

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.04.016

窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 稻米镉的生物富集系数与其影响因素的量化关系. 土壤, 2021, 53(4): 788–793.

稻米镉的生物富集系数与其影响因素的量化关系^①

窦韦强, 安毅, 秦莉*, 董明明, 林大松

(农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要: 为进一步明确田间环境中稻米镉的生物富集系数(BCF)与其影响因素的定量关系, 以原农业部环境监测总站对我国南方水稻产地的例行监测数据为基础, 系统分析了土壤有效镉、pH、土壤有机质(SOM)及阳离子交换量(CEC)与稻米镉 BCF 的相关关系, 并通过多元线性回归构建了二者间的定量关系模型。结果表明: 研究区域土壤全镉范围为 0.25 ~ 10.34 mg/kg, 平均值为 1.94 mg/kg, 是我国《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618—2018)中镉污染风险筛选值(0.4 mg/kg)的 4.85 倍; 简单线性相关分析表明, 稻米镉的 BCF 与土壤有效镉和 SOM 呈极显著正相关($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.395 和 0.474, 与 pH 呈极显著负相关($P < 0.01$), 相关系数为 -0.470, 与 CEC 呈显著负相关($P < 0.05$), 相关系数为 -0.200; 通过多元线性回归得到土壤有效镉、pH 和 SOM 构建的三因子量化关系模型 $\lg\text{BCF} = -0.346\text{pH} + 0.013\lg\text{SOM} + 0.181\lg\text{Cd}_{\text{available}} + 2.001$ ($R^2 = 0.560$, $P < 0.01$, $n = 112$) 达到了极显著水平, 能较好预测我国南方水稻产地稻米镉含量及土壤镉的生态安全阈值。

关键词: 田间环境; 镉; 土壤性质; 生物富集系数; 量化关系

中图分类号: X53 **文献标志码:** A

Quantitative Relationship Between the Bioconcentration Factor of Rice Cadmium and Its Influencing Factors

DOU Weiqiang, AN Yi, QIN Li*, DONG Mingming, LIN Dasong

(Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: To further determine the quantitative relationship between the bioconcentration factor (BCF) of rice cadmium (Cd) and influencing factors, this study was carried out based on the routine monitoring data of the southern rice-producing areas provided by the Agro-Environmental Monitoring Center of China. The correlations between soil available Cd content, pH, soil organic matter (SOM), cation exchange capacity (CEC) and rice BCF were systematically analyzed, and the quantitative relationship models were established by multiple linear regression. The results showed that soil total Cd content ranged from 0.25 to 10.34 mg/kg with the average of 1.94 mg/kg, which was 4.85 times of the risk screening value (0.4 mg/kg) for Cd contamination in Soil Environment Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agriculture Land (GB15618—2018). The results of linear correlation analysis showed that BCF of rice Cd had significant positive correlations with soil available Cd and SOM ($P < 0.01$), the correlation coefficients were 0.395 and 0.474, respectively, while significant negative correlations with soil pH ($P < 0.01$) and CEC ($P < 0.05$), the correlation coefficients were -0.470 and -0.200, respectively. The model constructed by multiple linear regression was $\lg\text{BCF} = -0.346\text{pH} + 0.013\lg\text{SOM} + 0.181\lg\text{Cd}_{\text{available}} + 2.001$ ($R^2 = 0.560$, $P < 0.01$, $n = 112$), which can better predict Cd content in rice and the safety threshold of soil Cd in rice production areas in southern China.

Key words: Field environment; Cadmium; Soil properties; Bio-concentration factor; Quantitative relationship

近年来随着工业化的快速发展,土壤重金属污染愈发严重,据 2014 年《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国土壤重金属的点位超标率为 21.7%,其中

以镉污染最为严重,达 7.0%^[1]。土壤镉主要来源于采矿、冶炼、污灌、农药化肥的过量施用及大气沉降等^[2],不仅会对作物的正常生长产生影响,还能通过

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41877403)资助。

* 通讯作者(qi-tj@163.com)

作者简介: 窦韦强(1994—),男,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为农产品产地质量安全与重金属迁移转化。E-mail: 1186763678@qq.com

食物链在人体富集，累积到一定量后会引发各种疾病^[3]。而水稻作为我国的主要粮食作物，与其他作物相比，水稻对重金属镉的富集能力更强^[4-5]。如石一珺等^[6]比较分析不同种类的粮食、果蔬等农作物可食部位及对应耕层土壤样品中的镉含量表明，粮食作物中稻米镉的富集系数最高。因此，为了保障作物的正常生长及人体健康，土壤-作物体系中镉的迁移转化研究尤为重要。

