

# 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<sup>①</sup>

郑倩倩<sup>1,2</sup>, 王兴祥<sup>2</sup>, 丁昌峰<sup>2\*</sup>

(1 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210046; 2 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008)

**摘要:** 研究不同水稻品种富集镉(Cd)的敏感性差异和江苏典型水稻土 Cd 的安全阈值, 可为水稻安全生产和产地安全性评价提供理论依据。选择江苏省主栽的 12 个水稻品种和 2 种代表性水稻土(酸性的兴化勤泥土和中性的常熟乌栅土), 通过温室盆栽试验, 分别添加不同浓度的外源 Cd, 研究不同水稻品种对 Cd 的敏感性差异, 并利用物种敏感性分布法(species sensitivity distribution, SSD)推导 2 种土壤 Cd 的安全阈值。结果表明: 不同水稻品种糙米 Cd 含量存在显著的种间差异, 最高含量和最低含量相差 3 ~ 6 倍, 并表现为籼型杂交稻显著高于粳型常规稻和粳型杂交稻。利用 Burr III 型分布函数拟合 12 个水稻品种富集 Cd 的 SSD 曲线, 通过国家食品安全标准反推出勤泥土和乌栅土上保护 95% 的水稻品种糙米不超标的 HC5 值即安全阈值, 其中全量 Cd 分别为 0.78 mg/kg 和 1.17 mg/kg, CaCl<sub>2</sub> 提取态 Cd 分别为 0.13 mg/kg 和 0.14 mg/kg, EDTA 提取态 Cd 分别为 0.46 mg/kg 和 0.64 mg/kg。2 种土壤上基于全量 Cd 的安全阈值均高出我国《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中二级标准的限值(0.30 mg/kg、pH≤7.5)。

**关键词:** 镉; 水稻品种; 水稻土; 安全阈值

**中图分类号:** X53      **文献标识码:** A

镉(Cd)是一种十分危险的重金属元素, 土壤中的 Cd 具有移动性强, 危害性大等特点。据 2014 年环保部和国土部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 我国耕地 Cd 超标率达 7.0%<sup>[1]</sup>。据统计, 我国受 Cd 污染的耕地约有 8 000 hm<sup>2</sup>, 其中两广、贵州和湖南是 Cd 污染比较严重的地区, 污染来源主要是采矿业。随着我国农田土壤重金属污染的加重, “镉米”事件频频发生。水稻作为我国的第一粮食作物, 土壤-水稻系统 Cd 污染已成为当前研究的热点问题。现有研究主要集中在不同品种水稻对 Cd 的富集机理<sup>[2]</sup>、Cd 在土壤-水稻系统迁移转化的根际过程及分子机理与遗传规律<sup>[1]</sup>、Cd 胁迫诱导的生理生化特征<sup>[4]</sup>等方面, 这些研究为 Cd 污染土壤稻米安全生产提供了一定的技术基础。

土壤中 Cd 的安全阈值与土壤类型、土壤性质密切相关。且同一种植物不同品种之间由于生理、生化和遗传特性等不同, 其对 Cd 的吸收能力也有所差异, 因而其安全阈值亦可能不同<sup>[5]</sup>。我国《土壤环境质量标准》

(GB 15618—1995)过于强调全国 Cd 标准限值的统一性, 并未充分考虑土壤类型和作物品种差异带来的影响。此外, 现行的国家标准中 Cd 是以全量制定的标准值, 全量只能代表 Cd 的总贮量, 并不能真正表达 Cd 的供给水平, 土壤中有效态 Cd 含量更能反映植物吸收与生态危害状况<sup>[6]</sup>。但是在实际应用中, 有效态 Cd 标准限值的可靠性取决于有效态测定方法的可靠性, 目前尚没有一种科学可靠的提取方法。另外, 单独利用有效态指标表征土壤安全阈值同样存在一些问题, 如实际大田生产上, 土壤有效态 Cd 含量随水稻生育期、田间水分条件等而变化, 因此难以确定统一的土壤采样时间<sup>[7]</sup>。总量 Cd 虽然不能反映 Cd 的有效性, 但它具有测定方法成熟、数据结果比较稳定等优点<sup>[8]</sup>。因此, 在制定地方性标准中将有效态标准限值与全量标准限值同时使用较为适宜。

