

土壤-水稻籽粒系统镉富集主要影响因素统计分析

郑宏艳, 刘书田, 米长虹, 黄治平, 侯彦林*, 王 农, 蔡彦明

(农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘 要:对取自 51 篇参考文献中的土壤和水稻籽粒数据进行分析,在多种土壤因素共同影响下,研究了单一土壤性质[包括土壤 pH、有机质(SOM)、阳离子交换量(CEC)和土壤质地]和水稻类型(包括粳稻和籼稻)对土壤-水稻籽粒系统 Cd 富集的影响。结果表明:水稻籽粒吸镉量与土壤含镉量关系最密切,且呈显著正相关,随土壤 pH 增大呈减少的趋势;SOM 和 CEC 的变化对水稻籽粒含镉量影响不显著;在不同土壤质地上,水稻籽粒吸镉能力为壤土<砂土<粘土;粳稻与籼稻两种水稻类型的籽粒含镉量差别不显著,但水稻品种间的差别比较显著。利用已有数据建立的两个土壤模式显示:在有机质含量为中,质地为壤土情况下,水稻籽粒的吸镉能力为碱性土壤<酸性土壤,明显符合一般规律。以上结论说明,在其他土壤性质一定的前提下研究单一土壤因素对水稻籽粒的吸镉能力更具有实际意义,土壤模式的划分在理论、方法和实用性方面都具有重要意义。

关键词:土壤性质;镉;水稻;土壤模式

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)10-1880-09 doi:10.11654/jaes.2015.10.007

Statistical Analysis of Factors Affecting Cd Bioaccumulation in Soil-Rice Grain System

ZHENG Hong-yan, LIU Shu-tian, MI Chang-hong, HUANG Zhi-ping, HOU Yan-lin*, WANG Nong, CAI Yan-ming

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

Abstract: In this study, the effects of soil property (including soil pH, organic matter (SOM), cation exchange capacity (CEC), and soil texture) and rice type (including japonica and indica rice) on Cd bioaccumulation in soil-rice grain system were investigated using the published data from 51 experiments. The content of Cd in rice grain had significantly positive correlation with that in soil, and decreased with increasing soil pH. Soil organic matter and CEC had no significant effects on the content of Cd in rice grain, which was different from the previous conclusion that rice grain Cd had significantly negative correlation with SOM and CEC. The content of Cd in rice grain was in order of loam < sand < clay soil, which was also different from the previous conclusion. No significant difference in Cd content was found between japonica and indica rice types, whereas significant difference was present among rice cultivars. Based on published data, two general soil acidity patterns were established: The content of Cd in rice grain was lower in alkaline soils than in acid soils in medium SOM and loam soils. The present results indicate that classifying and grouping soils are of more practical significance for investigating soil impacts on Cd bioaccumulation in rice grain.

Keywords: soil property; Cd; rice; soil pattern

国内对土壤-水稻系统镉富集影响因素的研究主要集中在特定区域的土壤上,土壤性质的差异会影响水稻对土壤中镉的吸附能力^[1-5],主要结论有:水稻吸镉量与土壤镉含量呈显著正相关关系^[5-11];土壤 pH 是影响水稻吸镉量的主要因素,一般情况下,水稻吸镉

量与土壤 pH 呈负相关关系^[11-27];土壤质地影响土壤对镉的吸附能力,进而影响水稻吸镉量,土壤中粘粒含量越多,对镉的吸附固定能力越强,促使水稻吸镉量也增加^[18,21,28-35];土壤有机质是影响水稻吸镉量的又一主要因素,一般情况下,水稻吸镉量与土壤有机质含量呈负相关关系^[5,18-19,21,36-45];土壤阳离子交换量(CEC)对水稻吸镉量也有一定的影响,一般情况下,水稻吸镉量与土壤 CEC 含量呈正相关关系^[5,18,21,27];水稻不同类型及品种间对土壤中镉的吸收、分配存在很大差异,多数研究结果表明^[46-60],在水稻类型上,籼

收稿日期:2015-05-19

基金项目:中国农业科学院科技创新工程(2015-cxgc-hyl)

作者简介:郑宏艳(1986—),女,辽宁铁岭人,硕士,研究实习员,主要从事土壤重金属污染、数据挖掘和 GIS 应用研究。

E-mail:zhenghongyan5540@163.com

*通信作者:侯彦林 E-mail:bjyours@sina.com

稻比粳稻的平均吸镉能力更强,但同一类型内品种间差异很大,造成类型间差异不显著。这些研究主要针对特定土壤进行,就全国范围而言,因土壤性质差别明显,其研究结果还不能代表全国尺度,故缺乏整体系统的研究。本文总结国内公开发表论文中的大量数据,以土壤-作物系统重金属生物富集的“土壤重金属含量-作物特性-土壤属性”关系理论^[62]作为分析依据,研究全国多个地区不同土壤性质和水稻类型对土壤-水稻系统 Cd 富集的影响规律,并按照土壤模式划分方法,划分出两个土壤模式进行对比分析,使研究结果具有更强的针对性。

1 材料与方法

1.1 数据

本文收集了国内主要期刊所发表的土壤镉与水稻籽粒含镉量的相关论文^[62],包括不同时间、不同空间的各类盆栽试验、大田试验及野外取样的数据,最终确定 51 篇公开发表的论文中的土壤全镉量与水稻籽粒含镉量的对应数据作为数据挖掘的样本。数据的筛选原则为,文章中既有水稻籽粒含镉量,又有与之相对应的数据,包括土壤含镉量、土壤 pH、土壤质地、有机质(SOM)含量、土壤阳离子交换量(CEC)、水稻类型。因为可用数据少,所以复合污染条件下的数据也参与统计,以便揭示整体趋势。数据来源与分布情况见表 1。

1.2 方法

以样本土壤含镉量(横坐标)与水稻籽粒含镉量

(纵坐标)制作散点图,基于不同 pH 范围、不同土壤质地、不同 SOM、不同 CEC 以及不同水稻类型情况下,分析水稻籽粒含镉量与土壤含镉量的关系。

建模时为了尽量使用较少的自变量,简化土壤属性的影响,需要进行土壤模式划分,然后在不同模式下研究土壤模式-水稻系统含镉量的关系。土壤模式划分主要考虑三个土壤属性,即土壤 pH、土壤质地和土壤有机质。本文以样本数量大于 30 个为筛选原则,依据土壤模式划分方法,将样本划分为中(中等有机质含量)-壤(壤土)-酸(酸性)和中(中等有机质含量)-壤(壤土)-碱(碱性)两个模式下进行对比。模式划分方法详见文献[62]。

