO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、S 等 4 个 参数不但成为模型分枝判定条件,而且在子模型中也 承担主要角色。土壤 Cd 含量对稻米富集 Cd 虽有影 响,但没有成为模型判定分枝条件,结合表2可知其 仅在偏碱性土壤中起到了作用。这进一步说明,土壤 Cd 全量并非影响稻米富集 Cd 的最关键因素,而只是 必要条件。

表2表明,本研究构建的土壤-稻米 Cd 传输模 型共有7个规则,其中规则1及规则3、4所含样品量 最多,占全部培训数据集样品量的81.4%。在规则1

		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			· ·····	
理化性质	均值	中值	极小值	极大值	偏度	峰度
рН	6.67	6.49	4.81	8.22	-0.093	-1.738
SOM/%	4.42	4.31	1.55	8.54	0.635	1.095
$DOC/mg \cdot kg^{-1}$	15.51	14.65	3.70	43.51	0.848	1.044
Cd/mg·kg <sup>-1</sup>	0.79	0.48	0.25	3.90	2.341	6.922
$S/mg \cdot kg^{-1}$	561.93	511.87	255.05	1 972.22	3.053	13.677
Cl/mg•kg <sup>-1</sup>	68.22	61.63	0.50	222.39	1.180	1.602
$P/mg \cdot kg^{-1}$	966.15	965.83	408.78	2 081.71	0.584	0.855
Cr/mg·kg <sup>-1</sup>	95.54	95.09	62.53	173.46	1.018	1.790
$Mn/mg \cdot kg^{-1}$	805.25	723.29	81.47	3 884.39	2.614	9.983
$Ni/mg \cdot kg^{-1}$	30.85	29.82	9.41	90.88	1.562	4.058
Cu/mg·kg <sup>-1</sup>	23.61	21.22	5.08	52.17	0.692	-0.327
Zn/mg·kg <sup>-1</sup>	85.32	81.24	26.74	218.42	1.323	2.815
$Se/mg \cdot kg^{-1}$	0.20	0.18	0.01	0.60	1.039	1.814
As/mg•kg <sup>-1</sup>	20.98	15.56	7.98	85.48	2.275	7.057
Hg/mg•kg <sup>-1</sup>	0.21	0.18	0.01	0.76	1.517	3.014
Pb/mg•kg <sup>-1</sup>	46.00	32.68	13.11	320.69	4.219	24.444
SiO <sub>2</sub> /%	65.80	66.51	49.81	78.67	-0.316	-1.326
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	14.63	14.63	10.22	21.62	0.534	0.627
K <sub>2</sub> O/%	2.07	1.95	1.05	2.99	0.161	-1.125
MgO/%	1.43	0.96	0.52	3.03	1.058	-0.651
CaO/%	2.31	1.16	0.28	16.88	2.676	13.416
Na <sub>2</sub> O/%	0.55	0.34	0.10	1.30	0.962	-0.760
Fe₂O₃/%	6.17	6.07	1.38	9.55	-0.141	-0.074

表1 采样区土壤理化参数描述性统计结果 Table 1 Descriptive statistics of soil physical and chemical parameters in the sampling area

农业环境科学学报 第 37 卷第 6 期

#### 稻米 Cd 平均含量/mg·kg<sup>-1</sup> 规则 模型 样品量 判断条件 R\_Cd=0.144-0.016pH+0.014Cd 0.04 55 1 pH>6.97 2 S≤519.917 mg·kg<sup>-1</sup> R\_Cd=-0.692-0.894CaO+0.195Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.16 3 CaO≤0.451% Fe2O3>5.804% 3 pH≤6.97 R\_Cd=1.234-0.199pH+0.045Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.26 27 CaO>0.451% 4 CaO≤0.451% R\_Cd=-0.148+0.000 36S 0.35 10 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>4.908% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>≤5.804% 5 S>519.917 mg·kg<sup>-1</sup> R\_Cd=-6.607-7.651CaO+1.667Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.54 4 CaO≤0.451% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>5.804% 6 pH≤5.42% R\_Cd=-2.062+0.867pH-0.461Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.55 6 $Fe_2O_3 \leq 4.908\%$ 7 pH>5.42 R\_Cd=2.207+6.893CaO-0.023Cl-0.67Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ 1.56 8 CaO≤0.451% 0.045pH+0.000 14S





