熊 婕,朱奇宏,黄道友,等.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,2019,38(1):22-28.

XIONG Jie, ZHU Qi-hong, HUANG Dao-you, et al. Prediction model for the accumulation of cadmium in rice in typical paddy fields of south China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(1): 22–28.

南方典型稻区稻米镉累积量的预测模型研究

熊 婕1,2,朱奇宏1,黄道友1*,朱捍华1,许 超1,王 帅1,王 辉1

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所,亚热带农业生态过程重点实验室,长沙 410125; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:为了更好地指导镉污染稻田土壤修复、管控稻米镉风险,本文以我国镉污染风险较大的南方稻田为研究对象,基于土壤与稻米配对样品,分析稻米镉含量与土壤理化因子的相关关系,并通过逐步回归分析,建立稻米镉累积量的预测模型。结果表明,我国南方稻区稻米镉累积量主要取决于土壤有效态镉含量而非全镉含量,有效铁、有效锰及有机质含量也是影响稻米镉含量的重要因素;在不考虑水稻品种条件下,采用土壤有效态镉含量、有效锰、有效铁及有机质可较好预测稻米镉积累量,模型的预测能力达到极显著水平(P<0.001),决定系数(R²)为0.52;针对常规稻和杂交稻,以上述4个土壤因子分别建立的模型也可实现较好预测(P<0.001),R²分别为0.47和0.67。

关键词:稻米;土壤性质;南方稻田土壤;水稻品种类型;影响因素;预测模型

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)01-0022-07 doi:10.11654/jaes.2018-0201

Prediction model for the accumulation of cadmium in rice in typical paddy fields of south China

XIONG Jie^{1,2}, ZHU Qi-hong¹, HUANG Dao-you^{1*}, ZHU Han-hua¹, XU Chao¹, WANG Shuai¹, WANG Hui¹

(1.Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Cadmium (Cd) pollution in paddy soil is an increasingly serious problem in southern China. Establishing a prediction model for the accumulation of Cd in paddy rice is of great significance to guide the remediation of Cd–contaminated paddy soils and control the risk of Cd pollution. To construct simulation models of Cd accumulation in paddy rice for southern China, 90 pairs of soil and brown rice samples were collected from typical paddy fields in Hunan Province. The concentrations of Cd in brown rice, total Cd, CaCl₂ extractable Cd in soil, and basic soil properties were determined. Further, the relationships between Cd concentration in rice and soil properties were analyzed using correlation analysis and stepwise regression. The results indicated that the concentrations of Cd in brown rice were mainly related to the available Cd content rather than the total Cd content in paddy soils. Moreover, the presence of available iron (Fe), manganese (Mn), and organic matter in soil, and the varieties of paddy rice also played important roles in Cd accumulation in brown rice. The simulation model of Cd accumulation in brown rice based on available Cd, Mn, Fe, and organic matter in soils showed high accuracy (*P*<0.001, *R*²=0.52) independent of rice variety. Furthermore, simulation models based on the above four soil factors could also predict the accumulation of Cd in conventional rice varieties (*P*<0.001, *R*²=0.47) and hybrid rice varieties (*P*<0.001, *R*²=0.67).

Keywords: brown rice; soil properties; paddy soils in south China; rice variety types; influencing factors; prediction model

收稿日期:2018-02-06 录用日期:2018-05-24

作者简介:熊 婕(1994—),女,湖南益阳人,硕士研究生,从事土壤与环境生态研究。E-mail:xiongjie2015s@163.com

^{*}通信作者:黄道友 E-mail:dyhuang@isa.ac.cn

基金项目:公益性行业(农业)科研专项基金(201403015);国家自然科学基金项目(41877138)

我国重金属污染耕地约占耕地总面积的1/5,土 壤中镉的点位超标率达7.0%。水稻作为我国最主 要的粮食作物之一,对镉具有较强的富集能力,土壤 中的镉被水稻吸收,并通过食物链进入人体后,可严 重威胁人类健康。稻米中镉的累积量不仅仅取决于 土壤镉污染程度,也与土壤pH、有机质含量、阳离子 交换量和微量元素等土壤性质密切相关[2-3]。我国目 前约有10%的稻米镉含量超出国家食品安全标准的 限值[4],主要发生于我国南方稻区。因此,针对南方稻 区明确稻米镉含量的关键影响因素,建立稻米镉累积 量的预测模型,对于准确评估稻田镉污染风险以及保 障稻米的食品安全具有重要意义。