2 结果与讨论

2.1 土壤 pH 对土壤-水稻籽粒系统镉富集的影响

按常用单位的土壤镉和水稻籽粒含镉量作图,存在数据过于集中,不利于具体分析的问题。对此,将土壤镉与水稻籽粒含镉量分别乘以 1 和 1000 后取以 10 为底的对数作图(水稻籽粒含镉量乘以 1000 后单位变为 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。以下各图均以此方法制作散点图。

将参考文献中明确给出土壤 pH 的样本作为一个数据集,共计 389 个样本,其中 $\text{pH}<6.5$ 的样本 232 个, $6.5\leq\text{pH}\leq 7.5$ 的样本 65 个, $\text{pH}>7.5$ 的样本 92 个。绘制散点图获得图 1,在散点图上分别作回归直线,得到线性回归方程如下:

$$\text{pH}<6.5:y=0.535\ 8x+2.432\ (n=232,r=0.668\ 1^{**},r_{0.01}=0.153\ 3)$$

表 1 水稻籽粒样本分布情况
Table 1 Distribution of rice grain samples

地区 Area	土壤质地 Soil texture(251 个)			pH(389 个)			CEC(231 个)			SOM(380 个)			水稻类型 Rice types(175 个)	
	砂 Sand	壤 Loam	粘 Clay	<6.5	6.5~7.5	>7.5	<15	15~20	>20	<20	20~30	>30	粳稻 Japonica	籼稻 Indica
辽宁					9					9				
北京	9					9								
天津		73				73		73		73				
四川				23				23				23		23
重庆			16		16					16			8	8
湖北		36		66				36		30	36			
湖南				30							24	6	2	28
贵阳														
江苏	14	18	18	45	9	10	24	5	35	20	32	12	18	18
江西	7	7		14			14			14				
浙江	3		30	4	30		4			2	2	30	5	23
福建				16	1		17			4	6	7		8
广东		20		34						14	20			34
合计	33	154	64	232	65	92	59	137	35	182	120	78	33	142

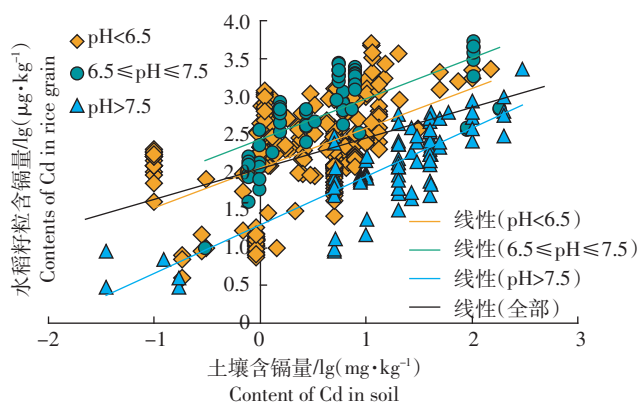


图1 不同土壤pH水稻籽粒含镉量与土壤含镉量关系

Figure 1 Relationship between $Cd_{\text{rice grain}}$ and Cd_{soil} content under different soil pH

$6.5 \leq \text{pH} \leq 7.5: y = 0.5287x + 2.0471$ ($n=65, r=0.5163^{**}, r_{0.01}=0.3150$)

$\text{pH} > 7.5: y = 0.6395x + 1.2997$ ($n=92, r=0.8136^{**}, r_{0.01}=0.2659$)

全部样本: $y = 0.4047x + 2.0488$ ($n=389, r=0.4579^{**}, r_{0.01}=0.1291$)

由图1可以得出,土壤pH对土壤-水稻籽粒系统镉富集的影响显著,中性土壤和碱性土壤上的水稻籽粒吸镉能力与全部样本平均吸镉能力区别显著,水稻籽粒吸镉量顺序是中性土壤>酸性土壤>碱性土壤。这与公开发表的文献研究结果略有不同,多数研究表明^[11-27],pH越高,土壤对镉的吸附和固定作用越强,因此水稻籽粒吸收的镉越少,图1中的数据显示,在酸性土壤中水稻籽粒吸镉量比在中性土壤的吸镉量少,说明土壤质地、土壤SOM和CEC等土壤属性对水稻籽粒吸镉量产生一定的影响,数据中的两种土壤的有机质含量差别不明显,但中性土壤的质地大多是粘土,酸性土壤的质地大多是壤土。有研究表明水稻在粘土中比在壤土中籽粒的吸镉量高^[34],这可能是导致水稻籽粒在酸性土壤中比中性土壤中的吸镉量少的主要原因。

2.2 土壤质地对土壤-水稻籽粒系统镉富集的影响

将参考文献中明确给出土壤质地的样本作为一个数据集进行统计分析,其中砂土33个、壤土154个、粘土64个,共计251个样本。绘制散点图获得图2,在散点图上分别作回归直线,得到线性回归方程如下:

砂土: $y = 0.4099x + 1.6878$ ($n=33, r=0.6032^{**}, r_{0.01}=0.43573$)

壤土: $y = 0.242x + 2.0052$ ($n=154, r=0.3955^{**}, r_{0.01}=0.2063$)

粘土: $y = 0.5007x + 2.4467$ ($n=64, r=0.7271^{**}, r_{0.01}=0.3174$)

全部样本: $y = 0.2337x + 2.1275$ ($n=251, r=0.3489^{**}, r_{0.01}=0.1535$)

由图2可以总结出,砂土和粘土上水稻籽粒吸镉能力与全部样本平均吸镉能力区别显著。土壤质地为粘土的样本水稻籽粒吸镉量明显比土壤质地为砂土和壤土的样本高,与陈京都等^[34]的数据分析结果基本一致,即添加外源镉后籽粒中镉含量升高,升高幅度粘土大于砂土。然而,一些研究指出^[18,21,28-35],土壤粘粒越多对游离态镉的吸附能力越强,致使植物能够吸取的镉相对减少,与本文结果不一致。砂性土壤由于保水保肥能力差,处于生物有效性的镉容易被雨水淋溶而流失,尽管这类土壤生物有效性镉占全镉的比例较大,但生物有效性镉总量往往不高,因而植物能够吸取的镉相对减少,与本文结果一致,即砂土中水稻籽粒吸镉量偏少。可见,由于土壤pH、有机质和CEC等其他因素的影响,导致粘土上的样本水稻籽粒吸镉量明显偏高,砂土和壤土上的样本水稻籽粒吸镉量差异并不显著。