Figure 1 The relationship between the observed value and predicted value of rice Cd in Cubist model

表37	「同因子右	E Cubist 模	型中的条件	=贡献及模型	型贡献
Table 3	Condition	and model	contribution	of different	factors

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>≤4.908%

因子	条件贡献/%	模型贡献/%
рН	85	85
CaO	47	13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27	43
S	6	16
Cd		48
Cl		7

中,以土壤 pH 为判断条件,当 pH>6.97 时,即土壤处 于中偏碱性水平时,稻米 Cd 含量受 pH 及土壤 Cd 含 量的影响:pH 升高,稻米 Cd 含量下降;土壤 Cd 含量 升高,稻米 Cd 含量随之升高。在规则 1 条件下,稻 米Cd 平均含量为 0.04 mg·kg<sup>-1</sup>,假定土壤 pH 固定为 7,则稻米 Cd 含量达到食品安全国家标准(GB 2762—2017)0.2 mg·kg<sup>-1</sup>,土壤 Cd 含量需达到 12 mg· kg<sup>-1</sup>时才会超过这一标准,但这在现实中基本不存 在,可见在湖南碱性土壤种植的水稻,基本不存在 Cd 超标情况。

在规则 3 中展示的是当土壤 pH 处于中偏酸水 平时,稻米 Cd 含量受 pH 及 Fe 含量影响的模型形 式。本研究数据分析结果表明,土壤 Ca 与土壤 pH 在 Ca(以 CaO 计)含量低于 1%时,有显著相关性,结果 见图 2,关系模型为 pH=3.571 8CaO+4.049 6(*R*<sup>2</sup>= 0.636 2)。这与 Wang 等<sup>[2]</sup>在江苏省稻-麦轮作区研究

表 2 Cubist 预测稻米富集 Cd 模型 Table 2 The Cubist model of Cd transfer

结果一致。说明在湖南及江苏省等区域,在土壤 CaO 含量小于 1%时,通过调控 Ca 含量可显著影响土壤 的酸碱性。根据规则 3 土壤 CaO 含量条件,当 CaO 含 量为 0.451%时, 土壤 pH 计算结果为 5.7, 95% 置信区 间值为 5.57~5.76。说明在土壤 pH 为 5.5~7.0 时,稻米 对 Cd 的吸收受土壤 pH、Fe 含量的影响,两者影响力 一负一正。对比规则1与规则3中pH的系数,可以 看出,在中偏酸性土壤中,pH 变化对稻米富集 Cd 的 影响力是碱性土壤的 12 倍。