通过逐步回归分析推导出基于土壤因子扩展的 Freundlich 吸附型函数,可研究金属在土壤-植物系统 中的迁移[5],由此建立的植物镉含量预测模型,由于需 要测量的指标较少和预测精度高被广泛应用[6-7],其中 考虑的土壤因子主要包括土壤镉含量、pH值和有机 质等。已有研究[8-10]表明,相较于土壤全镉,0.1 mol· L-1 CaCl2提取的土壤有效态镉含量与稻米镉含量之 间呈现更显著的相关性,目能够更好地反映土壤中镉 的移动性和植物吸收积累风险。有研究時利用土壤 pH和阳离子交换量等土壤性质和提取态镉含量建立 了稻米镉含量预测模型,其预测效果较好。此外,土 壤微量元素如铁、锰、铜、锌等也影响稻米中镉的积 累[12-13]。为此,本研究以湖南省典型稻田土壤和稻米 为对象,分析确定影响稻米镉含量的主要因素,以期 建立基于0.1 mol·L⁻¹ CaCl₂提取态镉含量和土壤理化 性质的南方稻米镉积累预测模型。

材料与方法

1.1 样品采集与预处理

本研究的样品采集自湖南省的37个县(市、区), 供试土壤样品由板页岩风化物(样本数 n=11)、第四 纪红色黏土(n=17)、河湖沉积物(n=22)、花岗岩风化 物(n=7)、砂砾岩风化物(n=12)、石灰岩风化物(n=12)12)和紫色砂页岩风化物(n=9)7种成土母质发育而 来,代表了南方稻田常见的土壤类型。水稻均为籼 稻,包括常规稻(湘早籼32、湘早籼45、中嘉早17和中 早39,共计53个样品)和杂交稻(株两优189和株两 优819,共计37个样品)两种。

早稻种植前在每个样点用五点混合采样法采集 0~20 cm 表层土壤样品,共采集90个土壤样品。土壤 样品经自然风干、研磨,分别过20目和100目尼龙筛 后密封保存待测。早稻成熟时期在每个土壤采样点 以梅花五点法采集稻谷样品(90个)。稻谷样品先后 经自来水和去离子水清洗后于烘箱60℃烘至恒重, 脱壳后粉碎,密封保存待测。

1.2 测定指标与方法

土壤黏粒含量采用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000)测定[14];土壤pH值、有机质、阳离子交换量、有 效铁、有效锰、有效铜及有效锌的测定方法参照《土壤 农化分析》[15]。土壤全镉采用HCl-HNO3-HClO4(VHCI: VHNO;: VHClO4=15:5:3)消煮,稻米镉采用HNO;-HClO4 (V_{HNO3}: V_{HCIO4}=5:1)消煮,土壤镉的有效态采用0.1 mol· L-1 CaCl₂浸提^[8],上述滤液均采用电感耦合等离子体 发射光谱仪(ICP-OES,720ES)测定。

1.3 数据分析与处理

Freundlich 吸附型函数可用来研究金属在土壤-植物系统中的迁移: $\lg[C_{plant}]=a+b\times\lg[C_{soil}]$,其中 C_{plant} 为 植物中的金属浓度, C_{soil} 为土壤中的金属浓度, a 和 b为回归系数,可通过逐步回归分析利用pH、有机质和 阳离子交换量等土壤性质扩展 Freundlich 方程[16]。

实验数据采用 Excel 2016、SPSS 21.0 和 Origin 8.0 进行处理分析。相关性分析使用 Pearson 相关性检 验,实验数据(除土壤pH外)进行对数化处理后再进 行回归分析。

2 结果与分析

2.1 土壤与稻米的污染情况

供试土壤的基本理化性质如表1所示,以酸性土 壤为主,黏粒含量、有机质和阳离子交换量等基本土 壤性质差异性较大。供试土壤以中轻度镉污染为主, 其平均含量为0.44 mg·kg-1,其中超过《土壤环境质量