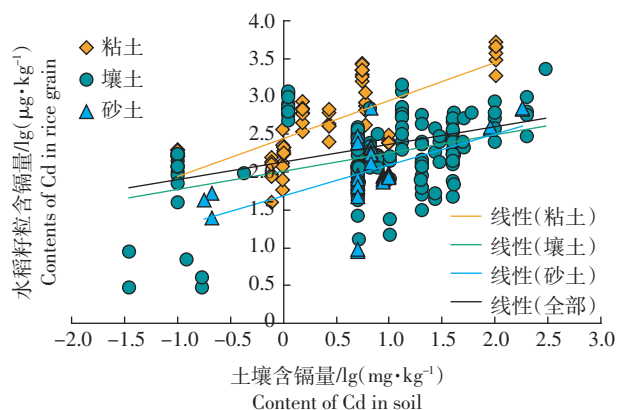


图2 不同土壤质地水稻籽粒含镉量与土壤含镉量关系

Figure 2 Relationship between $Cd_{\text{rice grain}}$ and Cd_{soil} content under different soil texture

2.3 土壤有机质对土壤-水稻籽粒系统镉富集的影响

将参考文献中明确给出土壤有机质的样本作为一个数据集进行统计分析,共计380个样本,其中SOM < 20 g·kg⁻¹ (简称低)的样本182个、20 g·kg⁻¹ ≤ SOM ≤ 30 g·kg⁻¹ (简称中)的样本120个、SOM > 30 g·kg⁻¹ (简称高)的样本78个。绘制散点图获得图3,在散点图上分别作回归直线,得到线性回归方程如下:

$\text{SOM} < 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}: y = 0.452 3x + 1.987 2 \quad (n=182, r=0.473 1^{**}, r_{0.01}=0.190 0)$

$20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \leq \text{SOM} \leq 30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}: y = 0.107 6x + 2.296 9 \quad (n=120, r=0.179 4^{**}, r_{0.05}=0.178 6)$

$\text{SOM} > 30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}: y = 1.042 5x + 1.669 8 \quad (n=78, r=0.769 2^{**}, r_{0.01}=0.288 2)$

全部样本: $y = 0.405 8x + 2.061 2 \quad (n=380, r=0.466 2^{**}, r_{0.01}=0.130 5)$

由图 3 可以得出,低档有机质含量土壤上的样本吸镉能力与全部样本的平均吸镉能力相近,土壤有机质含量对土壤-水稻籽粒系统镉富集的影响规律与以往研究结果有所不同,在土壤镉含量约低于 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图上土壤镉单位为 $\lg(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$,在图上为 0.7 附近] 时,水稻籽粒吸镉量顺序为中档 SOM > 低档 SOM > 高档 SOM ,但土壤镉含量约高于 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,高档 SOM > 低档 SOM > 中档 SOM 。这说明土壤其他属性对水稻吸镉量产生很大影响,导致水稻吸镉量与土壤有机质含量并没有呈显著的正相关或负相关的关系。一些研究指出,土壤有机质含量的增加显著抑制了外源 Cd 的有效性^[36-45],有效态的离子量越多越便于植物根系的吸收和积累^[61],土壤有机质主要通过络合作用与金属离子结合。有研究表明,有机质是影响土壤 Cd^{2+} 吸附最主要的因素,且呈正相关关系^[26]。

2.4 土壤 CEC 对土壤-水稻籽粒系统镉富集的影响

将参考文献中明确给出土壤阳离子交换量的样本作为一个数据集进行统计分析,其中 $\text{CEC} < 15 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的样本 59 个、 $15 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1} \leq \text{CEC} \leq$

$20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的样本 137 个、 $\text{CEC} > 20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的样本 35 个,共计 231 个样本。绘制散点图获得图 4,在散点图上分别作回归直线,得到线性回归方程如下:

$\text{CEC} < 15 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}: y = 0.362 5x + 2.160 6 \quad (n=59, r=0.334 8^{**}, r_{0.01}=0.330 1)$

$15 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1} \leq \text{CEC} \leq 20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}: y = 0.671 8x + 1.335 4 \quad (n=137, r=0.827 5^{**}, r_{0.01}=0.218 6)$

$\text{CEC} > 20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}: y = 0.232 4x + 2.284 5 \quad (n=35, r=0.505 8^{**}, r_{0.01}=0.423 8)$

全部样本: $y = 0.461 4x + 1.769 9 \quad (n=231, r=0.545 1^{**}, r_{0.01}=0.153 1)$

由图 4 可以得出,高中低含量 CEC 土壤上的样本与全部样本的吸镉能力差别均比较显著,土壤 CEC 含量越高,样本吸镉能力越相近, $\text{CEC} < 15 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的样本与 $\text{CEC} > 20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的样本水稻籽粒吸镉量均比 $15 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1} \leq \text{CEC} \leq 20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的水稻籽粒吸镉量高。这与以往研究结论有些不同,鲁如坤等^[5]认为,一般随着土壤阳离子交换量增大,植物吸镉量减少;普锦成等^[18]认为阳离子交换量增加减少了土壤交换态镉含量,可能与高 CEC 土壤对重金属具有较强的专性吸附和固定作用有关。这些结论应该以其他土壤属性基本相近为前提。图 4 数据中 $15 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1} \leq \text{CEC} \leq 20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤 pH 比其他两组数据的 pH 偏高,前面提到 pH 越高,土壤对镉的吸附和固定作

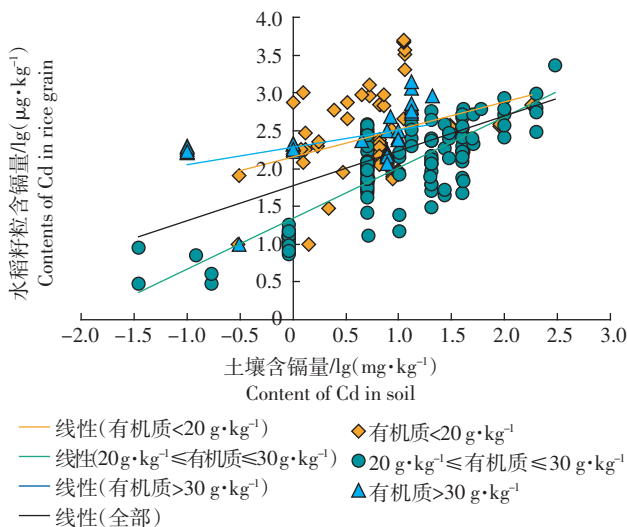


图 3 不同土壤有机质水稻籽粒含镉量与土壤含镉量关系

Figure 3 Relationship between $\text{Cd}_{\text{rice grain}}$ and Cd_{soil} content under different SOM