大量盆栽试验结果表明^[7-9]，土壤理化性质和土壤有效镉能显著影响稻米镉含量，如易亚科等^[10]研究认为，pH 和土壤有效镉对稻米镉含量的影响达到了极显著水平($P<0.01$)；陈楠等^[11]研究表明 pH 在 4~9 时与糙米镉含量呈显著线性负相关($P<0.05$)；杜彩艳等^[12]研究得到土壤有机质会显著影响稻米镉的富集。但相对于盆栽试验，田间环境中稻米镉富集的影响因素复杂多样且不可人为干预，水稻的生长环境也不均一，所得结果与盆栽试验相比具有一定差异，如廖启林等^[13]研究认为，苏锡常地区土壤镉与稻米镉含量之间并无明显相关性。因此，田间环境中稻米镉富集的影响因素及影响程度目前仍无明确定论，仍需进一步深入探究。

综上，本研究以原农业部环境监测总站对我国南方水稻产地(安徽 A 市、广西 B 市、贵州 C 市、湖北 D 市和湖南 E 市)的例行监测数据为基础，系统分析

了土壤及稻米镉的污染状况，深入探讨了稻米镉的生物富集系数与土壤有效镉、pH、有机质以及阳离子交换量的相关关系，并通过多元回归建立了稻米镉的生物富集系数与其影响因素的量化模型，以期为我国南方水稻产地稻米的安全生产及土壤镉的生态安全阈值推导提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究数据来源于近 5 年内原农业部环境监测总站对我国南方水稻产地同一年份多个地区的晚稻例行监测数据，包含安徽 A 市、广西 B 市、贵州 C 市、湖北 D 市和湖南 E 市 5 个水稻产地的 112 组数据，其中安徽 A 市 26 组、广西 B 市 44 组、贵州 C 市 7 组、湖北 D 市 13 组、湖南 E 市 22 组。数据包含 pH、土壤有机质(SOM)、阳离子交换量(CEC)、土壤全镉、土壤有效镉以及稻米镉，各指标的检测方法如表 1 所示。其中土壤有效镉的测定采用 DTPA 提取法，具体操作流程为：称取已风干并通过 2 mm 尼龙筛的土壤样品 5.00 g，置于 100 ml 具塞锥形瓶中，用移液管加入 25.00 ml DTPA 提取剂，于 25 °C 左右放入水平式往复振荡器，振荡 180 r/min，2 h 后取下离心或干过滤，舍弃 5~6 ml 最初滤液，利用石墨炉原子吸收测定浓度。

表 1 土壤和农产品指标的检测方法及标准
Table 1 Testing methods and standards of soil and agricultural product indicators

检测指标	检测方法	标准编号	标准名称	参考文献
土壤 pH	玻璃电极法	NY/T 1121.2—2006	土壤 pH 的测定	[14]
SOM	重铬酸钾法	NY/T 1121.6—2006	土壤有机质的测定	[15]
CEC	1 mol/L 乙酸铵交换法	LY/T 1243—1999	森林土壤阳离子交换量的测定	[16]
土壤总镉	电感耦合等离子体质谱法	HJ766—2015	固体废物 金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法	[17]
土壤有效镉	DTPA 提取法	GB/T23739—2009	土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法	[18]
稻米镉	电感耦合等离子体质谱法	GB5009.268—2016	食品安全国家标准 食品中多元素的测定	[19]

1.2 数据处理

利用 Excel 2013、SPSS 22.0 以及 Origin 9.0 对本数据进行处理、统计与分析。

生物富集系数(BCF)：稻米镉的 BCF 定义为稻米镉含量与土壤全镉含量之比，其值越大表明水稻对镉的富集能力越强，反之越弱。公式如下^[20]：

$$BCF=C_{\text{rice}}/C_{\text{soil}} \quad (1)$$

式中： C_{rice} 为稻米镉含量(mg/kg)； C_{soil} 为土壤全镉含量(mg/kg)。

2 结果与讨论

2.1 稻米镉及其影响因素的特征分析

如表 2 所示，研究区域 pH 范围为 5.10~8.00，包含酸性、中性及碱性土壤，平均值为 6.14，变异系数为 15%，属中等变异程度；SOM 的范围为 9.89~77.00 g/kg，最大值是最小值的 7.79 倍，平均值为 36.56 g/kg，变异系数为 42%，属中等变异程度；CEC 的范围为 7.49~19.68 cmol/kg，最大值是最小值的