表1 供试土壤基本性质和稻米镉含量

Table 1 Properties of the tested soils and Cd concentrations in rice

指标	均值	中值	标准差	极小值	极大值
рН	5.82	5.60	0.80	4.50	8.00
黏粒含量/%	11.56	12.00	3.12	2.05	18.55
有机质/g·kg ⁻¹	41.24	39.70	11.67	21.30	74.50
阳离子交换量/cmol·kg ⁻¹	14.29	14.95	4.36	7.17	30.34
有效铁/mg·kg ⁻¹	188.80	184.21	86.13	34.33	477.05
有效锰/mg·kg ⁻¹	34.38	24.37	27.81	5.26	163.11
有效铜/mg·kg ⁻¹	4.90	4.88	2.92	0.03	13.26
有效锌/mg·kg ⁻¹	6.90	5.75	4.94	0.06	36.18
有效镉/mg·kg ⁻¹	0.18	0.17	0.11	0.01	0.47
土壤镉/mg·kg ⁻¹	0.44	0.36	0.29	0.18	2.36
稻米镉/mg·kg ⁻¹	0.11	0.09	0.11	0.01	0.63

标准》 17 (GB 15618—2018)二级标准限定值 1 倍以内 (0.3~0.6 mg·kg $^{-1}$)的 45 个,超标 1~3 倍 (0.6~1.2 mg·kg $^{-1}$)的 11 个,超标 3 倍以上(>1.2 mg·kg $^{-1}$)的 1个。稻米镉的最高含量为 0.63 mg·kg $^{-1}$,最低含量为 0.01 mg·kg $^{-1}$,呈现轻度镉污染趋势。其中常规稻和杂交稻米镉的平均值都为 0.11 mg·kg $^{-1}$,其超标率分别为 9.4%(5/53)和 10.8%(4/37),无显著差异,但二者变异程度不同,分别属于强变异(112.3%)和中等变异(81.9%)。

2.2 稻米镉与土壤性质的相关关系

将稻米镉含量与土壤理化性质指标进行相关性分析(表2),稻米镉含量与土壤pH值和黏粒含量呈极显著的负相关关系(P<0.01);与土壤有效态镉含量呈极显著的正相关关系(P<0.01),其相关关系最为紧密,相关系数(r)为0.618,然而,稻米镉含量与土壤全镉含量相关性不显著(P>0.05);除了土壤有效铜与稻米镉含量之间呈显著正相关(P<0.05)之外,其他土壤

理化性质指标(有机质、阳离子交换量、有效铁、有效锰和有效锌)与稻米镉含量之间的相关关系均没有达到显著水平(P>0.05)。由此可见,土壤有效态镉比全镉更能反映稻米镉的污染风险,土壤pH值、黏粒含量、有效铜及有效态镉含量可能是影响稻米中镉吸收积累的重要因子。

2.3 稻米镉积累预测模型

相关分析表明土壤镉含量及部分土壤理化性质均显著影响稻米镉含量,因此将土壤理化性质作为变量和土壤镉含量结合起来,应用多元回归分析推导出扩展的 Freundlich 方程建立稻米镉积累预测模型(表3)。与仅基于土壤有效态镉含量相比,有效锰、有效铁和有机质依次进入回归方程后,相关系数(r)从0.60提高到0.72,且均达到极显著水平(P<0.001,n=90),模型的精确性得到提高。通过逐步回归分析可以看出基于土壤有效态镉含量、有效锰、有效铁和有机质建立的回归模型的相关系数最大(r=0.72),得到

表2 稻米镉含量与十壤性质的相关关系(r)

Table 2 Correlation between rice Cd concentrations and soil properties (r)

含量	рН	黏粒	有机质	阳离子交换量	有效铁	有效锰	有效铜	有效锌	有效镉	土壤镉	稻米镉
рН	1										
黏粒	0.109	1									
有机质	0.205	0.015	1								
阳离子交换量	畫 0.264*	0.216*	0.287**	1							
有效铁	-0.620**	0.165	-0.141	-0.075	1						
有效锰	-0.120	0.337**	-0.043	0.071	0.371**	1					
有效铜	-0.486**	-0.159	0.089	-0.224*	0.425**	0.236*	1				
有效锌	-0.078	-0.165	0.203	-0.177*	0.156	0.020	0.555**	1			
有效镉	-0.553**	-0.115	-0.111	-0.023	0.420**	0.264*	0.513**	0.197	1		
土壤镉	0.280**	0.064	0.450**	0.291**	-0.267*	-0.054	-0.042	0.113	0.209*	1	
稻米镉	-0.297**	-0.283**	-0.166	-0.121	0.017	-0.110	0.288*	0.154	0.618**	0.158	1

注:*表示P<0.05的显著水平,**表示P<0.01的显著水平。

Note: * indicates significant correlations at P<0.05 level and ** indicates significant correlations at P<0.01 level.