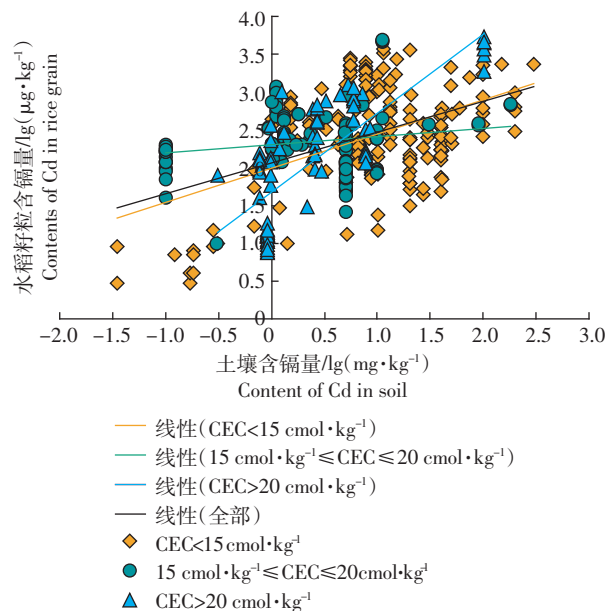


图 4 不同土壤阳离子交换量水稻籽粒含镉量与土壤含镉量关系

Figure 4 Relationship between $\text{Cd}_{\text{rice grain}}$ and Cd_{soil} content under different soil CEC

用越强,因此水稻籽粒吸收的镉随之减少。这可能是导致其样本籽粒吸镉量明显偏少的主要原因。其他土壤属性的不同,致使 $\text{CEC} < 15 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的样本与 $\text{CEC} > 20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的样本水稻籽粒吸镉量差别不明显。

2.5 水稻类型对土壤-水稻籽粒系统镉富集的影响

将参考文献中明确给出水稻类型的样本作为一个数据集进行统计分析,其中籼稻 142 个,粳稻 33 个,共计 175 个样本。绘制散点图获得图 5,在散点图上分别作回归直线,得到线性回归方程如下:

籼稻: $y = 0.5951x + 2.1668$ ($n = 142, r = 0.6169^{**}, r_{0.01} = 0.2148$)

粳稻: $y = 0.2768x + 2.472$ ($n = 33, r = 0.5786^{**}, r_{0.01} = 0.4357$)

全部样本: $y = 0.5365x + 2.1929$ ($n = 175, r = 0.6098^{**}, r_{0.01} = 0.1937$)

由图 5 可以得出,籼稻与全部样本的吸镉能力接近,主要原因是籼稻样本比较多。水稻类型对土壤-水稻籽粒系统镉富集的影响不大,即粳稻籽粒与籼稻籽粒吸镉量区别不大,与徐燕玲等^[53]研究结果一致。图 5 数据中明确给出样品中水稻品种数量共有 40 余种,说明水稻不同类型的不同品种对水稻籽粒吸镉能力差异显著。以往大部分研究都表明,水稻不同品种对镉的积累能力差异显著^[46-60];一些研究表明^[47-48, 52],水稻对镉的积累能力表现为籼型>新株型(或杂交型)>粳型。但针对常规稻和杂交稻的镉积累能力,研究结果不尽相同^[50-51, 55-56, 58]。

以往研究结果提到的籼稻吸镉量大于粳稻吸镉量仅在其实验条件下满足,并不适用于不同类型的全

部水稻品种。当前的这些研究工作表明水稻籽粒中重金属含量不仅在品种间达到显著差异,而且在水稻的品种类型间也达到显著性差异,但是这些研究结果之间存在一些差异或矛盾,可能是采样时土壤、水分等实验条件不同引起的。

2.6 土壤模式对土壤-水稻籽粒系统镉富集的影响

上面针对不同土壤性质情况下,水稻籽粒对镉的富集能力研究结果规律性不明显,主要原因是,当研究某一种土壤性质对水稻籽粒的镉富集能力影响时,其他土壤性质会破坏研究结果的规律性,只有当其他土壤性质一致的情况下,研究某一土壤性质对水稻籽粒的镉富集能力影响才有意义和说服力。因此引入土壤模式划分方法^[62]。

依据土壤模式划分方法,考虑土壤 pH、土壤质地和土壤有机质 3 种土壤属性,将其划分为 3 个档次。土壤有机质 3 个档次划分为低于 $20.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (低)、 $20.0 \sim 30.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (中)、高于 $30.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (高);按质地分为砂、壤、粘;按 pH 分为 6.5 以下(酸)、6.5~7.5(中)、7.5 以上(碱)。样本数量大于 30 个的样本参与模式划分,最终筛选出中-壤-酸和中-壤-碱两个土壤模式,样本数量分别为 54 个和 73 个。绘制散点图获得图 6,在散点图上分别作回归直线,得到线性回归方程如下:

$y = 1.5398x + 1.0035$ ($n = 54, r = 0.6787^{**}, r_{0.01} = 0.3445$)

$y = 0.6447x + 1.2874$ ($n = 73, r = 0.8401^{**}, r_{0.01} = 0.2977$)

从图 6 可以得出,在土壤有机质含量为中,土壤质地为壤土情况下,碱性土壤上水稻籽粒吸镉量比酸性土壤上的明显偏低,符合一般规律,并且中等有机质含量和壤土居多,所以可以推断以上结果的广泛适