规则 4 的判断条件为土壤 CaO 含量 ≤0.451%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量介于 4.9%~5.8%之间, 根据本研究获得的 Ca与pH关系式可知,土壤pH不大于5.7为酸性环境。 我国 860 余个表层土壤全铁含量实测值在 0.17%~ 17.86%之间(以Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>计,下同),95%的置信范围为 1.22%~8.24%<sup>[22]</sup>。规则 4 中的研究区土壤 Fe 含量处于 中等水平。根据规则4可知,在酸性环境中,稻米对 Cd 的吸收受到土壤 S 含量影响比较明显。本研究区 土壤全 S 的含量范围为 255.05~1 972.22 mg·kg<sup>-1</sup>,均 值是 561.93 mg·kg<sup>-1</sup>, 明显高于其他地区水稻田 S 平 均含量 252 mg·kg-1[14],监测结果与黄运湘等<sup>[23]</sup>测定结 果一致。规则 4 稻米 Cd 平均含量为 0.35 mg·kg<sup>-1</sup>,超 过我国稻米 Cd 安全限值,对数据进一步分析表明, 土壤 S 与土壤有机质之间存在显著的联系,两者决定 系数达到了 0.571(相关系数 0.756),其关系图见图 3,这说明有机质是土壤S的重要来源[13]。Cubist 模型 中共有2个子模型,1个判断条件涉及到S含量对稻 米富集 Cd 的影响,而且这种影响均为正效应。土壤 中S形态的改变影响重金属生物有效性,从而起到调 控重金属在土壤中迁移的作用。土壤中 S 包含水溶 态、吸附态和难溶态,其化合价在-2~+6范围内转变, 其中有效 S 包括以 SO<sup>2</sup>形态存在的水溶性 S、吸附态 S和部分有机态 S。水田厌氧条件下, SO<sup>2</sup>被还原为 S<sup>2-</sup>,在环境中 S<sup>2-</sup>与 Cd<sup>2+</sup>发生沉淀反应生成难溶性的 CdS,从而使土壤中有效 S 和有效态 Cd 含量降低。在 排水烤田期,S2-易被氧化,此时硫化物中的 Cd2+也被 释放出来,土壤中有效态 Cd 增加,导致水稻 Cd 吸收 量增加<sup>[24]</sup>。当前,我国南方水稻田种植均采用干湿交 替方式,土壤淹水降低了有机质分解速率,促进了S 的富集<sup>[14]</sup>,土壤排水又促进了硫化物中 Cd 的释放,导 致了稻米 Cd 含量的进一步增加。可见,湖南省土壤 S 含量偏高是稻米 Cd 超标的重要诱因之一。





规则 5、6、7 中共有 18 个稻米监测样品, 虽然样 本量较少,但3种规则条件下稻米均处于严重超标水 平,应引起重视。综合3个规则表明,在酸性且Ca含 量偏低条件下稻米 Cd 污染严重, pH 值增加不但不会 降低稻米 Cd 含量,反而会增加稻米污染程度,这在 土壤 pH 调控时应引起注意。综合本研究各规则中 pH 对稻米富集 Cd 的影响可见,其过程复杂,低 pH 及高 pH 均能抑制水稻对 Cd 的富集,但当土壤 pH 由 强酸性向偏酸性上升时,稻米对 Cd 的富集增加,偏 酸性向中性过渡时,稻米对 Cd 的富集显著下降,中 性向碱性转化时稻米对 Cd 的富集也随之下降,但不 如偏酸性向中性过渡明显。

作者收集了我国南方7个水稻种植区不同 pH 条件下稻米对 Cd 富集系数的变化状况的资料,(富 集系数=稻米 Cd 含量/土壤 Cd 含量),结果见图 4。可 见不同地区稻米对 Cd 的富集系数虽有较大差异性, 但 pH 对富集系数变化的影响规律是一致的。这与 pH影响土壤Cd存在的形态变化有直接关系,当pH 变化时,土壤Cd与土壤有机质、粘土矿物及Fe/Mn 氧化物结合的形态会发生显著的变化,从而影响稻米





Figure 4 Differences of the enrichment factor in different soil pH in different research districts

对 Cd 的富集<sup>[25]</sup>。

综合相关规则表明,土壤低 Fe 水平(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≤ 4.9%)增加 Fe 含量会抑制稻米对 Cd 的富集,但高 Fe 时(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>5.8%),会促进稻米对 Cd 的吸收。土壤 Fe (以 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)与稻米 Cd 含量散点关系图见图 5。总体 而言,土壤 Fe 升高对稻米富集 Cd 有抑制作用,这与 Fe 含量增加促进根表铁膜形成有关<sup>[26]</sup>,模型模拟结果 中高 Fe 会促进稻米对 Cd 的吸收可能与散点图中圈 定样品 Cd 含量增加有关,这可能是水稻品种差异性 造成的,具体原因还有待探讨。