表3 稻米镉与土壤性质的逐步回归方程

Table 3 Stepwise regression equations of rice Cd concentrations and soil properties

编号	预测方程	r	P	SE
1	$lg(Cd_{rice}) = -0.61 + 0.59 lg(CaCl_2 - Cd)$	0.60	< 0.001	0.34
2	$\lg(Cd_{\mbox{\tiny nice}}) \!=\! 0.06 \!+\! 0.66 lg(CaCl_2 \!-\! Cd) \!-\! 0.43 lg(A \!-\! Mn)$	0.68	< 0.001	0.32
3	$\lg({\rm Cd_{\rm rice}}){=}1.16{+}0.84\lg({\rm CaCl_2-Cd}) - 0.35\lg({\rm A-Mn}) - 0.48\lg({\rm A-Fe})$	0.70	< 0.001	0.31
4	$\lg(Cd_{\text{rice}}) = 2.15 + 0.83 \lg(CaCl_2 - Cd) - 0.34 \lg(A - Mn) - 0.52 \lg(A - Fe) - 0.58 \lg(OM)$	0.72	< 0.001	0.30

注: Cd_{nee} 为稻米镉含量; $CaCl_2$ -Cd 为 0.1 $mol \cdot L^{-1}$ $CaCl_2$ 提取的土壤有效态镉含量;A-Mn 为土壤有效态锰含量;A-Fe 为土壤有效态铁含量;OM 为土壤有机质含量;r 为相关系数;P 为概率;SE 为标准误差。下同。

Note: Cd_{ace} is rice Cd concentrations; CaCl₂-Cd is available Cd extracted by 0.1 mol·L⁻¹ CaCl₂; A-Mn is available Mn; A-Fe is available Fe; OM is organic matter; r is correlation coefficient; P is probability; SE is standard error. The same below.

的预测方程:

 $\lg (Cd_{rice}) = 2.15 + 0.83 \lg (CaCl_2-Cd) - 0.34 \lg (A-Cd)$ Mn)-0.52 lg(A-Fe)-0.58 $lg(OM)(R^2=0.52, P<0.001)$

对稻米镉含量的预测效果最好。其他土壤因子 如pH、阳离子交换量和黏粒含量等未能显著改善方 程的相关性,因此未加入预测模型。

为了更好地评估土壤有效态镉、有效锰、有效铁 和有机质对稻米镉含量的影响,分别应用这4个土壤 因子对稻米镉进行单因子回归,得到其回归方程(表 4)。稻米镉含量与土壤有效态镉和有效铁含量呈显 著正相关(P<0.05),与有机质含量呈显著负相关(P< 0.05),与有效锰含量的相关性并不显著(P>0.05),可 见土壤有效态镉、有效铁和有机质显著影响稻米中镉 的积累。通过比较这4个回归方程,土壤有效态镉含 量对稻米镉含量的解释程度优于有效锰、有效铁和有 机质。基于这4个土壤因子的稻米镉预测方程的决 定系数 (R^2) 为0.52(表5),土壤有效态镉含量的 R^2 为 0.36,对稻米镉含量的解释程度占预测模型的69.2%, 而其余的3个土壤性质的单因子回归方程,R2分别为 0.04、0.06和0.05,可见土壤有效态镉含量是影响稻米 镉含量变化的关键因子。

将常规稻和杂交稻的稻米镉含量与土壤理化指 标进行回归分析,以稻米镉含量为因变量,土壤有效 态镉含量、有效锰、有效铁和有机质为自变量,建立回 归方程(表5)。常规稻和杂交稻的稻米镉预测模型 都达到了极显著水平(P<0.001),其决定系数 (R^2) 分 别为0.47和0.67,均可较好地预测稻米镉的吸收积累