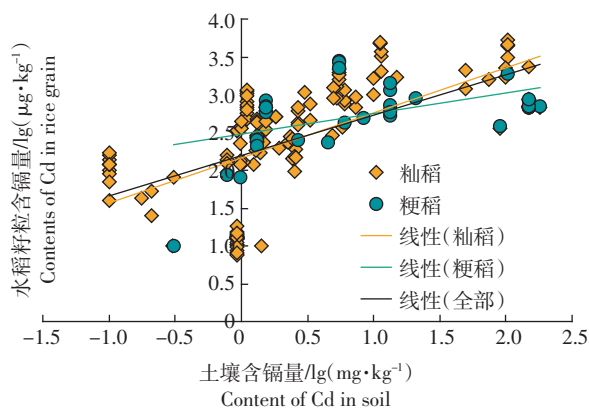


图 5 不同水稻类型水稻籽粒含镉量与土壤含镉量关系
Figure 5 Relationship between $\text{Cd}_{\text{rice grain}}$ and Cd_{soil} content under different rice types

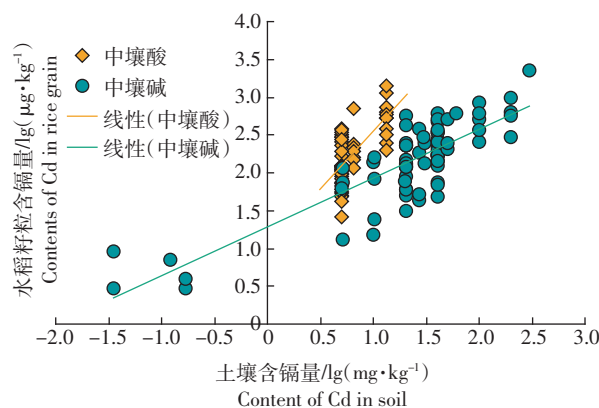


图 6 两种土壤模式水稻籽粒含镉量与土壤含镉量关系
Figure 6 Relationship between $\text{Cd}_{\text{rice grain}}$ and Cd_{soil} content under two soil pattern

用性。

2.7 水稻籽粒吸镉量与土壤含镉量、土壤性质之间的统计关系

为了进一步研究作物吸镉量与土壤含镉量、土壤性质之间的关系,对水稻籽粒含镉量、土壤全镉、pH、有机质、阳离子交换量之间的相关关系见表 2。水稻籽粒含镉量与土壤镉呈极显著正相关,与土壤有机质含量呈极显著负相关,与土壤 pH 呈负相关,与阳离子交换量相关性则不强,与王维^[10]研究结果相近。

对水稻籽粒含镉量与土壤性质建立多元回归分析,当 CEC 参与建模时,CEC 的显著性水平最高,考虑 CEC 不参与建模进行对比分析,见表 3。

考虑 CEC 时,模型中常量、土壤镉、pH 对应的显著性水平均为 0,有机质对应的显著性水平为 0.002,CEC 对应的显著性水平为 0.144。

剔除 CEC 后,模型中常量、土壤镉、pH 对应的显著性水平均为 0,有机质对应的显著性水平为 0.002。如果显著性水平 $0.01 < P < 0.05$ 则为差异显著,如果 $P < 0.01$ 则差异极显著。

利用水稻籽粒含镉量的实际值与两个模型的预测值建立散点图(图 7),分别作回归直线,得到如下回归方程:

考虑 CEC 时,水稻籽粒镉含量预测模型为:

$y = 0.4504x + 0.9775$, 决定系数 $R^2 = 0.4437$

剔除 CEC 时,水稻籽粒镉含量预测模型为:

$y = 0.4405x + 1.2128$, 决定系数 $R^2 = 0.4428$

从图 7 可见,无 CEC 的预测值比带 CEC 的预测值整体偏高;与 1:1 直线对比发现,两个预测模型在

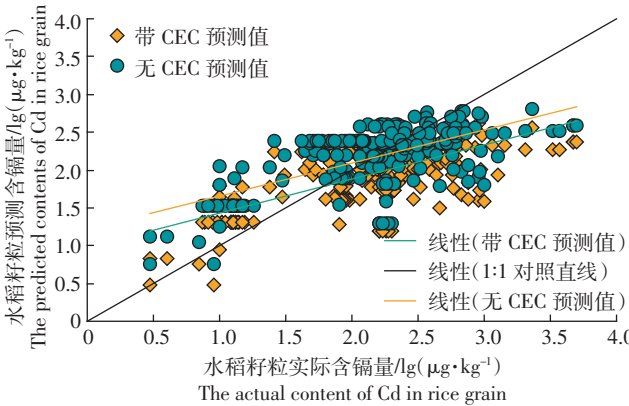


图 7 两种预测方法水稻籽粒含镉量实际值与预测值对比
Figure 7 Comparison of predicted and actual Cd_{rice grain} content under two prediction methods

数据越向两端移动,预测值与实际值偏差越大。满足不同预测误差范围时,将样本数量占全部样本的比例进行对比得到图 8;当预测误差<5(或 10)时,无 CEC 的模型样本数比带 CEC 的样本数多,两个模型预测误差<15%的样本数量最接近。以此为界,随着预测误差范围的扩大,带 CEC 的模型样本比无 CEC 的样本多。可以得出,无 CEC 模型预测精度高的样本数多,但带 CEC 模型预测误差<30%覆盖的样本最多。

3 结论

水稻类型对土壤-水稻籽粒系统镉富集的影响不大,但水稻不同品种对镉的积累能力差异显著。以往研究表明,水稻不同品种对镉的积累能力差异显著,但针对具体品种和类型的研究结果之间存在一些差异或矛盾,可能是由于实验条件和土壤因素的不统一

表 2 水稻籽粒—土壤各指标相关关系

Table 2 Correlation coefficients between rice grain and soil properties

	Cd _{grain}	Cd _{soil}	pH	SOM	CEC
Cd _{grain}	1	0.545** (0.782**)	-0.100 (-0.342**)	-0.326** (-0.164*)	-0.052 (-0.063)
Cd _{soil}		1	0.401** (-0.083)	-0.543** (0.012)	-0.212** (0.281**)
pH			1	-0.469** (-0.24**)	-0.061 (-0.119)
SOM				1	0.099 (0.331**)
CEC					1

注:括号里的数据来自文献[10],括号里的 ** 表示数据在 $P < 0.01$ 达到极显著水平,* 表示数据在 $P < 0.05$ 达到显著水平。

表 3 基于土壤性质的水稻籽粒镉含量预测模型及相关参数

Table 3 Cd_{grain} prediction model and related parameters based on soil properties