在规则 7 中, 土壤 Cl 离子也表现出对稻米富集 Cd 的影响,且这种影响以负作用为主,这与王芳等<sup>[27]</sup> 的研究结果一致。可能原因是 Cl 离子与土壤中的金 属 Cd 离子的络合作用抑制了镉在作物体内的毒害 效应<sup>[28]</sup>。

#### 3 结论

(1)稻米 Cd 检测值与模型预测值显著相关, Cubist 方法是构建土壤-稻米 Cd 传输模型最有效的 方法之一。



图 5 土壤 Fe 与稻米 Cd 含量散点图

Figure 5 The scatter diagram of the soil Fe and rice Cd

(2)在筛选出的 23 个土壤理化参数中, pH、Ca、 Fe、S、Cd、Cl 等 6 个参数对稻米富集 Cd 影响最为突 出,并被纳入 Cubist 模型中。

(3) 土壤 Ca 与土壤 pH,S 与土壤 SOM 显著相 关,当土壤 Ca(以 CaO 计)含量小于 1%时,Ca 是控制 土壤 pH 的关键因素。土壤 S 随土壤 SOM 的增加呈 指数增加,且对水稻富集 Cd 有正面促进作用。

(4)土壤 pH 对稻米富集 Cd 的影响在不同阈值 范围内作用效能不同。随土壤 Fe 含量增加,稻米富集 Cd 总体呈下降态势。

#### 参考文献:

[1] 黄立章, 金腊华, 万金保. 土壤重金属生物有效性评价方法[J]. 江西 农业学报, 2009, 21(4):129-132.

HUANG Li-zhang, JIN La-hua, WAN Jin-bao. Methods of evaluating bio-validity of heavy metals in soil[J]. *Journal of Jiangxi Agriculture*, 2009, 21(4):129-132.

- [2] 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]. *J Environ Qual*, 2009(38):1126–1136.
- [3] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[R]. 2014. Ministry of Environment Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Report on the national general survey of soil contamination[R]. 2014.
- [4] Rafiq M T, Aziz R, Yang X E, et al. Cadmium phytoavailability to rice (*Oryza sativa* L.) grown in representative Chinese soils. A model to improve soil environmental quality guidelines for food safety[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 103:101–107.
- [5] 刘 情,陈红燕,唐豆豆,等.苏南典型区土壤-水稻系统中重金属 迁移特征及定量模型研究[J].环境科技,2016,29(4):20-25. LIU Qing, CHEN Hong-yan, TANG Dou-dou, et al. Migration characteristics and quantitative model of heavy metals in the typical polluted areas of Southern Jiangsu Provice[J]. Environmental Science and Technology, 2016, 29(4):20-25

[6] 赵科理,傅伟军,戴 巍,等.浙江省典型水稻产区土壤-水稻系统

重金属迁移特征及定量模型[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 226-234.

ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, DAI Wei, et al. Characteristics and quantitative model of heavy metal transfer in soil-rice systems in typical rice production areas of Zhejiang Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(2):226–234.

- [7] 李志博, 骆永明, 宋 静, 等. 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, et al. 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.
- [8] 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.
- [9] 潘 杨,赵玉杰,周其文,等.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, 2015, 43(16):235-238.
  PAN Yang, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, et al. Influence of soil pH on cadmium absorption by rice in main rice production region of South China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(16):235-238.
- [10] Frank E, Wang Y, Inglis S, et al. Using model trees for classification[J]. Machine Learning, 1998, 32(1):63–76.
- [11] Dai S, Fu Y C, ZhaoY L. The remote sensing model for estimating urban impervious surface percentage based on the Cubist Model Tree[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2016, 18(10):1399–1409.
- [12] Gray J M, Bishop T FA, Yang X H. Pragmatic models for the prediction and digital mapping of soil properties in Eastern Australia[J]. Soil Research, 2015, 53(1):24–42.
- [13] 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 agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京:中国农业出版社, 2000.
   BAO Shi-dan. Soil agro-chemical analysis[M]. Third Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [15] 吕国红,周广胜,周 莉,等.土壤溶解性有机碳测定方法与应用
   [J]. 气象与环境学报, 2006, 22(2):51-55.
   LÜ Guo-hong, ZHOU Guang-sheng, ZHOU Li, et al. Determination of

dissolved organic carbon in soil and application[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2006, 22(2):51–55.