物种敏感性分布法(species sensitivity distribution, SSD)可用来推导土壤重金属安全阈值。物种敏感性分布法最早应用于水环境中污染物的生态风

基金项目: 中国科学院南京土壤研究所“一三五”计划和领域前沿项目(ISSASIP1612)和江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20151054)资助。

\* 通讯作者(cfding@issas.ac.cn)

作者简介: 郑倩倩(1992—), 女, 福建莆田人, 硕士研究生, 主要从事环境地理研究。E-mail: qianqianzhengnju@163.com

险评价,是基于不同物种对某污染物的敏感性存在差异且能够被一个概率分布所描述,通过来自于这个分布的生物测试获得的有限物种的毒性阈值来估算该分布的无效应浓度(PNEC),从而实现该污染物在物种水平甚至整个生态水平上的风险评价。近几年该方法也逐渐应用于土壤环境中重金属安全阈值的研究<sup>[9-10]</sup>。目前常用于拟合 SSD 分布的分布函数主要有 Log-logistic、Burr III、Log-normal 等,以拟合好的 SSD 曲线上不同百分点对应的浓度值(hazardous concentration, HCp)为基准值,来表示不同的生态风险保护水平,其风险水平依据土地利用类型而定,农业用地通常选取 5% 处所对应的 HC5 值,即保护 95% 生物物种限值<sup>[11-12]</sup>。

本文通过采集江苏省兴化勤泥土和常熟乌栅土,添加不同浓度的外源 Cd,选用江苏省主栽的 12 种水稻品种,通过温室盆栽试验,研究不同水稻品种富集 Cd 的敏感性差异,以水稻糙米 Cd 的生物富集系数(BCF)作为物种敏感性评价指标,并采用 Burr III 对 12 个水稻品种对 Cd 的物种敏感性分布频次和基于保护 95% 水稻品种的土壤全量 Cd 和不同提取态 Cd 的安全阈值(HC5)进行推导,为该地区稻米安全生产和农产品产地安全性评价提供重要参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

供试土壤为江苏省兴化勤泥土和常熟乌栅土,均为脱潜水稻土亚类黄斑黏田土。将 2 种土壤自然风干,剔去残渣、碎砾,研磨后过 2 mm 尼龙筛,储存备用。另取少许土样,分别用于土壤常规分析和 Cd 含量测定。测得的土壤基本理化性状见表 1。

供试水稻品种选用江苏省不同地区主栽的 12 种水稻品种,其中包括 7 种粳型常规稻、2 种粳型杂交稻和 3 种籼型杂交稻。具体见表 2。

表 1 供试土壤基本理化性质  
Table 1 Basic physicochemical properties of tested soils

理化指标	兴化勤泥土	常熟乌栅土
pH	5.70	7.15
Cd(mg/kg)	0.14	0.15
CEC(cmol/kg)	16.3	22.3
有机质(g/kg)	28.3	35.3
全氮(g/kg)	1.59	2.09
全磷(g/kg)	0.94	0.96
全钾(g/kg)	15.2	15.9
砂粒(2~0.02 mm)(g/kg)	100	83.6
粉粒(0.02~0.002 mm)(g/kg)	683	679
黏粒(<0.002 mm)(g/kg)	216	237

表 2 供试水稻品种  
Table 2 Rice cultivars used in experiment

编号	水稻名称	水稻类型	全生育期(d)	编号	水稻名称	水稻类型	全生育期(d)
P1	南粳 52	粳型常规稻	156	P7	苏粳 9 号	粳型常规稻	163
P2	武运粳 27 号	粳型常规稻	145	P8	甬优 2640	粳型三系杂交稻	125
P3	扬育粳 2 号	粳型常规稻	156	P9	通优粳 1 号	粳型三系杂交稻	160
P4	镇稻 18 号	粳型常规稻	161	P10	C 两优 4418	籼型两系杂交水稻	133
P5	南粳 9108	粳型常规稻	153	P11	镇籼优 146	籼型三系杂交水稻	146
P6	宁粳 4 号	粳型常规稻	155	P12	宁籼优 8 号	籼型三系杂交水稻	138