项目	多元线性回归模型 Multivariable linear regression model		显著性水平 ($P < 0.05$) Significance level				
	方程 Equation	R^2	Cd _{soil}	pH	SOM	CEC	模型 Model
有 CEC	$\lg(10^3 \text{Cd}_{\text{grain}}) = 3.301 + 0.534 \lg \text{Cd}_{\text{soil}} - 0.211 \text{pH} - 0.012 \text{SOM} + 0.006 \text{CEC}$	0.448	0.000	0.000	0.002	0.144	0.000
无 CEC	$\lg(10^3 \text{Cd}_{\text{grain}}) = 3.416 + 0.519 \lg \text{Cd}_{\text{soil}} - 0.210 \text{pH} - 0.012 \text{SOM}$	0.443	0.000	0.000	0.002	—	0.000

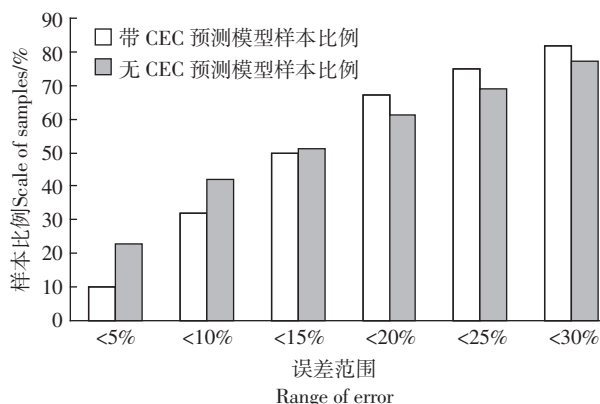


图8 两个预测模型不同误差的样本比例

Figure 8 Distribution of percentages of samples with different errors under two prediction models

引起的。

如果研究土壤单一属性对水稻籽粒镉的富集规律,需要在其他土壤属性保持一致的前提下进行,说明土壤模式划分的重要性。本文在已有数据基础上,建立两个土壤模式:在土壤有机质含量为中,土壤质地为壤土情况下,水稻籽粒的吸镉能力为碱性土壤<酸性土壤,符合一般规律,表明在其他土壤性质一定的情况下,研究单一土壤因素对作物的吸镉能力更有实际意义。

参考文献:

- [1] 牟仁祥,陈铭学,朱智伟,等.水稻重金属污染研究进展[J].生态环境,2004,13(3):417-419.
MOU Ren-xiang, CHEN Ming-xue, ZHU Zhi-wei, et al. Advance in the researches on heavy metals in rice[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(3):417-419.
- [2] 黄德乾,汪鹏,汪玉军,等.污染土壤上水稻生长及对Pb、Cd和As的吸收[J].土壤,2008,40(4):626-629.
HUANG De-qian, WANG Peng, WANG Yu-jun, et al. Growth and uptake of Pb, Cd and As of rice in polluted soils[J]. *Soils*, 2008, 40(4): 626-629.
- [3] Römken P, Guo H, Chu C, 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):2435-2444.
- [4] 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.
FAN Zhong-liang, JI Hui, YANG Fei, et al. Accumulation characteristics of Cd and Pb in rice grain and their security threshold values in paddy field under different soil types[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4):792-797.
- [5] 鲁如坤,熊礼明,时正元.关于土壤-作物生态系统中镉的研究[J].土壤,1992(3):129-133.
LU Ru-kun, XIONG Li-ming, SHI Zheng-yuan. Research on Cd in

soil-crop ecosystem[J]. *Soils*, 1992(3):129-133.

- [6] 陈铨荣.利用放射性 ^{115}Cd 研究水稻对镉的吸收和分配[J].环境科学,1978,3:4-7.
CHEN Quan-rong. The research on rice absorbed and distributed Cd using radioactive ^{115}Cd [J]. *Environment Science*, 1978, 3:4-7.
- [7] 林健,杜恣闲,陈建安,等.公路交通污染土壤和稻谷中镉、铅分布特征[J].环境与健康杂志,2002,19(2):119-121.
LIN Jian, DU Zi-xian, CHEN Jian-an, et al. Distribution of cadmium and lead in soil and rice along road polluted by traffic exhaust[J]. *Journal of Environment and Health*, 2002, 19(2):119-121.
- [8] 韩爱民,蔡继红,屠锦河,等.水稻重金属含量与土壤质量的关系[J].环境监测管理,2002,14(3):278-283.
HAN Ai-min, CAI Ji-hong, TU Jin-he, et al. Correlation of heavy metals contained in paddy rice and soil quality[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2002, 14(3):278-283.
- [9] 王俊伟,纪淑娟,王颜红,等.水稻重金属含量与土壤质量关系的研究[J].粮食加工,2008,33(4):31-33.
WANG Jun-wei, JI Shu-juan, WANG Yan-hong, et al. Study on the Relationship between the Cd content in *Oryza sativa* and the quality of soil[J]. *Grain Processing*, 2008, 33(4):31-33.
- [10] 王维.水稻镉吸收的区域模型及其调控研究[D].南京:南京林业大学,2012.
WANG Wei. Rice cadmium uptake by the regional model and its regulation[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012.
- [11] 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.
- [12] Spark K M, Johnson B B, Wells J D. Characterizing heavy metal adsorption on oxides and oxyhydroxides[J]. *European Journal of Soil Science*, 1995, 46(4):621-631.
- [13] Temminghoff E J M, van der Zee S E A T M, De Haan F A M. Copper mobility in a copper-contaminated sandy soil as affected by pH and solid and dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, 31(4):1109-1115.
- [14] 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,1999,19(1):81-86.
LIAO Min, HUANG Chang-yong, XIE Zheng-miao. Effect of pH on transport and transformation of cadmium in soil-water system[J]. *Acta Science Circumstantiae*, 1999, 19(1):81-86.
- [15] Li Z Y, Tang S, Deng X F, et al. Contrasting effects of elevated CO_2 on Cu and Cd uptake by different rice varieties grown on contaminated soils with two levels of metals: implication for phytoextraction and food safety[J]. *Journal of Hazard Materials*, 2010, 177(1):352-361.
- [16] Adhikari T, Singh M V. Sorption characteristics of lead and cadmium in some soils of India[J]. *Geoderma*, 2003, 114(1/2):81-92.
- [17] 宗良纲,张丽娜,孙静克.3种改良剂对不同土壤-水稻系统中Cd行为的影响[J].农业环境科学学报,2006,25(4):834-840.
ZONG Liang-gang, ZHANG Li-na, SUN Jing-ke. Effects of three amendments on behaviors of cadmium in different soil-rice system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):834-840.
- [18] 普锦成,符娟林,章明奎.土壤性质对水稻土中外源镉与铅生物有效性的影响[J].生态环境,2008,17(6):2253-2258.
PU Jin-cheng, FU Juan-lin, ZHANG Ming-kui. Effect of soil proper-