2.63 倍, 平均值为 13.65 cmol/kg, 变异系数为 19%, 属中等变异程度; 土壤有效镉的范围为 0.08 ~ 7.47 mg/kg, 最大值是最小值的 93.38 倍, 平均值为 1.31 mg/kg, 变异系数为 119%, 属强变异程度; 而土壤全镉范围为 0.25 ~ 10.34 mg/kg, 最大值是最小值的 41.36 倍, 平均值为 1.94 mg/kg, 是我国《土壤环境

质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618—2018)^[21]中镉污染风险筛选值(0.4 mg/kg)的 4.85 倍, 变异系数为 109%, 属强变异程度; 稻米镉范围为 0.03 ~ 5.29 mg/kg, 最大值是最小值的 176.33 倍, 平均值为 0.70 mg/kg, 变异系数为 136%, 属强变异程度。

表 2 稻米镉及其影响因素的统计分析
Table 2 Statistical analysis of rice cadmium and its influencing factors

指标	样本数量(组)	范围	中位值	平均值	标准差	变异系数(%)
土壤 pH	112	5.10 ~ 8.00	5.80	6.14	0.90	15
SOM(g/kg)		9.89 ~ 77.00	40.05	36.56	15.39	42
CEC(cmol/kg)		7.49 ~ 19.68	13.07	13.65	2.57	19
土壤有效镉(mg/kg)		0.08 ~ 7.47	0.37	1.31	1.56	119
土壤全镉(mg/kg)		0.25 ~ 10.34	0.79	1.94	2.11	109
稻米镉(mg/kg)		0.03 ~ 5.29	0.39	0.70	0.95	136

2.2 稻米镉的 BCF 与其影响因素的相关分析

2.2.1 稻米镉的 BCF 与土壤有效态镉的相关分析

如图 1 所示, 稻米镉的 BCF 与土壤有效态镉呈极显著正相关($P < 0.01$), 但相关系数为 0.395, 低于盆栽试验结果, 说明田间环境中二者之间的相关性会出现减弱现象, 这与朱晓龙^[22]研究得到田间环境中土壤有效镉与稻米镉含量呈显著相关($P < 0.05$), 但相关系数仅为 0.557 的结论类似。此外, 李志涛等^[23]研究表明田间环境中稻米镉的 BCF 均值与土壤有效镉含量并无明显相关性; 侯艺璇^[24]研究认为田间环境中稻米镉与有效镉的空间分布差异显著, 几乎不存在相关性; 冯金飞^[25]也得到了类似结论, 即作物中镉含量高值区分布与土壤镉含量高值区分布存在明显差异, 土壤镉含量高的区域作物镉含量并不一定高。可见, 田间环境中影响稻米镉富集的因素众多, 除土壤有效镉外还受其他因素的影响。

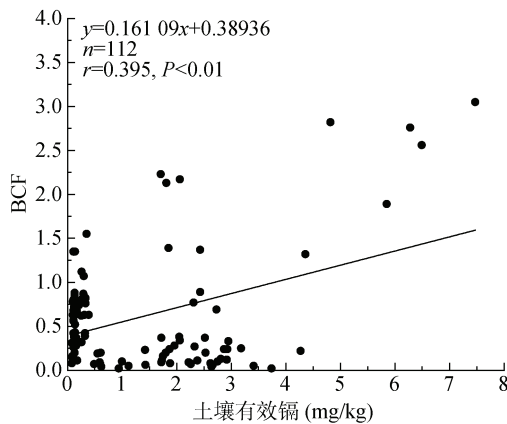


图 1 稻米镉的 BCF 与土壤有效镉的相关性

Fig.1 Correlation of bioconcentration factor of rice cadmium and available cadmium in soil

2.2.2 稻米镉的 BCF 与土壤 pH 的相关分析

如图 2A 所示, 稻米镉的 BCF 与 pH 呈极显著负相关($P < 0.01$), 相关系数为 -0.470, 即随 pH 的增加水稻对镉的富集能力呈下降趋势, 这与易亚科等^[10]和陈楠等^[11]的研究结果一致。