表 4 稻米镉含量与土壤性质的单因子回归方程

Table 4 Single factor regression equations between rice Cd concentrations and soil properties

编号	预测方程	R^2	P	SE
5	$\lg(Cd_{\scriptscriptstyle rice})\text{=-0.61+0.59}\lg(CaCl_2\text{-}Cd)$	0.36	< 0.05	0.34
6	$\lg(\mathrm{Cd}_{\scriptscriptstyle\mathrm{rice}}) {=} {-} 0.78 {-} 0.25 \lg(\mathrm{A} {-} \mathrm{Mn})$	0.04	>0.05	0.42
7	$\lg(Cd_{\tiny{rice}}) \text{=-}2.11 \text{+0.44} \lg(A\text{-Fe})$	0.06	< 0.05	0.42
8	$\lg(\mathrm{Cd}_{\scriptscriptstyle\mathrm{rice}}) {=} 0.10 {-} 0.78 \lg(\mathrm{OM})$	0.05	< 0.05	0.42

注:R²为决定系数。下同。

Note: R^2 is coefficient of determination. The same below.

程度,而其标准误差(SE)分别为0.34和0.24,表明杂 交稻米镉预测模型的精确度和准确性均高于常规稻, 杂交稻米镉的预测模型优于常规稻。针对总体样品 建立的稻米镉预测模型也达到了极显著水平(P< (0.001),决定系数 (R^2) 为(0.52),由于不同水稻品种稻米 对镉的耐受性和积累能力存在一定差异,所以预测稻 米镉的累积水平时应考虑水稻品种的差异。

讨论

3.1 稻米镉含量的影响因素

本研究结果表明土壤有效态镉含量是影响稻米 镉富集程度的关键因素。稻米中吸收积累的镉主要 来自于土壤,与土壤全镉相比,0.1 mol·L⁻¹ CaCl₂提取 的土壤有效态镉含量更适用于评估土壤镉污染风险。 相关分析表明pH与土壤有效态镉和稻米镉含量显著 相关,但回归分析中pH没有进入预测模型,与很多研 究结论[6,11,18]不符,这可能是因为pH与土壤有效态镉 有很强的相关性,所以尽管在建立的预测模型中没有 考虑pH,但其对稻米镉的影响作用已经在有效态镉 的变化中得到反映。

单因子回归分析中有效锰与稻米镉含量相关性 不显著,但逐步回归分析中基于有效态镉、有效锰、有 效铁和有机质建立的回归方程能较好地预测稻米镉 含量,所以有效锰、有效铁和有机质均为影响稻米镉 含量的主要因素,在评价稻米镉安全风险时,需要考 虑这些土壤性质的影响。土壤中的有机质对镉有吸 附作用,有机物质可与镉结合产生难溶性沉淀,使土 壤中可交换态镉含量减少,镉的有效性也降低,从而 减少了稻米中镉的积累四。水稻生长收获期间稻田 经过淹水晒田,土壤中铁锰的有效性一直处于动态变 化中。土壤中的锰以二价态的形式(Mn2+)被植物根 系吸收转运, Mn2+和 Fe2+与土壤镉竞争转运膜蛋白来 调控水稻根系对土壤镉的吸收[20]。Fe2+与Mn2+可通过 水稻根部根表铁锰膜的形成抑制水稻根系对土壤镉 的吸收与富集,土壤中的铁锰与镉之间存在拮抗作 用[21]。本文的土壤样品在水稻种植前取得,土壤的本 底性质可以反映土壤中铁锰的丰缺,进而反映其对稻

表 5 不同品种类型水稻米镉的预测方程

Table 5 Prediction equations of Cd concentrations in different variety types of rice

