doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21169

南方典型镉污染稻田土壤有效态镉预测模型研究

周峻宇¹,谷 雨¹,刘琼峰¹,吴海勇¹,周 旋¹,唐珍琦²,李明德^{1*} (1. 湖南省土壤肥料研究所,湖南 长沙 410125; 2. 湖南省土壤肥料工作站,湖南 长沙 410006)

摘 要:为了更好地指导重金属镉污染稻田实施土壤修复、管控土壤镉毒害风险,以我国南方典型镉污染稻田为研究对象,基于 316 个监测点位的土壤镉及理化性质指标测定,分析土壤有效态镉含量与土壤理化因子间的相互关系,并通过逐步多元回归方程,建立稻田土壤有效态镉的预测模型。结果表明,土壤总镉、有效锌、有效硫、有效磷及有效铜是影响南方稻田土壤有效态镉含量的主要因素。通过区域调研,借助逐步回归分析得到南方稻田土壤有效态镉含量的预测模型方程:Cd_{ext}=-0.006+0.371(Cd_{tot})+0.014(A-Zn)+0.001(A-S)-0.001(A-P)+0.006(A-Cu),模型预测达极显著水平(P<0.001),决定系数(R²)为0.745。故以上述 5 个土壤因子建立的回归模型可实现较好的预测水平,为镉污染稻田的土壤修复提供参考。 关键词:镉污染稻田;有效态镉;影响因素;预测模型

近 30 年来,我国工业化发展迅猛,导致了南方 部分地区农田土壤极其严重的镉污染问题^[1]。2014 年全国土壤污染状况调查公报显示,耕地土壤点 位超标率为19.4%,其中,点位镉污染超标率高达 7.0%,污染最为突出^[2-3]。农田土壤镉污染会造成 稻米镉含量超标,尤其在南方部分地区,稻米镉超 标现象比较严重,危害了农产品安全,也威胁了人 体健康^[4]。当前,我国约有10%的稻米镉含量超出 国家食品安全标准限定值^[5],且主要分布在南方稻 区。一般而言,水稻吸收的镉与土壤全量镉含量密 切相关, 但更多取决于其在土壤中的赋存形态, 而 存在形态的变化直接决定其活性、生物毒性及迁移 特征。已有研究^[6-8]表明,相对于全镉而言,土壤 有效态镉与稻米镉含量的相关性更好,可更好反映 土壤镉的移动性及植物吸收积累的风险。土壤有效 态镉在很大程度上是植物对重金属镉积累的关键及 决定性因素^[9]。因此,针对南方稻区的污染现状, 明确土壤有效态镉含量的关键制约因素,建立土壤 有效态镉含量的预测模型,对准确评估稻田土壤镉

收稿日期: 2021-03-19; 录用日期: 2021-06-01

污染风险乃至保障稻米食品安全具有重要意义。

目前,通过逐步回归分析建立的经验模型,是 描述土壤-作物重金属传输的重要分析模型之一。 通常基于土壤重金属全量及基本理化性质对土壤离 子态、溶解态重金属含量进行估计,进而估算植 物体中的重金属含量^[10]。经验模型所需参数较少、 建模简易及精度高,因而被广泛应用。其中,考虑 的因子主要有土壤 pH、有机质及重金属含量,也 有考虑土壤阳离子交换量、粘粒含量及土壤锌含量 等。熊婕等^[11]利用 pH 等土壤理化因子及土壤镉 含量共同构建稻米镉含量的预测模型,模型预测效 果较好, 日发现土壤有效态镉是南方稻区稻米镉累 积的关键因子。基于此,本研究以湖南省典型镉污 染稻区为研究对象,通过大数据分析,探讨影响稻 田土壤有效态镉含量的主要因素,以期建立基于土 壤理化性质的南方稻田土壤有效态镉的预测模型, 为指导重金属镉污染稻田实施土壤修复、管控土壤 镉毒害风险提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与预处理

本研究样品采集于湖南省长株潭区域的13 个县(市、区),供试土壤主要由石灰岩风化物 (n=12)、紫色砂页岩风化物(n=43)、河流冲积 物(n=85)、第四纪红色粘土(n=94)、板页岩风 化物(n=29)、砂岩风化物(n=5)及花岗岩风化 物(n=48)7种成土母质发育而来,均为南方稻田 — 215—

基金项目:湖南省土壤肥料研究所所长基金项目(2020tfs203、2020tfs102);湖南省自然科学基金(2020JJ5320);湖南省农业科技创新资金项目(2019LS03-4);湖南省财政资金项目(湘财农指[2017]153号,湘财农指[2018]83号)。

作者简介:周峻宇(1987-),助理研究员,博士,主要从事土壤 资源利用与农业生态环境研究。E-mail:zjy00001@126.com。 通知体表,查明德, E-mail:limingle460@sebu.sem

通讯作者: 李明德, E-mail: limingde460@sohu.com。

土壤典型的母质类型;水稻土亚类包括漂白性水稻 土(n=8)、潜育性水稻土(n=31)、淹育性水稻土 (n=31)及潴育性水稻土(n=246)4种,均为南方 稻田土壤的典型土壤类型。

晚稻收割后在每个采样点按"S"形取样法采 集各监测点的0~20 cm 混合土壤样品,共采集 316个土壤样品。采集后用样品袋密封保存,并 记录每个监测点的采集时间及地点后带回实验室。 土壤样品经去除异物后自然风干,研磨并分别过 1.70、0.25及0.15 mm 尼龙筛后密封保存待测。

1.2 测定指标与方法

土壤 pH、有机质、阳离子交换量、全氮、有 效磷及速效钾的测定方法均参照《土壤农化分 析》^[12];土壤有效硫、有效硅分别采用磷酸盐 – 乙 酸、柠檬酸浸提 – 分光光度法测定(NY/T 1121.14– 2006; NY/T 1121.15–2006);土壤有效铁、锰、铜、 锌均采用 DTPA 浸提 – 原子吸收分光光度法测定 (NY/T 890–2004);土壤有效硼、钼分别采用煮沸浸 提 – 甲亚胺 – H 比色法、草酸 – 草酸铵浸提 – 极谱 仪法测定(NY/T 1121.8–2006; NY/T 1121.9–2012); 土壤交换性钙、镁均采用乙酸铵浸提 – 原子吸收分 光光度法测定(NY/T 1121.14–2006);土壤总镉采用 王水提取 – 电感耦合等离子体质谱法测定(HJ 803– 2016); 土壤有效态镉采用 DTPA 浸提 – 火焰原子吸收分光光度法测定(GB/T 23739-2009)。

1.3 数据分析与处理

所有图表及数据分析均采用 Excel 2013、SigmaPlot 14.0 及 SPSS 20.0;采用斯皮尔曼分析法分析土壤 因子间的相关系数;逐步回归分析借助 SPSS 20.0 进行。

2 结果与分析

2.1 土壤污染概况

供试土壤基本理化性质如表 1 所示,以酸性土 为主,土壤有机质、阳离子交换量、全氮等基本性 质差异较大。供试土壤镉含量以中轻度污染为主, 平均含量为 0.41 mg·kg⁻¹,超过《土壤环境质量标 准》(GB 15618—2018)^[13]中二级标准限定值 1 倍 以内(0.3~0.6 mg·kg⁻¹)的点位 162 个,超标 1~3 倍(0.6~1.2 mg·kg⁻¹)的点位 34 个,超标 3 倍以上 (>1.2 mg·kg⁻¹)的点位 6 个。土壤有效态镉平均值 为 0.21 mg·kg⁻¹,最小值及最大值分别为 0.03 及 1.06 mg·kg⁻¹,变异系数为 70%,属于中等变异。