- ties on the bioavailability of added cadmium and lead in paddy soils[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6):2253-2258.
- [19] 江水英, 肖化云, 吴声东. 影响土壤中镉的植物有效性的因素及镉污染土壤的植物修复[J]. 中国土壤与肥料, 2008(2):6-10.
JIANG Shui-ying, XIAO Hua-yun, WU Sheng-dong. Effects of factors on Cd bioavailability in soil and the phytoremediation of the Cd-contaminated soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008(2):6-10.
- [20] 范中亮, 季辉, 杨菲, 等. 不同土壤类型下杂交水稻地上部器官对重金属镉和铅的富集[J]. 中国水稻科学, 2010, 24(2):183-188.
FAN Zhong-liang, JI Hui, YANG Fei, et al. Accumulation characteristics of cadmium and lead in aboveground organs of indica hybrid rice as affected by different soil types[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2010, 24(2):183-188.
- [21] 叶新新, 孙波. 品种和土壤对水稻吸收的影响及镉生物有效性预测模型研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(3):360-365.
YE Xin-xin, SUN Bo. Reviews on the effects of rice cultivars and soil types on Cd absorption and prediction model for Cd bioavailability[J]. *Soils*, 2012, 44(3):360-365.
- [22] 梁玲, 尚庆伟, 谢修庆, 等. 连云港市郊区稻田土壤与水稻重金属镉含量分析[J]. 现代农业科技, 2012(3):296-300.
LIANG Ling, SHANG Qing-wei, XIE Xiu-qing, et al. Analysis on heavy metal cadmium in paddy soil and rice of suburb in Lianyungang city[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2012(3):296-300.
- [23] 罗婷. 镁、锌和石灰等物质抑制土壤镉有效性及水稻吸收镉的研究[D]. 雅安:四川农业大学, 2013.
LUO Ting. Availability of soil cadmium and its uptake by rice as restrained by using magnesium, zinc, lime and their combinations[D]. Ya'an:Sichuan Agricultural University, 2013.
- [24] 许丹, 马琳, 董岁明, 等. 土壤对重金属 Cu(II)、Cd(II) 的吸附研究[J]. 应用化工, 2013, 8(42):1379-1391.
XU Dan, MA Lin, DONG Sui-ming, et al. Study of the adsorption of copper and cadmium in soil[J]. *Applied Chemical Industry*, 2013, 8(42):1379-1391.
- [25] 代允超, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 石灰和有机质对不同性质镉污染土壤中镉有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3):514-519.
DAI Yun-chao, LÜ Jia-long, CAO Ying-fei, et al. Effects of lime and organic amendments on Cd availability in Cd-contaminated soil with different properties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3):514-519.
- [26] 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.
SUN Cong, CHEN Shi-bao, SONG Wen-en, et al. Accumulation characteristics of cadmium by rice cultivars in soil and its species sensitivity distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(12):2384-2394.
- [27] 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 to rice cultivars as determined by root-elongation tests in soil and its predicted models[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(17):3434-3443.
- [28] McLaughlin M J, Palmer L T, Tiller K G, et al. Increased soil salinity causes elevated cadmium concentrations in field-grown potato tubers[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(5):1013-1018.
- [29] Eriksson J, Oborn I, Jansson G, et al. Factors influencing Cd-content in crops: Results from Swedish field investigations[J]. *Swedish Journal of Agricultural Research*, 1996, 26(3):125-133.
- [30] Mench M, Baize D, Mocquot B. Cadmium availability to wheat in five soil series from the Yonne District, Burgundy, France[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 95(1):93-103.
- [31] 崔玉静, 赵中秋, 陈世宝, 等. 镉在土壤-植物-人体系统中迁移积累及其影响因子[J]. 生态学报, 2003, 23(10):2133-2140.
CUI Yu-jing, ZHAO Zhong-qiu, CHEN Shi-bao, et al. Transfer of cadmium through soil-plant-human and continuum and its affecting factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10):2133-2140.
- [32] 覃都. 水稻镉积累的锰、氮调控研究[D]. 重庆:西南大学, 2009.
QIN Du. Investigation of manganese, nitrogen regulation on cadmium accumulation in rice plants[D]. Chongqing:Southwest University, 2009.
- [33] Römkens P, Brus D, Guo H, 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.
- [34] 陈京都, 刘萌, 顾海燕, 等. 不同土壤质地条件下麦秸、铅对镉在水稻-土壤系统中迁移的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7):1295-1299.
CHEN Jing-du, LIU Meng, GU Hai-yan, et al. Effects of wheat straw and lead on cadmium remove in rice-soil systems in different texture soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7):1295-1299.
- [35] Liu D, Zhang C, Chen X, et al. Effects of pH, Fe, and Cd on the uptake of Fe²⁺ and Cd²⁺ by rice[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(12):8947-8954.
- [36] 王宏康. 土壤中若干有毒元素的环境质量基准研究[J]. 农业环境保护, 1993, 12(4):162-165.
WANG Hong-kang. Research on environmental quality criteria of several toxic elements in soil[J]. *Agro-environmental Protection*, 1993, 12(4):162-165.
- [37] 邵孝侯, 胡霁堂, 秦怀英. 添加石灰、有机物料对酸性土壤 Cd 活性的影响[J]. 南京农业大学学报, 1993, 16(2):47-52.
SHAO Xiao-hou, HU Ai-tang, QIN Huai-ying. Effects of application of lime and organic materials on acidic soil Cd availability[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1993, 16(2):47-52.
- [38] 张青, 李菊梅, 徐明岗, 等. 改良剂对复合污染红壤中镉锌有效性的影响及机理[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):861-865.
ZHANG Qing, LI Ju-mei, XU Ming-gang, et al. Effects of amendments on bioavailability of cadmium and zinc in compound contaminated red soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):861-865.
- [39] 林大松, 徐应明, 孙国红, 等. 土壤 pH、有机质和含水氧化物对镉、铅竞争吸附的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):510-515.
LIN Da-song, XU Ying-ming, SUN Guo-hong, et al. Effects of pH, organic matter and hydrous oxides on competitive adsorption of Cd²⁺ and Pb²⁺ by soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):510-515.
- [40] 苏天明, 李杨瑞, 江泽普, 等. 泥炭对菜心-土壤系统中重金属生物有效性的效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2):339-344.
SU Tian-ming, LI Yang-rui, JIANG Ze-pu, et al. Effect of peat on