- [16] Moor C, Lymberopoulou T, Dietrich V J. Determination of heavy metals in soils, sediments and geological materials by ICP-AES and ICP-MS [J]. *Mikrochimica A cta*, 2001, 136(3): 123–128.
- [17] 李 艳. 双道氢化物发生原子荧光光谱法同时测定土壤中的砷和 汞[J]. 农业环境与发展, 2004, 21(1):41-42.

LI Yan. Simultaneous determination of arsenic and mercury in soil by dual channel hydride generation atomic fluorescence spectrometry [J]. *Agricultural Environment and Development*, 2004, 21(1):41–42.

- [18] 孙 慧, 郭治兴, 郭 颖, 等. 广东省土壤 Cd 含量空间分布预测[J]. 环境科学, 2017, 38(5):2111-2124.
  SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, et al. Prediction of distribution of soil Cd concentrations in Guangdong Province, China[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(5):2111-2124.
- [19] Kuhn M, Johnson K. Regression trees and rule-based models[M]. Springer; Applied Predicdictive Modeling. 2013;369–413.
- [20] Kuhn M, Steve W, Chris K, et al. CRAN-Package. Cubist[EB/OL]. 2017. https://cran.r-project.Org/web/packages/Cubist/index. Html.
- [21] Ltd RuleQuest Research Pty. GritBot: An Informal Tutorial [EB/OL]. 2017. http://www.rulequest.com/gritbot-unix.html.
- [22] Wang C, Li W, Yang Z F, et al. An invisible soil acidification: Critical role of soil carbonate and its impact on heavy metal bioavailability[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5:12735.
- [23] 黄运湘, 郭春秋. 湖南省稻田土壤硫素状况研究[J]. 生态环境学报, 2000, 9(3):235-238.

HUANG Yun-xiang, GUO Chun-qiu. Study on the sulphur status in some paddy soils of Hunan Province[J]. *Ecology and Environment*, 2000, 9(3):235–238.

[24] 张基茂, 黄运湘. 硫对水稻镉吸收的影响机理[J]. 作物研究, 2017, 31(1):82-87.

ZHANG Ji-mao, HUANG Yun-xiang. Effect of sulphur on cadmium absorption of rice[J]. *Crop Research*, 2017, 31(1):82–87.

- [25] 廖 敏, 黄昌勇, 谢正苗. pH 对镉在土水系统中的迁移和形态的影响[J]. 环境科学学报, 1999, 9(10):81-86.
  LIAO Min, HUANG Chang-yong, XIE Zheng-miao. Effect of pH on transport and transformation of cadmium in soil-water system[J]. A cta
- Scientiae Circumstantiae, 1999, 9(10):81-86.
  [26] Liu J G, Gao C X, Wong M H, et al. Variations between rice cultivars in iron and manganese plaque on roots and the relation with plant cadmium uptake[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(7):1067-1072.
- [27] 王 芳,郑瑞伦,何 刃,等. 氯离子和乙二胺四乙酸对镉的植物有效性的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10):1953-1957.
  WANG Fang, ZHENG Rui-lun, HE Ren, et al. Effects of chlorine ion and EDTA on cadmium availability to plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10):1953-1957.
- [28] 王吉秀, 王丹丹, 祖艳群, 等. 氯离子对玉米累积镉的影响[J]. 安徽 农业科学, 2014, 42(15):4630-4632.

WANG Ji-xiu, WANG Dan-dan, ZU Yan-qun, et al. Effects of chlorine ion on accumulation to cadmium in the maize[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(15):4630–4632.