2.2 土壤有效态镉与理化性质的相关关系

将土壤有效态镉与各项理化性质指标进行斯皮 尔曼分析(表2)发现,土壤有效态镉含量与土壤

指标	平均值	中值	标准误差	极小值	极大值
рН	5.84	5.82	0.03	4.78	7.43
有机质 (g・kg ⁻¹)	40.58	40.93	0.51	18.43	69.05
阳离子交换量(g・kg ⁻¹)	13.70	12.29	0.26	5.08	25.54
全氮 $(g \cdot kg^{-1})$	2.08	2.13	0.03	0.45	3.49
有效磷 (mg・kg ⁻¹)	54.61	61.27	1.80	5.52	150.88
速效钾 (mg・kg ⁻¹)	109.88	103.93	2.00	32.03	287.31
有效硫 (mg・kg ⁻¹)	32.14	23.14	1.16	5.51	195.90
有效硅 (mg・kg ⁻¹)	108.28	102.78	1.90	35.76	266.79
有效铁 (mg・kg ⁻¹)	156.01	130.98	5.92	16.79	541.06
有效锰 (mg・kg ⁻¹)	31.09	21.25	1.76	0.57	205.69
有效铜 (mg・kg ⁻¹)	3.23	2.90	0.11	0.69	19.58
有效锌 (mg・kg ⁻¹)	3.60	2.68	0.18	0.59	29.27
有效硼 (mg・kg ⁻¹)	0.19	0.16	0.01	0.06	0.90
有效钼 (mg・kg ⁻¹)	0.11	0.11	0.01	0.01	0.80
交换性钙 (cmol · kg ⁻¹)	17.11	15.44	0.66	1.90	57.93
交换性镁 (cmol · kg ⁻¹)	0.92	0.75	0.03	0.13	3.96
$\mathrm{Cd}_{\mathrm{tot}} \ (\ \mathrm{mg} \ \cdot \ \mathrm{kg}^{-1} \)$	0.41	0.34	0.01	0.14	1.69
$Cd_{ext} (mg \cdot kg^{-1})$	0.21	0.18	0.01	0.03	1.06