为进一步明确不同 pH 条件下稻米镉的富集过程, 以我国《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618—2018)^[21]中 pH 分段为依据(图 2B), 当 $pH < 5.5$ 时, 稻米镉的富集能力最强, 这是因为低 pH 条件下土壤中其他形态的镉易于转化成可交换态镉, 致使可交换态的镉含量增加, 水稻对镉富集能力增强, 如颜世红^[26]采用 pH 为 3.5 和 4.5 的酸雨模拟溶液对水稻土进行淋溶时得到, 碳酸盐结合态镉极易向可交换态镉转化, 且当所用酸雨模拟溶液的 pH 越小, 土壤中碳酸盐结合态镉的减少量越多, 转化为可交换态镉的含量显著增加。此外, 低 pH 条件下土壤颗粒的表面正电荷数量较多, 与同性 Cd^{2+} 会发生“相斥”作用, 限制了 Cd^{2+} 在土壤颗粒表面的吸附, 这也导致了土壤中可交换态镉含量的增加^[27]。当 pH 在 5.5 ~ 6.5 时, 稻米对镉的富集能力开始下降, 但降幅不明显, 这与康六生^[28]研究得到土壤 $pH < 6.5$ 时土壤有效镉的含量并不会随 pH 的变化而发生明显改变的结论一致。但当 $pH \geq 6.5$ 时, 稻米对镉的富集能力呈先急剧下降 ($6.5 \leq pH < 7.5$) 后趋于平缓 ($pH \geq 7.5$) 的趋势, 这是因为中性及碱性条件下土壤镉会通过络合、螯合以及沉淀等作用以难溶态的氢氧化物、碳酸盐及磷酸盐等形式存在, 溶解度较小, 土壤溶液中活性镉离子的

浓度也较低，导致镉的生物有效性下降，如陈守莉等^[29]研究认为 pH 升高会使土壤有机质的溶解度增大，络合能力增强，致使大量的镉离子被络合生成更稳定的有机质-镉络合物和硫化物结合态镉，导致可交换态镉含量迅速下降；此外，Caporale 和 Violante^[23]研究表明高 pH 条件会增大土壤溶液中

Cd^{2+} 和 OH^- 的离子积，而 Cd^{2+} 与 OH^- 又会以水合离子的形式存在，pH 升高会加速水解反应的进行，且 $CdOH^+$ 的存在会使 Cd^{2+} 的吸附量迅速增加进而使生成 $Cd(OH)_2$ 沉淀的机会增大，致使土壤溶液中镉离子浓度迅速降低。因此，实际生产中将土壤 pH 调至 6.5 ~ 7.5 以上才能有效降低稻米对镉的富集能力。