- heavy metal bioavailability in soil system and flowering Chinese cabbage[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2):339-344.
- [41] Li P, Wang X X, Zhang T L, et al. Effects of several amendments on rice growth and uptake of copper and cadmium from a contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Science*, 2008, 20(4):449-455.
- [42] 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.
- [43] Park J, Choppala G. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals[J]. *Plant and Soil*, 2011, 348(1):439-451.
- [44] Sung E L, Mahtab A, Adel A, et al. Effects of biochar on soil quality and heavy metal availability in a military shooting range soil in Korea[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in South Korea*, 2011, 44(1):67-77.
- [45] 吴曼, 徐明岗, 徐绍辉, 等. 有机质对红壤和黑土中外源铅镉稳定化过程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3):461-467.
- WU Man, XU Ming-gang, XU Shao-hui, et al. Effects of organic matter on the stabilization process of added cadmium and lead in red soil and black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3):461-467.
- [46] 吴启堂, 陈卢, 王广寿. 水稻不同品种对Cd吸收累积的差异和机理研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1):104-107.
- WU Qi-tang, CHENG Lu, WANG Guang-shou. Differences on Cd uptake and accumulation among rice cultivars and its mechanism[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1):104-107.
- [47] 李坤权, 刘建国, 陆小龙, 等. 水稻不同品种对镉吸收及分配的差异[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5):529-532.
- LI Kun-quan, LIU Jian-guo, LU Xiao-long, et al. Uptake and distribution of cadmium in different rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5):529-532.
- [48] 刘建国. 水稻品种对土壤重金属镉吸收分配的差异及其机理[D]. 扬州:扬州大学, 2004.
- LIU Jian-guo. Variations among rice cultivars in the uptake and translocation of cadmium and lead from soil, and the mechanisms[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2004.
- [49] 仲维功, 杨杰, 陈志德. 水稻品种及其器官对土壤重金属元素Pb、Cd、Hg、As积累的差异[J]. 江苏农业学报, 2006, 22(4):331-338.
- ZHONG Wei-gong, YANG Jie, CHEN Zhi-de. Differences in accumulation and distribution of Pb, Cd, Hg and As in rice cultivars and their Organs[J]. *Jiangsu Academy of Agricultural Sciences*, 2006, 22(4):331-338.
- [50] 王凯荣, 龚惠群. 不同生育期镉胁迫对两种水稻的生长、镉吸收及糙米镉含量的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(6):1197-1203.
- WANG Kai-rong, GONG Hui-qun. Effects of cadmium exposures in different stages on plant growth, Cd uptake and Cd concentrations in brown rice of a hybrid and conventional rice variety[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(6):1197-1203.
- [51] 曾翔, 张玉烛, 王凯荣, 等. 不同品种水稻糙米含镉量差异[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(1):67-69, 83.
- ZENG Xiang, ZHANG Yu-zhu, WANG Kai-rong, et al. Genotype difference of brown rice in Cd content[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(1):67-69, 83.
- [52] 刘旭. 水稻对重金属镉和铅的吸收和运转及栽培环境的影响研究[D]. 扬州:扬州大学, 2007.
- LIU Xu. Studies on uptake and translocation of cadmium and lead in rice cultivars and the effect of cultivation environment[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2007.
- [53] 徐燕玲, 陈能场, 徐胜光, 等. 低镉累积水稻品种的筛选方法研究:品种与类型[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7):1346-1352.
- XU Yan-ling, CHEN Neng-chang, XU Sheng-guang, et al. Breeding rice cultivars with low accumulation of cadmium: Cultivars versus types[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7):1346-1352.
- [54] 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):844-851.
- 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):844-851.
- [55] 廖钢. 水稻对重金属镉胁迫响应的品种间差异[D]. 长沙:湖南农业大学, 2011.
- LIAO Gang. Intraspecific differences of rice cultivars in Cd tolerance[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011.
- [56] 周歆, 周航, 胡森, 等. 不同杂交水稻品种糙米中重金属Cd、Zn、As含量的差异研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(11):145-150.
- ZHOU Xin, ZHOU Hang, HU Miao, et al. The difference of Cd, Zn and As accumulation in different hybrid rice cultivars[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(11):145-150.
- [57] 龙小林, 向珣朝, 徐艳芳, 等. Cd²⁺胁迫对籼稻和粳稻不同生育期生长发育的影响[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(11):61-66.
- LONG Xiao-lin, XIANG Xun-chao, XU Yan-fang, et al. Effects of Cd²⁺ stress on growth and development of rice indica and japonica[J]. 2013, 36(11):61-66.
- [58] 李波, 杜瑞英, 文典, 等. 广东省主栽水稻品种稻米重金属含量差异研究[J]. 热带农业科学, 2014, 34(5):5-10.
- LI Bo, DU Rui-ying, WEN Dian, et al. Difference of heavy metal contents in rice of main cultivated rice varieties in Guangdong Province[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2014, 34(5):5-10.
- [59] 佟倩, 张秀双, 魏晓敏. 不同品种水稻对镉累积特性研究[J]. 北方水稻, 2014, 44(5):1-7.
- TONG Qian, ZHANG Xiu-shuang, WEI Xiao-min. Characteristics of different rice varieties on cadmium accumulation[J]. *North Rice*, 2014, 44(5):1-7.
- [60] 龙小林, 向珣朝, 徐艳芳, 等. 镉胁迫下籼稻和粳稻对镉的吸收、转移和分配研究[J]. 中国水稻科学, 2014, 28(2):177-184.
- LONG Xiao-lin, XIANG Xiu-chao, XU Yan-fang, et al. Absorption, transfer and distribution of Cd in indica and japonica rice under Cd stress[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2014, 28(2):177-184.
- [61] Sukreeyapongse O, Holm P E, Strobel B W, et al. pH-dependent release of cadmium, copper and lead from natural and sludge-amended soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(6):1901-1909.
- [62] 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.