表1 供试土壤基本性质及土壤镉含量

注: Cd_{tot} 及 Cd_{ext} 分别表示土壤总镉及有效态镉。下同。

-216 -

有机质	日南子															
	交换量	全氮	有效磷	速效钾	有效硫	有效硅	有效铁	有效锰	有效铜	有效锌	有效硼	有效钼	交換 性钙	交 拚 策	$\mathrm{Cd}_{\mathrm{tot}}$	$\mathrm{Cd}_{\mathrm{ext}}$
1																
0.028	1															
0.214	.0.149	1														
** 0.007	0.315**	0.157^{**}	1													
660.0-	0.227**	-0.037	0.107	1												
0.031	-0.312**	-0.159**	-0.690	-0.095	1											
** 0.022	0.084	0.163*	-0.001	0.061	0.015	1										
** 0.105	-0.120^{*}	-0.171**	-0.272**	-0.013	0.286^{**}	-0.258**	1									
0.051	-0.121	-0.096	-0.612**	-0.065	0.571**	0.030	0.499**	1								
* 0.123*	0.020	-0.048	-0.030	0.054	0.103	-0.064	0.538**	0.239**	1							
°° 0.141	-0.074	-0.087	-0.348**	-0.046	0.334^{**}	-0.130^{*}	0.585**	0.520^{**}	0.596**	1						
0.005	0.046	0.111^{*}	-0.110	0.106	0.089	0.047	0.052	0.117^{*}	0.055	-0.013	1					
0.027	0.050	0.127^{*}	0.045	0.134^{*}	-0.032	0.031	0.054	0.074	0.172**	0.080	0.046	-				
** 0.047	0.438**	0.282**	0.654**	0.094	-0.602**	0.148**	-0.407**	-0.485**	-0.063	-0.388**	-0.012	0.170^{**}	1			
0.028	0.372**	0.251**	0.195**	0.147^{**}	-0.161**	0.215**	-0.174**	-0.167**	-0.002	-0.176**	0.011	0.016	0.505**	1		
0.242**	* 0.078	0.220^{**}	-0.122*	0.013	0.178**	0.162**	-0.004	0.225**	0.119*	0.298**	0.041	0.039	0.044	0.168**	1	
0.165	0.096	-0.036	-0.417**	-0.028	0.456**	-0.004	0.406**	0.532^{**}	0.490^{**}	0.656"	0.053	0.086	-0.312**	-0.040	0.555***	1
[著,** 表示	示在 0.01 水	。 握 进														
	0.028 0.014^{*} 0.214^{*} 0.007 0.031 0.022 0.021 0.141^{*} 0.047 0.027 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.028 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008 0.008	 0.028 1 0.214* 0.149* 0.214* 0.149* 0.007 0.315* 0.0031 -0.312* 0.031 -0.312* 0.031 -0.312* 0.031 -0.312* 0.022 0.084 0.105 -0.120* 0.123* 0.020 0.141* -0.074 0.165* -0.096 144* ** 表示在 0.01 水 	 0.028 1 0.214" 0.149" 1 0.214" 0.149" 1 0.007 0.315" 0.157" 0.0031 0.227" -0.037 0.031 -0.312" -0.159" 0.031 -0.120° -0.171" 0.022 0.084 0.163" 0.105 -0.120° -0.171" 0.105 0.044 0.111" 0.123* 0.020 -0.048 0.141* -0.074 -0.087 0.141* -0.074 -0.087 0.141* 0.074 0.121" 0.123* 0.220 0.046 0.111 0.027 0.050 0.127″ 0.123* 0.020 0.111″ 0.141* 0.074 0.087 0.141* 0.074 0.087 0.123* 0.020 0.1242" 0.078 0.220" 0.242" 0.078 0.251" 0.165* -0.096 -0.036 145* ** 表示在: 0.01 水平显著。 	0.028 1 0.0214 ⁴⁺ 0.149 ⁴⁺ 1 0.0214 ⁴⁺ 0.149 ⁴⁺ 1 0.0214 ⁴⁺ 0.149 ⁴⁺ 1 0.011 0.215 ⁴⁺ 0.157 ⁴⁺ 1 0.002 0.315 ⁴⁺ 0.167 ⁴⁺ 1 0.0031 0.227 ⁴⁺ 0.167 ⁴⁺ 1 0.0031 0.227 ⁴⁺ 0.163 ⁴⁺ 0.107 ⁴⁺ 0.0103 0.221 ⁴⁺ 0.163 ⁴⁺ 0.107 ⁴⁺ 0.0103 0.022 0.034 0.163 ⁴⁺ 0.0690 ⁴⁺ 0.0103 0.0121 ⁴⁺ 0.0120 ⁴⁺ 0.027 ⁴⁺ 0.034 ⁴⁺ 0.0111 ⁴⁺ 0.0121 ⁴⁺ 0.028 ⁴⁺ 0.111 ⁴⁺ 0.110 ⁴⁺ 0.0124 ⁴⁺ 0.028 ⁴⁺ 0.127 ⁴⁺ 0.195 ⁴⁺ 0.195 ⁴⁺ 0.0242 ⁴⁺ 0.028 ⁴⁺ 0.2220 ⁴⁺ 0.195 ⁴⁺ 0.195 ⁴⁺ 0.0224 ⁴⁺ 0.028 ⁴⁺ 0.2220 ⁴⁺ 0.195 ⁴⁺ 0.195 ⁴⁺ 0.0224 ⁴⁺ 0.023 ⁴⁺ 0.2220 ⁴⁺ 0.195 ⁴⁺ 0.195 ⁴⁺ 1	0 0.028 1 0 0.214 ^{4*} 0.149 ^{4*} 1 0 0.214 ^{4*} 0.149 ^{4*} 1 0 0.214 ^{4*} 0.149 ^{4*} 1 1 -0.099 0.215 ^{4*} 0.167 ^{4*} 1 1 -0.099 0.227 ^{4*} -0.037 0.107 1 1 -0.099 0.227 ^{4*} -0.037 0.107 1 1 -0.099 0.227 ^{4*} -0.037 0.107 1 1 -0.0120 0.120 ^{4*} -0.037 0.001 1 1 -0.0121 -0.0120 ^{4*} -0.0131 -0.0131 1 1 -0.121 ^{4*} -0.121 ^{4*} -0.0131 1 1 1 -0.0123 ^{4*} 0.123 ^{4*} -0.0130 0.0131 1 1 -0.0124 ^{4*} -0.0131 -0.0130 0.0144 1 1 1 -0.025 0.123 ^{4*} -0.014 0.024 ^{4*} 0.0164 1 1	0 0.028 1 0 0.214" 0.149" 1 0 0.214" 0.149" 1 1 0.007 0.315" 0.157" 1 1 -0.099 0.315" 0.157" 1 1 -0.099 0.227" -0.037 0.107 1 1 -0.099 0.227" -0.037 0.107 1 1 -0.099 0.227" -0.037 0.107 1 1 -0.091 0.153" 0.107 1 1 1 -0.094 0.154" -0.095 0.015 0.015 1 -0.120" -0.121" -0.0161 0.015 0.286" 1 0.1051 -0.121" -0.017" -0.232" 0.261" 1 0.111" -0.0141" -0.0141 0.0165 0.286" 1 0.0151 -0.0150 0.0152 0.0165 0.107" 1 0.0161 0.0165 0.0164 </th <th>0° 0.028 1 0° 0.024* 0.149° 1 8° 0.014* 0.149° 1 8° 0.021 0.157* 1 8° 0.007 0.315* 0.157* 1 9° 0.019 0.315* 0.157* 1 9° 0.001 0.315* 0.157* 1 9° 0.003 0.315* 0.159* 0.107 1 9° 0.031 -0.312* -0.037 0.107 1 9° 0.031 -0.312* -0.037 0.107 1 9° 0.031 -0.312* 0.163* 0.001 0.065 1 9° 0.031 -0.222* 0.031 0.032 1 9° 0.123* 0.020 -0.048 0.033 1 9° 0.124* 0.020 0.047 0.034 0.034 9° 0.012* 0.028 0.028* 0.034* 0.034* 0.034</th> <th>0 0.028 1 1 0.149¹ 1 2 0.214¹ 0.149¹ 1 1 -0.099 0.315¹ 0.157¹ 1 1 -0.099 0.315¹ 0.157¹ 1 1 -0.099 0.227¹ 0.037 0.107 1 1 -0.099 0.237¹ 0.157¹ 1 1 1 -0.099 0.237¹ 0.157¹ 1 1 1 -0.099 0.237¹ 0.157¹ 0.095 1 1 -0.0131 -0.159¹ -0.059¹ -0.099 1 1 -0.0131 -0.151¹ -0.0131 0.266¹ 0.268¹ 1 1 0.102 0.0131 -0.0131 -0.0131 0.266¹ 0.586¹ 1 1 0.114¹ -0.0141 0.134¹ 0.134¹ 0.134¹ 0.586¹ 1 0.125¹ 0.026 0.126¹ 0.127¹ 0.134</th> <th>0* 0.028 1 5* 0.214* 0.149* 1 6* 0.214* 0.149* 1 7* 0.020 0.315* 0.157* 1 6* 0.214* 0.149* 1 7* 0.010 0.315* 0.157* 1 9* 0.001 0.315* 0.107 1 7* 0.031 0.315* 0.107 1 7* 0.031 0.315* 0.107 1 7* 0.031 0.315* 0.107 1 7* 0.031 0.315* 0.030 0.107 1 7* 0.031 0.120* 0.051* 0.030 0.258* 0.239* 7* 0.114* 0.120* 0.0140* 0.103 0.258* 0.239* 7* 0.123* 0.020 0.144* 0.133* 0.238* 0.238* 7* 0.124* 0.124* 0.134* 0.134* 0.235* 0.248*</th> <th>0 0.028 1 5 0.214⁴ 0.149⁵ 1 6 0.214⁴ 0.149⁵ 1 7 0.007 0.315⁷ 0.157⁴ 1 6 0.019 0.215⁷ 0.157⁴ 1 7 0.019 0.215⁷ 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.228⁴ 0.163 0.049 1 7 0.010 0.010 0.010 0.010 0.036 0.238⁴ 0.239⁴ 1 7 0.012 0.014⁴ 0.017 0.025 0.031 0.239⁴ 1 7 0.012⁴ 0.013⁴ 0.013⁴ 0.031⁴ 0.039⁴ 1 8 0.012⁴ 0.036⁴ 0.031⁴ 0.031⁴ 0.039⁴ 1 9 0.014⁴ 0.013⁴ 0.034⁴ 0.039⁴ 0.039⁴</th> <th>0° 0.028 1 0° 0.024 0.149° 1 0° 0.014° 0.149° 1 0° 0.014° 0.149° 1 0° 0.027 0.149° 1 0° 0.017 0.157° 1 0° 0.217° 0.157° 1 0° 0.227° 0.017 0.107 1 0° 0.031 -0.312° 0.159° -0.090 0.055 1 0° 0.031 -0.150° 0.0107 0.055 0.258° 1 0° 0.031 -0.150° 0.050 0.055 1 0° 0.016 0.055 0.258° 0.258° 0.250° 0.250° 0.035 0° 0.011 -0.025 0.012° 0.012° 0.013° 0.117° 0.055 1 0° 0.113° 0.124° 0.134° 0.134° 0.137° 0.013° 0° 0.114° 0.025</th> <th>0 0.028 1 2 0.214¹ 0.149¹ 1 6 0.214¹ 0.157¹ 1 7 0.007 0.215² 0.157¹ 1 8 0.007 