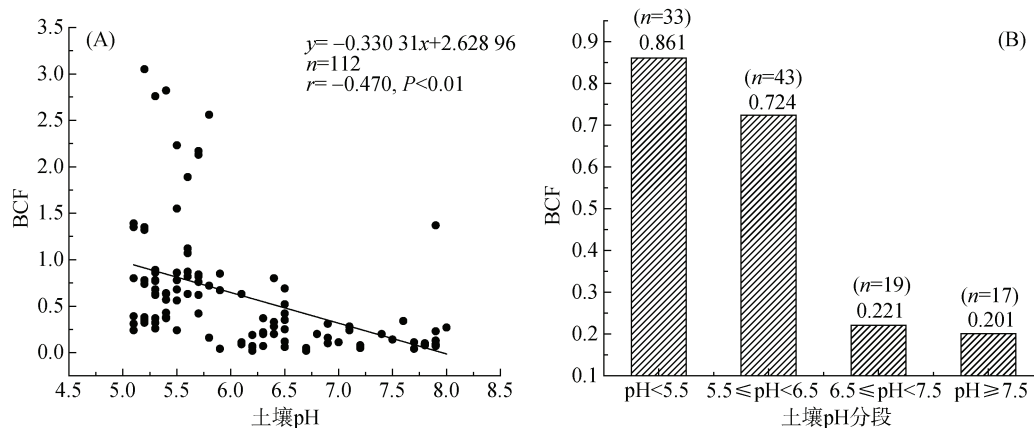


图 2 稻米镉的 BCF 与 pH 的相关性

Fig. 2 Correlation of the bioconcentration factor of rice cadmium and pH

2.2.3 稻米镉的 BCF 与 SOM 和 CEC 的相关分析
如图 3A 所示，稻米镉的 BCF 与 SOM 呈极显著正相关($r=0.474, P<0.01$)，这与和君强等^[31]研究得到 SOM 高的土壤中水稻更容易富集镉的结论一致，主要是因为镉能与大分子量的腐殖质(如胡敏酸)形成高稳性络合物增强其在土壤中的有效性和移动性^[32]，进而增加水稻对镉的富集能力。但也有研究认为 SOM 与稻米镉的 BCF 呈显著负相关^[12]。另外，李志博等^[33]研究认为 SOM 对水稻富集镉的影响并不显著。而图 3B 表明，稻米镉的 BCF 与 CEC 呈显著负相关($P<0.05$)，相关系数为 -0.200，说明随着 CEC 含量的增加，水稻对镉的富集能力呈下降趋势，可能是因

为 CEC 含量的增高会导致土壤负电荷量的增加，进而增大 Cd^{2+} 与负电荷的结合机会，使更多的 Cd^{2+} 被吸附点位固定，从而减少水稻对镉的富集^[34]，如廖启林等^[13]研究表明，高浓度镉污染土壤中 CEC 含量的增加会明显抑制水稻对镉的富集。

2.3 稻米镉的 BCF 与其影响因素的量化关系模型

综上，土壤有效镉、pH、SOM 及 CEC 均能显著影响稻米镉的富集，因此，以土壤有效镉、pH、SOM 和 CEC 为自变量，稻米镉的 BCF 为因变量，通过对数变换后，利用多元线性回归构建稻米镉的多因子定量关系模型(表 3)。当自变量仅为土壤有效镉时，其确定系数为 0.156($P<0.01$)，说明土壤有效镉

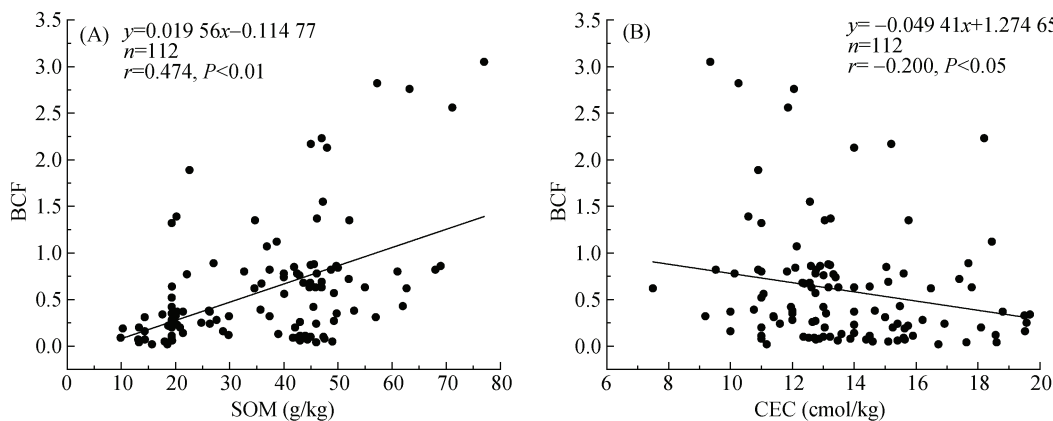


图 3 稻米镉的 BCF 与 SOM 和 CEC 的相关性

Fig. 3 Correlation of bioconcentration factor of rice cadmium and soil organic matter and cation exchange capacity

能控制模型 15.6% 的变异; pH 作为第二影响因子引入时, 其确定系数变为 0.462($P<0.01$), 双因子能控制模型 46.2% 的变异, pH 对模型准确度的贡献率为 30.6%; 进一步引入 SOM 模型的确定系数变为 0.560 ($P<0.01$), 土壤有效镉、pH 以及 SOM 3 个变量能控制模型 56.0% 的变异, SOM 对模型准确度的贡献率为 9.8%; 而当土壤有效镉、pH、SOM 以及 CEC 4 个因子全部引入时, 模型的确定系数达到最大, 为 0.573, 但 4 因子定量关系模型对稻米镉的预测并没有达到显著水平($P>0.05$), 因此, 本研究推荐基于土壤有效态镉、pH 和 SOM 构建的三因子定量关系模型 $\lg BCF = -0.346\text{pH} + 0.013\lg \text{SOM} + 0.181\lg \text{Cd}_{\text{available}} + 2.001$ ($R^2=0.560$, $P<0.01$, $n=112$) 用于我国南方水稻产地稻米镉含量的预测及土壤镉生态安全阈值的推导。