### 1.2 试验处理

盆栽试验在中国科学院南京土壤研究所温室内进行,在每个塑料盆中装入 6 kg 风干并且过 2 mm 尼龙筛的 2 种土样,以液态形式加入 CdSO<sub>4</sub>·8H<sub>2</sub>O 进行老化,Cd 添加浓度为我国《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)二级标准(0.30 mg/kg、pH≤7.5)的 2 倍和 4 倍,即在勤泥土和乌栅土上低浓度处理 Cd1 为 0.60 mg/kg,高浓度处理 Cd2 为 1.20 mg/kg,同时设置不加 Cd 处理作为对照(CK),每个处理 3 次重复。外源添加的 Cd 与土壤充分混合均匀,自然状态进行老化培养 3 个月。老化培养期间土壤维持田间最大持水量的 80%。

老化培养结束后,将育苗后的水稻幼苗移栽到塑料盆中,每盆 3 穴,每穴 2 株。移栽后,水稻全生育期盆钵土面保持 2~3 cm 水层,直到收获前 2 个星期停止加水。为了保证土壤有充足的肥力供水稻正常生长,水稻移栽前,对每盆施用相同量的氮磷钾底肥。

### 1.3 样品采集与分析

取老化后的土壤带回实验室,用于测定土壤中全量 Cd(total-Cd)、CaCl<sub>2</sub> 提取态 Cd(CaCl<sub>2</sub>-Cd)和 EDTA 提取态 Cd(EDTA-Cd)的含量。待成熟后陆续收获水稻,带回实验室后,用剪刀把各株水稻的穗剪下,用自来水小心洗净,再用去离子水清洗 3 遍后,用牛皮纸装好放入 50~60℃ 的烘箱中烘至恒重。烘干后分

别对稻穗进行脱粒、去壳、称重和粉碎，最后装入标记好的密封袋中，消解测定。

糙米 Cd 含量采用  $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$  消解后用石墨炉原子吸收分光光度计 (Varian AA 240 FS+GTA) 进行测定。具体方法为：称取 0.25 g 的样品于消解罐中，依次添加 5 ml 浓硝酸(优级纯)和 3 ml  $\text{H}_2\text{O}_2$ ，加盖拧紧，摇匀放置过夜，放入密封烘箱中 140 °C 消解 2 h，冷却后 150 °C 赶酸 30 min 至尽干，用 5% 硝酸转移定容至 15 ml 的离心管中，利用石墨炉原子分光光度计进行 Cd 含量的测定。为了保证分析质量，样品消解和上机测定过程中带有洋葱标准物质(GSB-27)和土壤标准物质(GBW07444)进行质量控制，其回收率分别为 95%~106% 和 94%~103%。土壤有效态 Cd 的提取分别采用 0.01 mol/L 的  $\text{CaCl}_2$  和 0.05 mol/L 的 EDTA。具体方法是：称取 5 g 土样于 50 ml 的离心管中，加入 25 ml 0.01 mol/L 的  $\text{CaCl}_2$ (或 0.05 mol/L 的 EDTA)，放入水平振荡器，以转速 180 r/min 振荡 2 h，然后以 4 000 r/min 离心 5 min，过 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜后的滤液收集于 15 ml 的离心管中，最后用石墨炉原子吸收分光光度计进行测定。

#### 1.4 数据处理

1)生物富集系数。生物富集系数(BCF)表示土壤-植物体系中重金属迁移的难易程度，能较清楚地表示植株不同器官对重金属元素的吸收积累能力。本文中基于土壤全量 Cd、 $\text{CaCl}_2$  提取态 Cd 和 EDTA 提取态 Cd 的生物富集系数分别用  $\text{BCF}_{\text{total-Cd}}$ 、 $\text{BCF}_{\text{CaCl}_2\text{-Cd}}$  和  $\text{BCF}_{\text{EDTA-Cd}}$  来表示：

$$\text{BCF} = \frac{\text{Cd}_{\text{rice}}}{\text{Cd}_{\text{soil}}} \quad (1)$$