0.215² 0.157¹ 1 9 0.019 0.215² 0.157¹ 1 9 0.010 0.157¹ 0.003 1 9 0.021 0.157¹ 0.003 1 1 -0.099 0.227¹ 0.003 0.003 1 1 -0.091 0.0103 0.003 1 1 -0.012 -0.151¹ -0.023 0.003 1 1 -0.012 0.103 0.054 0.123 0.236¹ 1 1 -0.013 0.013 0.023 0.013 0.239¹ 1 1 -0.014 0.013 0.023 0.013 0.239¹ 1 1 0.012 0.013 0.023</th> <th>0 0.028 1 1 0.14¹ 0.14³ 1 6 0.214¹ 0.14³ 1 7 0.214¹ 0.15¹ 1 8 0.017¹ 0.15¹ 1 9 0.017¹ 0.15¹ 1 1 0.018¹ 0.107¹ 1 1 0.018¹ 0.107¹ 0.017¹ 1 0.018¹ 0.107¹ 0.019¹ 1 1 0.012¹ 0.017¹ 0.008¹ 0.107¹ 1 0.012¹ 0.017¹ 0.019¹ 0.019¹ 1 1 0.012¹ 0.017¹ 0.017¹ 0.019¹ 0.019¹ 1 0.011¹ 0.011¹ 0.011¹ 0.011¹ 0.011¹ 0.011¹ 1 0.012¹ 0.012¹ 0.012¹ 0.012¹ 0.011¹ 0.011¹ 1 0.011¹ 0.011¹ 0.011¹ 0.011¹ 0.011¹ 0.011¹</th> <th>0 0.038 1 0 0.134⁺ 0.149⁺ 1 1 -0.009 0.157⁺ -0.039⁺ 0 0.011 -0.013⁺ -0.009 0.107⁺ 1 -0.012⁺ -0.019⁺ -0.009 0.107⁺ 1 1 -0.012⁺ -0.019⁺ -0.001 0.010⁺ 1 1 -0.012⁺ -0.019⁺ -0.019⁺ -0.039⁺ 1 1 -0.012⁺ -0.019⁺ 0.010⁺ 0.010⁺ 1 1 -0.012⁺ -0.013⁺ 0.010⁺ 0.010⁺ 1 1 -0.012⁺ -0.019⁺ 0.010⁺ 0.010⁺ 1 1 -0.011⁺ -0.010⁺ 0.010⁺ 0.010⁺ 1 1</th> <th>0 0.038 1 0 0.134 0.149' 1 1 -0.09 0.157' 0 1 1 -0.09 0.157' 0 1 1 -0.09 0.157' 0.107' 1 1 -0.09 0.157' 0.107' 1 1 -0.09 0.227' -0.018' 0.107' 1 1 -0.09 0.217' -0.09 0.010' 1 1 -0.018' 0.107' 1 1 1 1 -0.018' 0.107' 1 1 1 1 -0.018' 0.107' 1 1 1 1 -0.018' 0.107' 1 1 1 1 -0.018' 0.107' 1 1 1 1 -0.012' 0.010' 0.013' 1 1 1 -0.011' 0.012' 0.013' 0.039' 1 1</th> <th>0 0.038 1 0 0.136 0.149' 1 1 0.107 0.137' 0.137' 1 1 0.030 0.137' 0.137' 1 1 0.030 0.137' 0.137' 1 1 0.030' 0.137' 0.137' 1 1 0.030' 0.107 0.107 1 1 0.030' 0.030' 0.030' 1 1 0.018' 0.107 0.030' 0.030' 1 1 0.010' 0.010' 0.010' 0.100' 0.100' 1 1 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 1 1 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 1 0.010' 0.010' 0.010' 0.020' 0.020' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.</th>	0° 0.028 1 0° 0.024* 0.149° 1 8° 0.014* 0.149° 1 8° 0.021 0.157* 1 8° 0.007 0.315* 0.157* 1 9° 0.019 0.315* 0.157* 1 9° 0.001 0.315* 0.157* 1 9° 0.003 0.315* 0.159* 0.107 1 9° 0.031 -0.312* -0.037 0.107 1 9° 0.031 -0.312* -0.037 0.107 1 9° 0.031 -0.312* 0.163* 0.001 0.065 1 9° 0.031 -0.222* 0.031 0.032 1 9° 0.123* 0.020 -0.048 0.033 1 9° 0.124* 0.020 0.047 0.034 0.034 9° 0.012* 0.028 0.028* 0.034* 0.034* 0.034	0 0.028 1 1 0.149 ¹ 1 2 0.214 ¹ 0.149 ¹ 1 1 -0.099 0.315 ¹ 0.157 ¹ 1 1 -0.099 0.315 ¹ 0.157 ¹ 1 1 -0.099 0.227 ¹ 0.037 0.107 1 1 -0.099 0.237 ¹ 0.157 ¹ 1 1 1 -0.099 0.237 ¹ 0.157 ¹ 1 1 1 -0.099 0.237 ¹ 0.157 ¹ 0.095 1 1 -0.0131 -0.159 ¹ -0.059 ¹ -0.099 1 1 -0.0131 -0.151 ¹ -0.0131 0.266 ¹ 0.268 ¹ 1 1 0.102 0.0131 -0.0131 -0.0131 0.266 ¹ 0.586 ¹ 1 1 0.114 ¹ -0.0141 0.134 ¹ 0.134 ¹ 0.134 ¹ 0.586 ¹ 1 0.125 ¹ 0.026 0.126 ¹ 0.127 ¹ 0.134	0* 0.028 1 5* 0.214* 0.149* 1 6* 0.214* 0.149* 1 7* 0.020 0.315* 0.157* 1 6* 0.214* 0.149* 1 7* 0.010 0.315* 0.157* 1 9* 0.001 0.315* 0.107 1 7* 0.031 0.315* 0.107 1 7* 0.031 0.315* 0.107 1 7* 0.031 0.315* 0.107 1 7* 0.031 0.315* 0.030 0.107 1 7* 0.031 0.120* 0.051* 0.030 0.258* 0.239* 7* 0.114* 0.120* 0.0140* 0.103 0.258* 0.239* 7* 0.123* 0.020 0.144* 0.133* 0.238* 0.238* 7* 0.124* 0.124* 0.134* 0.134* 0.235* 0.248*	0 0.028 1 5 0.214 ⁴ 0.149 ⁵ 1 6 0.214 ⁴ 0.149 ⁵ 1 7 0.007 0.315 ⁷ 0.157 ⁴ 1 6 0.019 0.215 ⁷ 0.157 ⁴ 1 7 0.019 0.215 ⁷ 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.037 0.228 ⁴ 0.163 0.049 1 7 0.010 0.010 0.010 0.010 0.036 0.238 ⁴ 0.239 ⁴ 1 7 0.012 0.014 ⁴ 0.017 0.025 0.031 0.239 ⁴ 1 7 0.012 ⁴ 0.013 ⁴ 0.013 ⁴ 0.031 ⁴ 0.039 ⁴ 1 8 0.012 ⁴ 0.036 ⁴ 0.031 ⁴ 0.031 ⁴ 0.039 ⁴ 1 9 0.014 ⁴ 0.013 ⁴ 0.034 ⁴ 0.039 ⁴ 0.039 ⁴	0° 0.028 1 0° 0.024 0.149° 1 0° 0.014° 0.149° 1 0° 0.014° 0.149° 1 0° 0.027 0.149° 1 0° 0.017 0.157° 1 0° 0.217° 0.157° 1 0° 0.227° 0.017 0.107 1 0° 0.031 -0.312° 0.159° -0.090 0.055 1 0° 0.031 -0.150° 0.0107 0.055 0.258° 1 0° 0.031 -0.150° 0.050 0.055 1 0° 0.016 0.055 0.258° 0.258° 0.250° 0.250° 0.035 0° 0.011 -0.025 0.012° 0.012° 0.013° 0.117° 0.055 1 0° 0.113° 0.124° 0.134° 0.134° 0.137° 0.013° 0° 0.114° 0.025	0 0.028 1 2 0.214 ¹ 0.149 ¹ 1 6 0.214 ¹ 0.157 ¹ 1 7 0.007 0.215 ² 0.157 ¹ 1 8 0.007 0.215 ² 0.157 ¹ 1 9 0.019 0.215 ² 0.157 ¹ 1 9 0.010 0.157 ¹ 0.003 1 9 0.021 0.157 ¹ 0.003 1 1 -0.099 0.227 ¹ 0.003 0.003 1 1 -0.091 0.0103 0.003 1 1 -0.012 -0.151 ¹ -0.023 0.003 1 1 -0.012 0.103 0.054 0.123 0.236 ¹ 1 1 -0.013 0.013 0.023 0.013 0.239 ¹ 1 1 -0.014 0.013 0.023 0.013 0.239 ¹ 1 1 0.012 0.013 0.023	0 0.028 1 1 0.14 ¹ 0.14 ³ 1 6 0.214 ¹ 0.14 ³ 1 7 0.214 ¹ 0.15 ¹ 1 8 0.017 ¹ 0.15 ¹ 1 9 0.017 ¹ 0.15 ¹ 1 1 0.018 ¹ 0.107 ¹ 1 1 0.018 ¹ 0.107 ¹ 0.017 ¹ 1 0.018 ¹ 0.107 ¹ 0.019 ¹ 1 1 0.012 ¹ 0.017 ¹ 0.008 ¹ 0.107 ¹ 1 0.012 ¹ 0.017 ¹ 0.019 ¹ 0.019 ¹ 1 1 0.012 ¹ 0.017 ¹ 0.017 ¹ 0.019 ¹ 0.019 ¹ 1 0.011 ¹ 0.011 ¹ 0.011 ¹ 0.011 ¹ 0.011 ¹ 0.011 ¹ 1 0.012 ¹ 0.012 ¹ 0.012 ¹ 0.012 ¹ 0.011 ¹ 0.011 ¹ 1 0.011 ¹ 0.011 ¹ 0.011 ¹ 0.011 ¹ 0.011 ¹ 0.011 ¹	0 0.038 1 0 0.134 ⁺ 0.149 ⁺ 1 1 -0.009 0.157 ⁺ -0.039 ⁺ 0 0.011 -0.013 ⁺ -0.009 0.107 ⁺ 1 -0.012 ⁺ -0.019 ⁺ -0.009 0.107 ⁺ 1 1 -0.012 ⁺ -0.019 ⁺ -0.001 0.010 ⁺ 1 1 -0.012 ⁺ -0.019 ⁺ -0.019 ⁺ -0.039 ⁺ 1 1 -0.012 ⁺ -0.019 ⁺ 0.010 ⁺ 0.010 ⁺ 1 1 -0.012 ⁺ -0.013 ⁺ 0.010 ⁺ 0.010 ⁺ 1 1 -0.012 ⁺ -0.019 ⁺ 0.010 ⁺ 0.010 ⁺ 1 1 -0.011 ⁺ -0.010 ⁺ 0.010 ⁺ 0.010 ⁺ 1 1	0 0.038 1 0 0.134 0.149' 1 1 -0.09 0.157' 0 1 1 -0.09 0.157' 0 1 1 -0.09 0.157' 0.107' 1 1 -0.09 0.157' 0.107' 1 1 -0.09 0.227' -0.018' 0.107' 1 1 -0.09 0.217' -0.09 0.010' 1 1 -0.018' 0.107' 1 1 1 1 -0.018' 0.107' 1 1 1 1 -0.018' 0.107' 1 1 1 1 -0.018' 0.107' 1 1 1 1 -0.018' 0.107' 1 1 1 1 -0.012' 0.010' 0.013' 1 1 1 -0.011' 0.012' 0.013' 0.039' 1 1	0 0.038 1 0 0.136 0.149' 1 1 0.107 0.137' 0.137' 1 1 0.030 0.137' 0.137' 1 1 0.030 0.137' 0.137' 1 1 0.030' 0.137' 0.137' 1 1 0.030' 0.107 0.107 1 1 0.030' 0.030' 0.030' 1 1 0.018' 0.107 0.030' 0.030' 1 1 0.010' 0.010' 0.010' 0.100' 0.100' 1 1 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 1 1 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 1 0.010' 0.010' 0.010' 0.020' 0.020' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.010' 0.