模型准确度贡献率分析表明, pH 最高(30.6%), 土壤有效镉次之(15.6%), SOM 最低(9.8%), 说明 pH 是我国南方水稻产地稻米镉富集的主导因素。另外, 本研究所得的三因子定量关系模型确定系数(0.560)

略低于盆栽试验结果, 可能是因为田间试验与盆栽试验所处环境相差较大, 而这种环境差异会引起土壤理化性质、微生物群落以及水稻自身的一系列变化, 进而导致模型确定系数的降低^[35], 如王梦梦等^[36]基于田间试验构建的稻米镉含量预测模型确定系数为 0.509; 汤丽玲^[57]基于田间采样建立的稻米镉含量预测模型确定系数为 0.565; 赵科理^[38]以浙江水稻田为研究对象构建水稻籽粒镉的多元回归预测模型确定系数为 0.518。除此之外, 本研究区域空间跨度大, 土壤类型和水稻品种差异明显, 田间环境中稻米镉的富集还会受氧化还原电位、电导率、土壤机械组成、土壤类型以及水稻品种等的影响, 这也是造成其确定系数偏低的原因^[29], 如王科等^[40]研究认为不同类型土壤上稻米镉的富集能力不同, 灰棕潮田上镉富集率较低的品种为川作 6 优 177、粳稻、金优 284, 冲积黄泥田上为金优 284、B 优 840、粳稻, 紫潮田上为 II 优 498、富优 21、粳稻; 王美娥等^[41]研究表明不同水稻品种对镉的富集能力差异明显, 株两优 06 对镉的富集明显低于其他品种。

表 3 稻米镉的 BCF 与其影响因素的定量关系模型

Table 3 Model of quantitative relationship between the bio-concentration coefficient of rice cadmium and its influencing factors

影响因子	样本量	预测方程	R^2	P
单因子	112	$\lg BCF = 0.161\lg \text{Cd}_{\text{available}} + 0.389$	0.156	<0.01
双因子		$\lg BCF = -0.396\text{pH} + 0.204\lg \text{Cd}_{\text{available}} + 2.765$	0.462	<0.01
三因子		$\lg BCF = -0.346\text{pH} + 0.013\lg \text{SOM} + 0.181\lg \text{Cd}_{\text{available}} + 2.001$	0.560	<0.01
四因子		$\lg BCF = -0.338\text{pH} + 0.012\lg \text{SOM} - 0.029\lg \text{CEC} + 0.186\lg \text{Cd}_{\text{available}} + 2.368$	0.573	>0.05

注: 土壤有效镉用 $\text{Cd}_{\text{available}}$ 表示。

3 结论

1) 田间条件下, 土壤有效镉和 SOM 与稻米镉的 BCF 呈极显著正相关($P<0.01$), 相关系数分别为 0.395 和 0.474; pH 与其呈极显著负相关($P<0.01$), 相关系数为 -0.470; CEC 与其呈显著负相关($P<0.05$), 相关系数为 -0.200。

2) 土壤 pH 对稻米镉富集的影响过程具体表现: 当 $\text{pH}<5.5$ 时, 稻米镉的富集能力最强; $5.5\leq\text{pH}<6.5$ 时, 稻米对镉的富集能力开始下降, 但降幅不明显; 而当 $\text{pH}\geq 6.5$, 稻米对镉的富集能力呈先急剧下降后趋于平缓的趋势。

3) 通过多元回归分析, 基于土壤有效镉、pH 和 SOM 构建的三因子定量关系模型 $\lg BCF = -0.346\text{pH} + 0.013\lg \text{SOM} + 0.181\lg \text{Cd}_{\text{available}} + 2.001$ ($R^2=0.560$, $P<0.01$, $n=112$) 对我国南方水稻产地稻米镉含量和土壤镉生态安全阈值的预测达到了极显著水平。

参考文献:

- [1] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [2] Zhi Y Y, Li P, Shi J C, et al. Source identification and apportionment of soil cadmium in cropland of Eastern China: A combined approach of models and geographic information system[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(2): 467-475.
- [3] 蒋逸骏, 胡雪峰, 舒颖, 等. 湘北某镇农田土壤—水稻系统重金属累积和稻米食用安全研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 410-420.
- [4] Li C S, Salas W, DeAngelo B, et al. Assessing alternatives for mitigating net greenhouse gas emissions and increasing yields from rice production in China over the next twenty years[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(4): 1554-1565.
- [5] 张燕, 黄奇娜, 邵国胜, 等. 水稻镉污染相关农艺调控技术研究与应用进展[J]. 中国稻米, 2021, 27(2): 15-20.