式中： $\text{Cd}_{\text{rice}}$  表示糙米中的 Cd 含量，单位为 mg/kg；

$\text{Cd}_{\text{soil}}$  表示土壤中的 Cd 含量(分别为土壤中全量 Cd、 $\text{CaCl}_2$  提取态 Cd 和 EDTA 提取态 Cd 的含量)，单位为 mg/kg。

SSD 曲线拟合与 HC5 值推导。将糙米的生物富集数据取倒数后(1/BCF)按照递增的顺序排列，然后利用 Burr III 分布函数进行拟合 SSD 曲线，进而以国家食品安全标准(GB 2762—2017, 0.2 mg/kg)为基准，反推出土壤 Cd 对水稻的安全阈值(HC5)。澳大利亚联邦科学和工业研究组织提供了该方法的说明以及相关计算软件 BurrliOZ (<http://www.cmis.csiro.au/envir/burrlioz/>)。

Burr III 型函数的参数方程为：

$$y = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{b}{x}\right)^c\right]^k} \quad (2)$$

式中： $b$ 、 $c$ 、 $k$  为函数的 3 个参数。当  $k$  趋于无穷大时，Burr III 分布可变化为 ReWeibull 分布；当  $c$  趋向于无穷大时，可变化为 RePareto 分布。

另，本文采用 Excel2007、SPSS18.0 及 SigmaPlot10 进行数据的统计分析和绘图，利用 LSD 法进行差异显著性分析(显著水平 0.05)。

## 2 结果与分析

### 2.1 老化后土壤全量 Cd、不同提取态 Cd 含量

表 3 显示了老化后土壤全量 Cd、 $\text{CaCl}_2$  提取态 Cd 及 EDTA 提取态 Cd 的含量。由表 3 数据可得， $\text{CaCl}_2$  提取态 Cd 的含量占全量 Cd 含量的 7%~43%，EDTA 提取态 Cd 的含量占全量 Cd 含量的 60%~64%，EDTA 提取态 Cd 的含量显著高于  $\text{CaCl}_2$  提取态 Cd 的含量。

表 3 老化后土壤全量 Cd 及不同提取态 Cd 含量(mg/kg)

Table 3 Total and extracted Cd concentrations in soils after aging

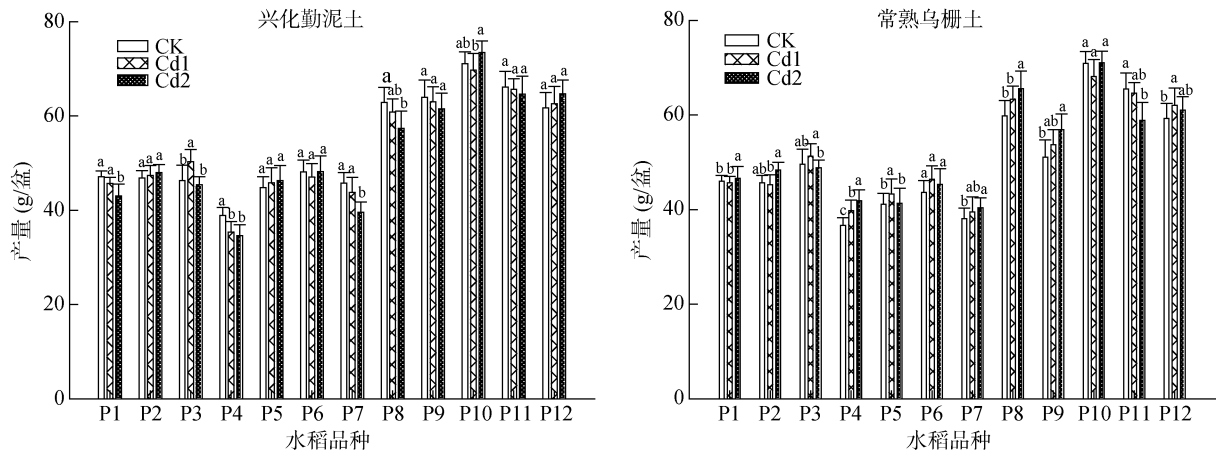
处理	兴化勤泥土			常熟乌栅土		
	total-Cd	$\text{CaCl}_2\text{-Cd}$	EDTA-Cd	total-Cd	$\text{CaCl}_2\text{-Cd}$	EDTA-Cd
CK	0.14 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.13 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.08 ± 0.01
Cd1	0.78 ± 0.05	0.10 ± 0.01	0.49 ± 0.02	0.72 ± 0.10	0.06 ± 0.01	0.43 ± 0.01
Cd2	1.39 ± 0.14	0.17 ± 0.01	0.93 ± 0.02	1.36 ± 0.10	0.10 ± 0.01	0.83 ± 0.01