-217 -

pH、有效磷及交换性钙呈极显著负相关关系 (P<0.01),且与土壤有效磷相关关系最为紧密,相 关系数(r)为-0.417;与之相比,土壤有效态镉与 土壤有机质、有效态硫、铁、锰、铜、锌及总镉均 呈极显著正相关关系(P<0.01),且与总镉及有效 锌相关关系最为紧密,相关系数(r)分别为0.555 及0.656。除此之外,其他土壤性质指标(阳离子 交换量、全氮、速效钾、有效硅、有效硼、有效钼 及交换性镁)与土壤有效态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 pH、有机质、总镉、有效态磷、硫、铁、锰、铜、 锌及交换性钙可能是影响土壤有效态镉含量的重要 因子。

2.3 土壤有效态镉含量的预测模型

相关分析结果表明,土壤总镉及部分土壤理化 性质均显著影响土壤有效态镉含量,故将土壤理化 性质指标作为变量与土壤总镉含量结合起来,通 过多元回归分析构建土壤有效态镉含量的预测模型(表3)。与仅基于土壤总镉含量相比,土壤有效锌、有效硫、有效磷及有效铜依次进入回归方程后,相关系数(r)从0.766提高到0.863,且均达到极显著水平(P<0.001, n=316),模型的精确性得到逐步提升。从逐步回归分析结果可看出,基于土壤总镉、有效锌、有效硫、有效磷及有效铜建立的回归方程模型相关性最好,相关系数高达0.863,预测方程为:

Cd_{ext}=-0.006+0.371(Cd_{tot})+0.014(A-Zn)+ 0.001(A-S)-0.001(A-P)+0.006(A-Cu)(R²=0.745, P<0.001),式中A-Zn、A-S、A-P及A-Cu分别代 表有效锌、有效硫、有效磷及有效铜,此预测方程 对土壤有效态镉的预测效果最好,其他土壤因子如 土壤 pH、有机质、阳离子交换量、全氮等均未能 显著改善预测方程的相关性,故未加入土壤有效态 镉的预测模型中。

编号	线性预测方程	r	Р	SE
1	Cd_{ext} =0.014+0.484 (Cd_{tot})	0.766	< 0.001	0.095
2	Cd_{exi} =-0.009+0.484 (Cd_{tot}) +0.017 (A-Zn)	0.841	< 0.001	0.080
3	Cd_{ext} =-0.033+0.366 (Cd_{tot}) +0.015 (A -Zn) +0.001 (A -S)	0.857	< 0.001	0.076
4	Cd_xt=0.007+0.364 (Cd_{tot}) +0.015 (A–Zn) +0.001 (A–S) +0.001 (A–P)	0.860	< 0.001	0.076
5	$Cd_{ext} = -0.006 + 0.371 (Cd_{tot}) + 0.014 (A-Zn) + 0.001 (A-S) - 0.001 (A-P) + 0.006 (A-Cu)$	0.863	< 0.001	0.075

表 3 土壤有效态镉与土壤性质的逐步回归方程

注: Cd_{ext}为土壤有效态镉含量; Cd_{tut}为土壤总镉含量; A-Zn为土壤有效锌含量; A-S为土壤有效硫含量; A-P为土壤有效磷含量; A-Cu为土壤有效铜含量; r 为相关系数; P 为概率; SE 为标准误差。n=316。下同。

为了更好地评估土壤总镉、有效态锌、硫、 磷、铜对土壤有效态镉含量的影响,分别应用 这5个土壤因子对有效态镉进行单因子回归并得 到回归方程(表4)。土壤有效态镉含量与土壤 总镉、有效态锌、硫、铜含量均呈极显著正相 关(P<0.001),而与有效态磷含量呈极显著负相 关(P<0.001),可见,土壤总镉、有效态锌、硫、 磷、铜均能显著影响土壤有效态镉的含量。通过比 较这5个回归方程,土壤总镉含量对有效态镉含量 的解释程度要优于有效态锌、硫、磷、铜。基于这

编号	预测方程	R^2	Р	SE			
1	Cd_{exi} =0.014+0.484 (Cd_{tot})	0.587	<0.001	0.095			
2	Cd_{ext} =0.112+0.028 (A-Zn)	0.121	< 0.001	0.116			
3	Cd_{ext} =0.108+0.003 (A-S)	0.026	< 0.001	0.132			
4	Cd _{ext} =0.306-0.002 (A-P)	0.006	< 0.001	0.137			
5	Cd_{ext} =0.156+0.017 (A-Cu)	0.005	< 0.001	0.144			

表 4 土壤有效态镉与土壤性质的单因子回归方程

— 218 —

5个土壤因子的土壤有效态镉预测方程的决定系数 (*R*²)为0.745(表4),其中土壤总镉含量的*R*²为 0.587,对土壤有效态镉含量的解释程度占预测模 型的78.8%,其余4个土壤因子的*R*²分别为0.121、 0.026、0.006及0.005,可见,土壤总镉含量是影响 土壤有效态镉含量变化的关键因子。