- [6] 石一珺, 徐颖菲, 倪中应, 等. 杭州市主要农作物对镉的富集差异及其影响因素[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(7): 1230-1233.
- [7] 孙聪, 陈世宝, 宋文恩, 等. 不同品种水稻对土壤中镉的富集特征及敏感性分布(SSD)[J]. 中国农业科学, 2014, 47(12): 2384-2394.
- [8] 范中亮, 季辉, 杨菲, 等. 不同土壤类型下 Cd 和 Pb 在水稻籽粒中累积特征及其环境安全临界值[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 792-797.
- [9] 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.
- [10] 易亚科, 周志波, 陈光辉. 土壤酸碱度对水稻生长及稻米镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 428-436.
- [11] 陈楠, 张昊, 杨慧敏, 等. 土壤 pH 对土壤镉形态及稻米镉积累的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(2): 176-182, 209.
- [12] 杜彩艳, 祖艳群, 李元. pH 和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(4): 539-543.
- [13] 廖启林, 刘聪, 王轶, 等. 水稻吸收 Cd 的地球化学控制因素研究——以苏锡常典型区为例[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1621-1632.
- [14] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第 2 部分: 土壤 pH 的测定: NY/T 1121.2—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [15] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第 6 部分: 土壤有机质的测定: NY/T 1121.2-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [16] 国家林业局. 森林土壤阳离子交换量的测定: LY/T 1243—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [17] 中华人民共和国环境保护部. 固体废物 金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法: HJ 766—2015[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化委员会. 土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法: GB/T 23739—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中多元素的测定: GB 5009.268—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [20] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5562-5570.
- [21] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准: GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [22] 朱晓龙. 湘中某工矿区土壤、水稻镉污染特征与迁移规律[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- [23] 李志涛, 王夏晖, 赵玉杰, 等. 南方典型区域水稻镉富集系数差异影响因素探析[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(10): 1-7.
- [24] 侯艺璇. 运积型地质高背景土壤—水稻系统 Cd 空间分布及影响因素研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [25] 冯金飞. 高速公路沿线农田土壤和作物的重金属污染特征及规律[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [26] 颜世红. 酸化土壤中镉化学形态特征与钝化研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
- [27] 罗文贱, 张政勤, 陈勇, 等. 连续解吸中离子强度对可变电荷土壤和高岭石体系 pH 的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 146-154.
- [28] 康六生. 土壤 pH 淹水调控与低镉积累品种在水稻大田生产上的降镉效果[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(20): 110-112, 128.
- [29] 陈守莉, 孙波, 王平祖, 等. 污染水稻土中重金属的形态分布及其影响因素[J]. 土壤, 2007, 39(3): 375-380.
- [30] Caporale A G, Violante A. Chemical processes affecting the mobility of heavy metals and metalloids in soil environments[J]. Current Pollution Reports, 2016, 2(1): 15-27.
- [31] 和君强, 贺前锋, 刘代欢, 等. 土壤镉食品卫生安全阈值影响因素及预测模型——以长沙某地水稻土为例[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1181-1194.
- [32] Salati S, Quadri G, Tambone F, et al. Fresh organic matter of municipal solid waste enhances phytoextraction of heavy metals from contaminated soil[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1899-1906.
- [33] 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.
- [34] 张磊, 宋凤斌. 土壤吸附重金属的影响因素研究现状及展望[J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 628-631.
- [35] 杨阳, 王美娥, 李艳玲, 等. 基于转移方程的蔬菜镉累积预测和土壤风险阈值推导[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 603-608.
- [36] 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯. 稻田土壤性质与稻米镉含量的定量关系[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1918-1925.
- [37] 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.
- [38] 赵科理. 土壤-水稻系统重金属空间对应关系和定量模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [39] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 叶菜类蔬菜产地镉环境质量类别划分技术研究[J]. 中国环境科学, 2020, 40(9): 3942-3951.
- [40] 王科, 李浩, 张成, 等. 不同类型土壤下水稻镉的富集特征及与土壤镉含量的关系[J]. 四川农业科技, 2018(11): 38-40.
- [41] 王美娥, 彭驰, 陈卫平. 水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4283-4290.