### 2.2 不同水稻品种的产量和糙米 Cd 含量及两者的相关关系

不同 Cd 处理下，12 个水稻品种的产量见图 1。图 1 中显示，不同品种间的产量存在显著差异，但是同一品种在不同 Cd 处理下的产量差异不显著。在勤泥土上，粳型常规稻、粳型杂交稻和籼型杂交稻产量的平均值分别为 44.7、61.6 和 66.6 g/盆；而在乌栅土

上，分别为 44.1、58.4 和 64.6 g/盆。由此可知，在 2 种土壤类型下的水稻产量高低排序均是：籼型杂交稻>粳型杂交稻>粳型常规稻。

由图 2 可知，糙米 Cd 含量随着土壤外源 Cd 添加量的增加而升高，且不同品种间糙米 Cd 含量差别较大，籼型杂交稻的糙米 Cd 含量远远高于粳型常规稻和粳型杂交稻。在勤泥土上，Cd1 和 Cd2 处理糙米



(柱图上方不同小写字母表示同一水稻品种不同 Cd 处理间差异在  $P < 0.05$  水平显著; 下同)

图 1 不同 Cd 处理下 12 个水稻品种的产量

Fig. 1 Grain yields of 12 rice cultivars under different Cd treatments

Cd 含量变化范围分别为 0.03 ~ 0.22 mg/kg 和 0.06 ~ 0.38 mg/kg, 最高含量和最低含量分别相差 6 倍和 5 倍; 粳型常规稻、粳型杂交稻和籼型杂交稻在 Cd1 处理下糙米平均 Cd 含量分别为 0.05、0.06、0.13 mg/kg, 在 Cd2 处理下分别为 0.10、0.09、0.23 mg/kg, 其中 C 两优 4418(P10)在 2 个 Cd 处理下的糙米 Cd 含量均超过了食品安全国家标准。在乌栅土上, Cd1 和 Cd2 处理糙米 Cd 含量变化范围分别为 0.03 ~ 0.12 mg/kg 和 0.04 ~ 0.22 mg/kg, 最高含量和最低含量分别相差 3 倍和 4 倍; 3 种水稻类型在 Cd1 处理下糙米平均 Cd 含量分别为 0.04、0.05、0.09 mg/kg, 在 Cd2 处理下分别为 0.08、0.06、0.17 mg/kg, 其中 C 两优 4418 在 Cd2 处理下的糙米 Cd 含量超过了食品安全国家标准。

分别对勤泥土和乌栅土上不同 Cd 处理下的 12 个水稻品种糙米 Cd 含量和产量作 Pearson 相关性分

析, 结果表明, 在勤泥土上, Cd1 和 Cd2 处理下二者的相关系数分别为 0.64( $P < 0.05$ )、0.74( $P < 0.01$ ); 在乌栅土上, Cd1 和 Cd2 处理下二者的相关系数分别为 0.74( $P < 0.01$ )、0.67( $P < 0.05$ )。说明水稻产量和糙米 Cd 含量之间存在正相关关系。

### 2.3 不同水稻品种糙米 Cd 的生物富集系数(BCF)

表 4 为 2 种土壤类型上 12 个水稻品种糙米 Cd 的 BCF 值。由表 4 数据可知, 在 Cd1 和 Cd2 处理下, 各水稻品种 BCF 值变化不显著。对比相同 Cd 处理下不同水稻品种的 BCF 值, 可以发现不同品种间的 BCF 值存在差异, 其中籼型杂交稻高于粳型杂交稻和粳型常规稻。