此外,本研究针对不同成土母质及水稻土亚类 下土壤有效态镉含量与土壤理化指标间进行了回 归分析,以土壤有效态镉含量为因变量,土壤总 镉、有效态锌、硫、磷、铜为自变量,建立对应的 回归方程(表5、6)。结果表明,不同成土母质及 水稻土亚类下的土壤有效态镉预测模型均达到了极 显著水平(P<0.001),决定系数(R²)范围分别为 0.731~0.932及0.727~0.939,均可较好地预测 土壤有效态镉含量,标准误差(SE)的范围分别为 0.010~0.075及0.004~0.101,预测模型均有很 高的精确度和准确性。

成土母质类型	预测方程	R^2	Р	SE
石灰岩	$Cd_{ext} = 0.125 + 0.001 \ (\ Cd_{tot} \) \ + 0.007 \ (\ A - Zn \) \ + 0.001 \ (\ A - S \) \ - 0.001 \ (\ A - P \) \ + 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.010 \ (\ A - P \) \ + 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - P \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - P \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - 0.049 \ (\ A - Cu \) \ - $	0.731	<0.001	0.038
紫色砂页岩	$Cd_{ext} = -0.005 + 0.421 \ (\ Cd_{tot} \) \ +0.030 \ (\ A-Zn \) \ -0.001 \ (\ A-S \) \ -0.001 \ (\ A-P \) \ +0.023 \ (\ A-Cu \) \ -0.023 \ (\ A-Cu \) \ -0.001 \ (\ A-P \) \ +0.023 \ (\ A-Cu \) \ -0.001 \ (\ A-P \) \ +0.023 \ (\ A-Cu \) \ -0.001 \ (\ A-P \) \ +0.023 \ (\ A-Cu \) \ -0.001 \ (\ A-P \) \ +0.023 \ (\ A-Cu \) \ -0.001 \ (\ A-P \) \ +0.023 \ (\ A-Cu \) \ -0.001 \ (\ A-P \) \ +0.023 \ (\ A-Cu \) \ -0.001 \ (\ A-P \) \ +0.023 \ (\ A-Cu \) \ -0.001 \ (\ A-P \) \ +0.023 \ (\ A-Cu \) \ +0.023 \ (\ A-Cu \) \ -0.001 \ (\ A-P \) \ +0.023 \ (\ A-Cu \) \ +0.023 \ +0.023 \ (\ A-Cu \) \ +0.023 \ (\ A-Cu \) \ +0.023 \ (\ A-Cu \) \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 \ +0.023 $	0.824	< 0.001	0.075
河流冲积物	$\label{eq:cdest} Cd_{est} \mbox{=-}0.089 \mbox{+}0.190 \ (\ Cd_{tot} \) \ \mbox{+}0.036 \ (\ A \mbox{-}Zn \) \ \mbox{+}0.003 \ (\ A \mbox{-}S \) \ \mbox{+}0.001 \ (\ A \mbox{-}P \) \ \mbox{-}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{-}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{-}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{-}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{-}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{-}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{-}0.004 \ \mb$	0.733	< 0.001	0.069
第四纪红色粘土	$\label{eq:cdest} Cd_{est} = -0.059 + 0.529 \ (\ Cd_{tot} \) \ +0.010 \ (\ A-Zn \) \ +0.001 \ (\ A-S \) \ -0.001 \ (\ A-P \) \ +0.008 \ (\ A-Cu \) \ +0.008 \ +0.008 \ (\ A-Cu \) \ +0.008 \) \ +0.008 \ (\ A-Cu \) \ +0.008 \) \ +0.008 \ (\ A-Cu \) \ +0.008 \) \ +0.008 \) \ +0.008 \ (\ A-Cu \) \ +0.008 \) \ +0.008 \) \ +0.008 \) \ +0.008 \) \ +0.008 \) \ +0.008 \) \ +0.008 \) \ +0.008 \) \ +0.008 \) \ +0.008 \) \ +0.008 \) \ +0.008 \$	0.915	< 0.001	0.056
板页岩	$Cd_{ext}{=}0.010{+}0.210~(~Cd_{tot}~)~{+}0.011~(~A{-}Zn~)~{+}0.002~(~A{-}S~)~{+}0.001~(~A{-}P~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.001~(~A{-}P~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.001~(~A{-}P~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.001~(~A{-}P~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.001~(~A{-}P~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A{-}Cu~)~{+}0.004~(~A$	0.750	< 0.001	0.060
砂岩	$\label{eq:cdest} Cd_{ext} = -0.283 + 0.545 \ (\ Cd_{tot} \) \ +0.001 \ (\ A-Zn \) \ +0.004 \ (\ A-S \) \ +0.001 \ (\ A-P \) \ +0.027 \ (\ A-Cu \) \ +0.027 \ (\ A-Cu \) \ +0.027 \ (\ A-Cu \) \ +0.001 \ (\ A-Cu \) \ +0.00$	0.932	< 0.001	0.010
花岗岩	$Cd_{ext} = 0.014 + 0.310 \ (\ Cd_{tot} \) \ + 0.007 \ (\ A - Zn \) \ + 0.002 \ (\ A - S \) \ - 0.001 \ (\ A - P \) \ + 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ + 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ - 0.001 \ (\ A - Cu \) \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ - 0.001 \ -$	0.744	< 0.001	0.049

表 5 不同成土母质土壤有效态镉的预测方程

表 6 不同水稻土亚类土壤有效态镉的预测方程

水稻土亚类	预测方程	R^2	Р	SE
漂白性水稻土	$\mathrm{Cd}_{\mathrm{ext}} = 0.062 - 0.215 \ (\ \mathrm{Cd}_{\mathrm{tot}} \) \ -0.004 \ (\ \mathrm{A-Zn} \) \ +0.001 \ (\ \mathrm{A-S} \) \ -0.001 \ (\ \mathrm{A-P} \) \ +0.057 \ (\ \mathrm{A-Cu} \) \ +0.057 \) \ +0.057 \ (\ \mathrm{A-Cu} \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \ (\ \mathrm{A-Cu} \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ +0.057 \) \ $	0.939	<0.001	0.004
潜育性水稻土	$\label{eq:cdext} Cd_{ext} \mbox{=-}0.025 \mbox{+}0.187 \ (\ Cd_{tot} \) \ \mbox{+}0.052 \ (\ A \mbox{-}Zn \) \ \mbox{+}0.001 \ (\ A \mbox{-}S \) \ \mbox{+}0.001 \ (\ A \mbox{-}P \) \ \mbox{-}0.018 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{-}0.018 \ -$	0.898	< 0.001	0.101
淹育性水稻土	$\label{eq:cdest} Cd_{est} \mbox{=-}0.050 \mbox{+}0.361 \ (\ Cd_{tot} \) \ \mbox{+}0.007 \ (\ A \mbox{-}Zn \) \ \mbox{+}0.002 \ (\ A \mbox{-}S \) \ \mbox{+}0.001 \ (\ A \mbox{-}P \) \ \mbox{+}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{+}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{+}0.001 \ (\ A \mbox{-}P \) \ \mbox{+}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{+}0.001 \ (\ A \mbox{-}P \) \ \mbox{+}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{+}0.001 \ (\ A \mbox{-}P \) \ \mbox{+}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{+}0.001 \ (\ A \mbox{-}P \) \ \mbox{+}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{+}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{+}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{+}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{+}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{+}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{+}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{+}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{+}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{+}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{+}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{+}0.004 \ (\ A \mbox{-}Cu \) \ \mbox{+}0.004 \ \mbox{+}0.004 \ \m$	0.743	< 0.001	0.083
潴育性水稻土	$\mathrm{Cd}_{\mathrm{ext}} = 0.010 + 0.352 \ (\ \mathrm{Cd}_{\mathrm{tot}} \) \ + 0.012 \ (\ \mathrm{A-Zn} \) \ + 0.001 \ (\ \mathrm{A-S} \) \ - 0.001 \ (\ \mathrm{A-P} \) \ + 0.010 \ (\ \mathrm{A-Cu} \) \ - 0.010 \ (\ \mathrm{A-P} \) \ + 0.010 \ (\ \mathrm{A-Cu} \) \ - 0.001 \ (\ \mathrm{A-P} \) \ - 0.001 \ (\ \mathrm{A-P} \) \ - 0.010 \ (\ \mathrm{A-Cu} \) \ - 0.001 \ (\ \mathrm{A-P} \) \ - 0.010 \ (\ \mathrm{A-Cu} \) \ - 0.001 \ (\ \mathrm{A-P} \) \ - 0.010 \ (\ \mathrm{A-Cu} \) \ - 0.001 \ (\ \mathrm{A-P} \) \ - 0.010 \ (\ \mathrm{A-Cu} \) \ - 0.001 \ (\ \mathrm{A-P} \) \ - 0.010 \ (\ \mathrm{A-Cu} \) \ - 0.001 \ (\ \mathrm{A-P} \) \ - 0.010 \ (\ \mathrm{A-P} \) \ - 0.010 \ (\ \mathrm{A-Cu} \) \ - 0.001 \ (\ \mathrm{A-P} \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \ (\ \mathrm{A-P} \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \ (\ \mathrm{A-P} \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ - 0.010 \) \ $	0.727	< 0.001	0.059