品种类型	预测方程	R^2	P	SE
常规稻	$\lg(\mathrm{Cd}_{\scriptscriptstyle\mathrm{rice}}) = 1.58 + 0.74 \lg(\mathrm{CaCl_2-Cd}) - 0.43 \lg(\mathrm{A-Mn}) - 0.28 \lg(\mathrm{A-Fe}) - 0.52 \lg(\mathrm{OM})$	0.47	< 0.001	0.34
杂交稻	$\lg(\mathrm{Cd}_{\scriptscriptstyle\mathrm{rice}}) = 2.96 + 1.05 \lg(\mathrm{CaCl_2-Cd}) - 0.23 \lg(\mathrm{A-Mn}) - 0.88 \lg(\mathrm{A-Fe}) - 0.57 \lg(\mathrm{OM})$	0.67	< 0.001	0.24
总体样品	$\lg(\mathrm{Cd}_{\scriptscriptstyle\mathrm{rice}}) = 2.15 + 0.83 \lg(\mathrm{CaCl_2-Cd}) - 0.34 \lg(\mathrm{A-Mn}) - 0.52 \lg(\mathrm{A-Fe}) - 0.58 \lg(\mathrm{OM})$	0.52	< 0.001	0.30

米镉含量的影响。

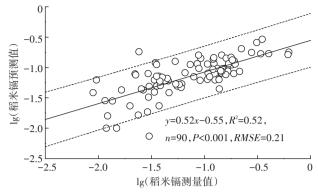
3.2 稻米镉积累预测模型的适用性

通过逐步回归分析发现预测方程的相关系数(r) 为 0.60~0.72, 均达到极显著水平(P<0.001), 可较好 地预测南方稻米镉含量。稻米镉含量预测模型的精 度随着土壤因子的引入而逐渐上升,可根据实际需求 选择模型,基于土壤有效态镉含量、有效铁、有效锰及 有机质含量这四个因子的模型可更精确地预测稻米 镉含量,而基于土壤镉有效态含量的模型投入成本 较少,更加经济。本研究建立的模型的相关系数与 McBride 等[22]和 Ding 等[23]盆栽试验(r>0.90, P<0.001) 相比明显较低,而汤丽玲[24]建立的基于大田试验的稻 米镉含量预测模型的相关系数也仅为0.57。这可能 是由于盆栽试验的土壤性质较为一致且植物生长的 环境条件相似,因此建立的模型具有高相关系数:而 大田试验中环境条件对植物生长的影响程度不一,土 壤性质也存在较大的差异,因此其预测模型的相关 系数较低。以决定系数(R2)和概率(P)检验回归模 型的有效性[25],本文针对总体样品建立的回归方程: $lg(Cd_{rice}) = 2.15 + 0.83 lg(CaCl_2-Cd) - 0.34 lg(A-Mn) -$ 0.52 lg(A-Fe)-0.58 lg(OM), R²为 0.52, P<0.001, 表明 利用土壤有效态镉含量、有效铁、有效锰及有机质含 量对稻米镉含量的预测是可行的。

通过将测定的稻米镉浓度对数值与预测的稻米镉浓度对数值相比较,确定针对总体样品建立的预测模型的准确度(图1)。绝大多数预测值都在95%的预测区间内,说明模型拟合效果较好。模型计算的预测值与实测值间的相关性达到了极显著水平(P<0.001), R²为0.52,均方根误差(RMSE)值为0.21,具有较好的准确性与预测精度,说明建立的模型能够较好地预测南方稻米镉累积水平。

3.3 稻米镉积累预测模型的不足

本研究利用土壤有效态镉、有效锰、有效铁和有机质建立了南方稻米镉预测模型,且综合考量了该模型的适用性,表明通过这4个土壤理化因子可以较好地预测稻米镉含量。值得注意的是,经过前期的土壤镉污染情况调查,土壤样品采集于湖南省镉污染程度较高的地区,所以供试土壤较高的镉超标率仅表明南方稻田土壤镉污染风险较大,而不能说明整个研究区域都具有较高的镉污染水平,所以本研究中高浓度的稻米镉含量并不能代表整个南方地区的稻米。本研究建立的稻米镉预测模型是经验模型,不是机理模型,而样品数相对较少,且模型中仅考虑了土壤有效



实线表示回归线,虚线表示95%的预测区间 The solid line is the regression line, the dashed lines indicate 95% prediction intervals

图1 稻米镉测量值对数与预测值对数之间的关系

Figure 1 Relationship between the measured and predicted rice Cd in lg-transformed formats