2.4 有效态镉含量预测模型的适用性

经逐步回归分析发现预测模型的相关系数为 0.766~0.863,均达到极显著水平(P<0.001),能 较好地预测南方稻区土壤有效态镉含量。有效态镉 含量预测模型精度随土壤因子的引入而依次增加, 即可按照实际需求选择模型,基于土壤总镉含量、 有效态锌、硫、磷及铜这5个因子的模型可更精确 地预测土壤中有效态镉的含量。本研究以决定系数 (*R*²)和概率(*P*)检验回归模型的有效性^[14],基 于总体样品构建的回归方程为:

$$\label{eq:cd_ext} \begin{split} & Cd_{ext} {=} -0.006 {+} 0.371 \ (\ Cd_{tot} \) \ {+} 0.014 \ (\ A {-} Zn \) \ {+} \\ & 0.001(\ A {-} S \) {-} 0.001(\ A {-} P \) {+} 0.006(\ A {-} Cu \) (\ R^2 {=} 0.745 \ , \end{split}$$

P<0.001),此方程表明,利用土壤总镉含量、有效态锌、硫、磷及铜对土壤有效态镉含量进行预测是非常可行的。

通过将测定的土壤有效态镉含量与模型预测的 有效态镉含量相比较,以确定基于总体样品构建 的预测模型的准确度(图1)。结果表明,绝大多 数预测值均处于95%预测的区间内,说明模型的 拟合效果较好。模型预测值与样品实测值间相关 性均达到了极显著水平(P<0.001, R²为0.730)。 模型准确性与预测精度均较好,因此,构建的模 型能较好地预测南方稻区土壤有效态镉的含量 水平。

— 219 —



3 讨论

3.1 土壤有效态镉含量的影响因素分析

研究表明, 仅从土壤全镉含量角度难以说明镉 的化学活性、生物效应及对生态系统或人类健康的 可能影响,而镉的毒性在很大程度上取决于其有效 态的含量^[13]。土壤类型、土壤环境条件(pH、氧 化还原电位及阳离子交换量等)、土壤组成(有机 质及黏土矿物等)及农艺措施(淹水灌溉)等均是 影响土壤有效态镉含量的主要因素^[15]。本研究结 果表明,土壤总镉含量是影响土壤有效态镉含量的 关键因素。相关分析则表明,土壤 pH 与土壤有效 态镉含量呈极显著相关关系,但回归分析中土壤 pH并没有引入有效态镉的预测模型,可能是因为 土壤 pH 与阳离子交换量、全氮、有效态磷、硫、 硅、铁、锰、铜、锌及交换性钙、镁等均具有很强 的相关性,尽管在构建的土壤有效态镉预测模型中 没有引入 pH, 但其对有效态镉的影响作用已在其 它土壤因子变化中得到了充分反映。

单因子回归分析中,土壤总镉含量、有效态 锌、硫、磷及铜与土壤有效态镉含量相关性均为极 显著,且基于上述5个土壤因子建立的回归方程能 较好地预测土壤有效态镉含量,故土壤总镉含量、 有效态锌、硫、磷及铜均为影响土壤有效态镉含量 的主要因素,在评价土壤有效态镉安全风险时,需 考虑这些土壤性质的影响。土壤中总镉含量可反映 土壤受镉污染的情况,其对有效态镉有较大的影 响^[16],本研究相关性与单因子回归分析均表明, 土壤总镉含量为影响土壤有效态镉含量的关键因 素。稻田土壤氧化还原状况是影响土壤镉化学形态 及溶解度的重要因素,稻田土壤还原 – 氧化交替对 — 220 —

镉的生物有效性有着重要影响^[1]。在淹水阶段,土 壤中的 SO42- 被还原成 HS- 及 S2-, 生成不溶的硫化 镉沉淀或与铁、锌硫化物形成共沉淀, 难溶性硫 化物的产生及淹水导致的 pH 升高, 是淹水条件下 镉溶解性较低的主要原因^[17];在稻田后期排水氧 化阶段,含镉硫化物快速氧化释放出 Cd²⁺、SO₄²⁻、 Zn²⁺ 及 Fe²⁺,同时,水解过程中质子的释放会引起 土壤 pH 降低,导致镉生物有效性大幅度增加^[18]。 本文的土壤样品是在晚稻收获后取得的,因此在预 测模型中土壤有效态镉含量与有效态锌、有效态硫 表现出一致的正相关关系。本研究土壤采集点施肥 基本以单施化肥为主,诸多研究表明,在长期不施 用化肥或单施化肥的情况下,土壤中有效态重金 属含量基本保持不变或降低[19-21],加之磷肥中的 PO₄³⁻ 会促进可溶性重金属离子的沉淀,最终导致 土壤中有效态镉含量降低^[22],因此有效态磷在一 定程度上降低了土壤中有效态镉含量。Cu²⁺与Cd²⁺ 在土壤中更多表现为竞争吸附的关系,本研究土壤 中铜、镉却呈现出协同关系,这可能是由于铜通过 间接交互影响其他土壤因子,最终对土壤有效态镉 含量产生了直接的促进效应。

3.2 有效态镉含量预测模型的不足

本研究基于土壤总镉含量、有效态锌、硫、磷 及铜构建了南方稻区土壤有效态镉的预测模型,且 综合考量了模型在单因子水平、不同成土母质及水 稻土亚类下的适用性,结果均表明,基于这5个土 壤因子可较好地预测土壤有效态镉含量。需要指出 的是,本研究土壤样品采集于湖南省镉污染程度较 高的地区,所以较高的总镉超标率仅说明南方稻区 土壤镉污染风险较大,并不能完全代表整个区域。 本研究构建的土壤有效态镉预测模型是经验模型而 非机理模型,样品数相对较少,且预测模型中只考 虑了土壤总镉含量、有效态锌、有效态硫、有效态 磷及有效态铜5个土壤因子,尽管模型具有较高的 预测精度,但考虑更多的土壤理化性质可能会使土 壤有效态镉含量的预测精度进一步提高。此外,利 用线性回归方法构建的预测模型存在一定的缺陷, 软件会根据自变量在模型中系数的显著性决定其去 留,无法精确考虑不同土壤因子对土壤有效态镉含 量的影响,对模型拟合结果会产生一定影响^[23-24]。