态镉、有效铁、有效锰和有机质4个土壤因子,考虑更多的土壤理化性质可能会改善模型对稻米镉含量的预测精度。

研究结果表明常规稻和杂交稻的稻米镉含量没有显著差异,而杂交稻米镉含量的变异程度更小,其预测模型更好,可能是因为供试杂交稻品种较为集中(只有两个)。宋文恩等[26]研究发现由于不同品种水稻对镉的耐受性和敏感性不同,其稻米的健康安全风险将存在较大差异。因此把不同品种水稻的镉积累能力量化并将其体现到稻米镉含量预测模型中可能可以更好地预测南方稻米镉累积水平。

4 结论

(1)通过相关分析和回归分析,可知土壤有效态 镉含量、有效锰、有效铁及有机质是影响污染农田稻 米镉含量的主要因素。土壤有效态镉含量的决定系 数(R²)为0.36,对稻米镉含量的解释程度占预测模型 的69.2%,优于其余三个土壤因子,为评价稻米镉污 染风险的关键指标。

(2)基于区域调研结果,通过逐步回归分析得到针对南方典型稻区样品建立的回归方程: $\lg(Cd_{nice})=2.15+0.83\lg(CaCl_2-Cd)-0.34\lg(A-Mn)-0.52\lg(A-Fe)-0.58\lg(OM)(R^2=0.52,P<0.001), 该模型绝大多数预测值都在95%的预测区间内,模型拟合效果较好且具有较好的准确性与预测精度,可较好地预测我国南方稻米镉的累积水平,可为评估我国南方稻米镉的健康风险提供一定参考。$

(3)基于 0.1 mol·L⁻¹ CaCl₂提取的土壤有效态镉 含量、有效锰含量、有效铁含量及有机质建立的针对 常规稻和杂交稻的模型也可较好地预测其稻米镉含 量,两个预测模型均达到极显著水平(P<0.001),其决 定系数 (R^2) 分别为0.47和0.67。水稻品种差异越小, 基于土壤因素对稻米镉含量的预测效果越好,可进一 步将不同品种水稻的镉积累能力量化并将其体现到 稻米镉含量预测模型中以提高模型的准确度与精度。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. [2014-04-17]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/ t20140417_270670. htm.
 - Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Report on the national general survey of soil contamination[EB/OL]. [2014 - 04 - 17]. http://www. zhb. gov. cn/gkml/hbb/qt/201404/ t20140417_ 270670. htm.
- [2] Li W L, Xu B B, Song Q J, et al. The identification of 'hotspots' of heavy metal pollution in soil-rice systems at a regional scale in eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 472:407-420.
- [3] Römkens 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.
- [4] Li J R, Xu Y M. Immobilization of Cd in paddy soil using moisture management and amendment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(7):5580-5586.
- [5] Ding C F, Zhang T L, Li X G, et al. Major controlling factors and prediction models for mercury transfer from soil to carrot[J]. Journal of Soils & Sediments, 2014, 14(6):1136-1146.
- [6] Römkens P, 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-
- [7] 郑宏艳, 姚秀荣, 侯彦林, 等. 中国土壤模式-作物系统重金属生物 富集模型建立[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2):257-265. ZHENG Hong-yan, YAO Xiu-rong, HOU Yan-lin, et al. Establishment of heavy metal bioaccumulation model of soil pattern-crop system in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(2):257-265.
- [8] 熊 婕, 朱奇宏, 黄道友, 等. 南方稻田土壤有效态镉提取方法研究 [J]. 农业现代化研究, 2018, 39(1):170-177.
 - XIONG Jie, ZHU Qi-hong, HUANG Dao-you, et al. Comparison of single extraction methods for assessing Cd availability in paddy soils in South China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, 39(1): 170-177
- [9] Smilde K W, Luit B V, Driel W V. The extraction by soil and absorption by plants of applied zinc and cadmium[J]. Plant and Soil, 1992, 143 $(2) \cdot 233 - 238$
- [10] Simmons R W, Noble A D, Pongsakul P, et al. Analysis of field-moist

- Cd contaminated paddy soils during rice grain fill allows reliable prediction of grain Cd levels[J]. Plant & Soil, 2008, 302(1/2):125-137.
- [11] Rafiq M T, Aziz R, Yang X, 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 & Environmental Safety, 2014, 103(1):101-107.
- [12] Sebastian A, Prasad M N. Iron- and manganese-assisted cadmium tolerance in Oryza sativa L.: Lowering of rhizotoxicity next to functional photosynthesis[J]. Planta, 2015, 241(6):1519-1528.
- [13] 殷敬峰, 李华兴, 卢维盛, 等. 不同品种水稻糙米对 Cd Cu Zn 积累 特性的研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5):844-850. YIN Jing-feng, LI Hua-xing, LU Wei-sheng, et al. Variations of Cd, Cu, Zn accumulation among rice cultivars[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(5):844-850.
- [14] 蔡文涛, 李贺祎, 来利明, 等. 鄂尔多斯高原弃耕农田恢复过程中 土壤物理性质和生物结皮的变化[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 829-837.
 - CAI Wen-tao, LI He-vi, LAI Li-ming, et al. Dynamics of soil physical properties and biological soil crust during the vegetation restoration process of abandoned croplands in the Ordos Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3):829-837.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000. BAO Shi-dan. Agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [16] Liang Z F, Ding Q, Wei D P, et al. Major controlling factors and predictions for cadmium transfer from the soil into spinach plants[J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2013, 93(4):180-185.
- [17] 中华人民共和国环保部. GB 15618—2018 土壤环境质量标准[S]. 北京:中国标准出版社,2018. Ministry of Environmental Protection of PRC. GB 15618-2018. Environmental quality standard for soils[S]. Beijing: China Standards Press. 2018.
- [18] 杨 阳, 李艳玲, 王美娥, 等. 湖南攸县稻米镉(Cd)富集特征及原 因解析[J]. 环境科学学报, 2017, 37(4):1502-1507. YANG Yang, LI Yan-ling, WANG Mei-e, et al. Enrichment characteristics of cadmium in rice and its influence factor in the Youxian prefecture, Hunan Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37 (4):1502-1507.
- [19] 关天霞, 何红波, 张旭东, 等. 土壤中重金属元素形态分析方法及 形态分布的影响因素[J]. 土壤通报, 2011, 42(2):503-512. GUAN Tian-xia, HE Hong-bo, ZHANG Xu-dong, et al. The methodology of fractionation analysis and the factors affecting the species of heavy metals in soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(2): 503-512.
- [20] 覃 都, 陈铭学, 周 蓉, 等. 锰-镉互作对水稻生长和植株镉、锰 含量的影响[J]. 中国水稻科学, 2010, 24(2):189-195. QIN Du, CHEN Ming-xue, ZHOU Rong, et al. Effects of interaction between manganese and cadmium on plant growth and contents of cadmium and manganese in rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2010, 24(2):189-195.
- [21] 尹晓辉, 邹慧玲, 方雅瑜, 等. 施锰方式对水稻吸收积累镉的影响

- 研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(8):8-12.
- YIN Xiao-hui, ZOU Hui-ling, FANG Ya-yu, et al. Effects of manganese fertilizer on absorption and accumulation of Cd in rice[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(8):8–12.
- [22] McBride, Murray B. Cadmium uptake by crops estimated from soil total Cd and pH[J]. *Soil Science*, 2002, 167(1):62-67.
- [23] Ding C F, Zhang T L, Wang X 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.
- [24] 汤丽玲. 作物吸收 Cd 的影响因素分析及籽实 Cd 含量的预测[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):699-703.
 - TANG Li-ling. Effects of soil properties on crop Cd uptake and prediction of Cd concentration in grains[J]. *Journal of Agro-Environment*

- Science, 2007, 26(2):699-703.
- [25] 刘 杰,王 强. 基于回归分析的汉江汉中段水体重金属污染预测模型[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2017, 33(3):89-92. LIU Jie, WANG Qiang. Prediction model of heavy metal pollution in Hanzhong section of Hanjiang river based on regression analysis[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 33(3):89-92.
- [26] 宋文恩, 陈世宝. 基于水稻根伸长的不同土壤中镉(Cd)毒性阈值(ECx)及预测模型[J]. 中国农业科学, 2014, 47(17):3434-3443. SONG Wen-en, CHEN Shi-bao. The toxicity thresholds(ECx) of cadmium(Cd) to rice cultivars as determined by root-elongation tests in soils and its predicted models[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47 (17):3434-3443.