4 结论

(1)通过相关分析及回归分析,可知土壤总镉

含量、有效态锌、硫、磷及铜是影响南方稻区土壤 有效态镉含量的主要因素。土壤总镉含量的决定系 数(*R*²)为0.587,对土壤有效态镉含量的解释程 度占预测模型的78.8%,优于其他4个土壤因子, 为评价土壤有效态镉含量的关键指标。

(2)通过区域调研,借助逐步回归分析得出南 方稻区土壤有效态镉含量的预测模型方程:

Cd_{ext}=-0.006+0.371(Cd_{tot})+0.014(A-Zn)+ 0.001(A-S)-0.001(A-P)+0.006(A-Cu)(*R*²=0.745, *P*<0.001),该模型绝大部分预测值都在95%预测 的区间内,拟合效果较好,具有较好的准确性及预 测精度,能较好地预测我国南方稻区土壤有效态镉 水平,可为评估南方稻区土壤有效态镉水平及作物 种植提供一定参考。

(3)基于土壤总镉含量、有效态锌、硫、磷及 铜构建的针对不同土壤母质及水稻土亚类的预测模 型也可较好地预测其土壤有效态镉含量,模型均达 到极显著水平(P<0.001),决定系数(R²)范围分 别为0.731~0.932及0.727~0.939,均可较好地 预测土壤有效态镉含量。

参考文献:

- [1] 汪鹏,王静,陈宏坪,等.我国稻田系统镉污染风险与阻控
 [J].农业环境科学学报,2018,37(7):1409-1417.
- [2] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业,2014,36(5):10-11.
- [3] 周江明. 中国耕地重金属污染现状及其人为污染源浅析 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (2): 89-98.
- [4] 李欣欣,钟莉莎,马倩倩,等.土施超富集植物秸秆对镉污染条件下葡萄生长及镉含量的影响[J].中国土壤与肥料, 2020(5):189-195.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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): 233–238.
- [8] Simmons R W, Nonle 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 and Soil,

2008, 302 (1/2): 125–137.

- [9] 裘高扬.改良剂对稻田土壤中镉形态及有效性的影响[D]. 杭州:浙江大学,2016.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] 陈怀满.环境土壤学(第2版)[M].北京:科学出版社, 2010.
- [14] 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.
- [15] 谢宜.不同 pH 稻田下土壤有效态镉与稻米镉含量的相关性研究 [D].长沙:湖南大学, 2019.
- [16] 崔邢涛,王学求,栾文楼.河北中南部平原土壤重金属元素 存在形态及生物有效性分析 [J].中国地质,2015,42(2): 655-663.
- [17] Alloway B J. Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability [M]. Germany: Springer, 2013. 283-311.
- Fulda B, Voegelin A, Kretzschmar R. Redox-controlled changes in cadmium solubility and solid-phase speciation in a paddy soil as affected by reducible sulfate and copper [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47 (22): 12775-12783.
- [19] 王开峰,彭娜,王凯荣,等. 长期施用有机肥对稻田土壤重 金属含量及其有效性的影响[J]. 水土保持学报,2008,22 (1):105-108.
- [20] 刘景,吕家珑,徐明岗,等.长期不同施肥对红壤Cu和Cd 含量及活化率的影响[J].生态环境学报,2009,18(3): 914-919.
- [21] 李双异,刘赫,汪景宽.长期定位施肥对棕壤重金属全量及其有效性影响[J].农业环境科学学报,2010,29(6): 1125-1129.
- [22] 杨洁,瞿攀,王金生,等.土壤中重金属的生物有效性分析 方法及其影响因素综述[J].环境污染与防治,2017,39
 (2):217-223.
- [23] 田娜娜,赵玉杰,周其文,等.DGT法原位测量水体中金属 有效态组分及动力学研究[J].农业环境科学学报,2017, 36(6):1210-1217.
- [24] 赵兴杰,侯鹏程,韩旭平,等. 膨润土和沸石对污染土壤有效 镉的动态影响[J]. 山西农业科学, 2014, 42 (9): 981-983.
 「下转第 246 页]

Research progress of gene encoding nitrate transports involved in nitrogen use pathway in plants

LIU Wen-ping¹, LIANG Xuan-he², ZHANG Chun-xiao¹, LI Shu-fang³, CAO Tie-hua^{2*}, LI Xiao-hui^{1*} (1. Maize Resources Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Gongzhuling Jilin 136100; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun Jilin 130033; 3. Crop Germplasm Resources Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Gongzhuling Jilin 136100)

Abstract: Nitrogen is one of the essential elements for plant growth and development. Nitrate in soil is the main source of nitrogen for plant. The uptake, transport and distribution of nitrate by plants is mediated by a precise signal regulatory network, in which nitrate transporters play an important role in the transport and distribution of nitrate in plants. By identifying the functions of different nitrate transporter genes in uptake, transport, assimilation and remobilization, the mechanism of nitrate uptake in plants can be better elaborated, the key link to improve nitrogen use efficiency of plant can be found. Therefore, the response and signal transmission of nitrate transporters by plants in soil in this paper were reviewed, and the functions of nitrate transporters involved in nitrate transport, storage and remobilization in plants and the application of nitrate transporter genes in plant breeding were also reviewed. In addition, the editing of single base, modification of key domains and functional identification of nitrate transporter genes were prospected. The review is helpful to analyze the function of nitrate transport genes, broaden the understanding of the molecular mechanism of nitrate uptake and transport in plants, and provide theoretical support for improving plant nitrogen use efficiency and breeding crop varieties for high nitrogen use efficiency.

Key words: plant; nitrogen; nitrate transporter; nitrate; yield

[上接第 221 页]

Prediction model for soil available cadmium in typical cadmium contaminated paddy fields of South China

ZHOU Jun-yu¹, GU Yu¹, LIU Qiong-feng¹, WU Hai-yong¹, ZHOU Xuan¹, TANG Zhen-qi², LI Ming-de^{1*} (1. Hunan Soil and Fertilizer Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha Hunan 410125; 2. Hunan Soil and Fertilizer Station, Changsha Hunan 410006)

Abstract: In order to better guide the heavy metal cadmium polluted paddy soils to implement soil remediation and control the soil cadmium poisoning risk, typical cadmium polluted paddy fields in southern China were taken as the research object, the relationship between soil available cadmium content and physiochemical factors was analyzed based on the soil cadmium and the physiochemical properties index determination for 316 monitoring sites, and the forecast model of paddy soils available cadmium was established through stepwise multivariate regression equation. The results showed that the soil available cadmium content of paddy fields in southern China mainly depended on the soil total cadmium (Cd_{tot}), available zinc (A-Zn), available sulfur (A-S), available phosphorus (A-P) and available copper (A-Cu). Through regional investigation and stepwise regression analysis, the prediction model equation of available Cd content (Cd_{ext}) in the southern paddy soils was obtained: Cd_{ext} =-0.006+0.371 (Cd_{tot}) +0.014 (A-Zn) +0.001 (A-S) -0.001 (A-P) +0.006 (A-Cu). The model prediction reached a very significant level (P<0.001), and the determination coefficient (R^2) was 0.745. Therefore, the regression model based on the above five soil factors can achieve perfect prediction, and it can provide reference for soil remediation of cadmium polluted paddy field.

Key words: cadmium polluted paddy field; available cadmium; influencing factors; prediction model