### 2.4 基于不同土壤 Cd 形态的水稻土安全阈值

将 12 个水稻品种分别基于土壤全量 Cd、CaCl<sub>2</sub> 提取态 Cd 以及 EDTA 提取态 Cd 下的 BCF 值通过取倒数后输入 BurrliOZ 软件进行计算, 得到了不同水

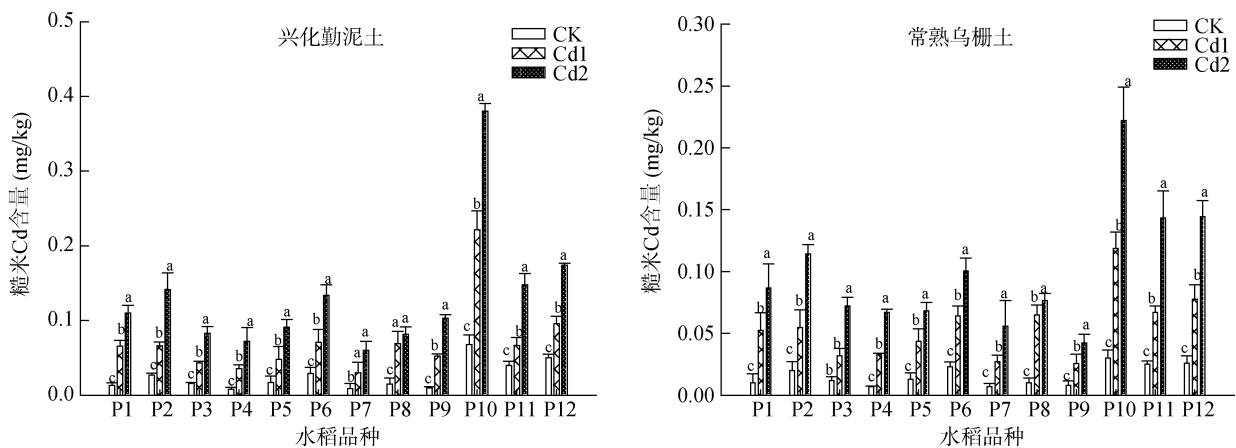


图 2 不同 Cd 处理下 12 个水稻品种糙米 Cd 含量

Fig. 2 Cd concentrations in brown rice of 12 rice cultivars under different Cd treatments

表 4 兴化勤泥土和常熟乌栅土上 12 个水稻品种糙米 Cd 的 BCF 值  
Table 4 Cd bioconcentration factors in brown rice of 12 rice cultivars grown in Xinghua soil and Changshu Soil

土壤	水稻品种	BCF <sub>total-Cd</sub>			BCF <sub>CaCl<sub>2</sub>-Cd</sub>			BCF <sub>EDTA-Cd</sub>		
		CK	Cd1	Cd2	CK	Cd1	Cd2	CK	Cd1	Cd2
兴化勤泥土	P1	0.09	0.08	0.07	0.22	0.67	0.66	0.15	0.14	0.12
	P2	0.19	0.08	0.09	0.45	0.69	0.85	0.31	0.14	0.15
	P3	0.11	0.05	0.05	0.27	0.45	0.50	0.18	0.09	0.09
	P4	0.06	0.04	0.05	0.13	0.37	0.43	0.09	0.08	0.08
	P5	0.12	0.06	0.06	0.28	0.50	0.55	0.19	0.10	0.10
	P6	0.20	0.08	0.08	0.48	0.74	0.71	0.33	0.15	0.14
	P7	0.06	0.04	0.04	0.15	0.31	0.36	0.10	0.06	0.06
	P8	0.10	0.08	0.05	0.25	0.72	0.49	0.17	0.14	0.09
	P9	0.07	0.06	0.06	0.17	0.55	0.62	0.11	0.11	0.10
	P10	0.47	0.26	0.24	1.13	2.31	2.29	0.77	0.45	0.41
	P11	0.28	0.08	0.09	0.67	0.70	0.89	0.46	0.14	0.16
	P12	0.35	0.11	0.11	0.83	1.01	1.04	0.57	0.20	0.19
常熟乌栅土	P1	0.07	0.07	0.06	0.21	0.87	0.83	0.13	0.12	0.10
	P2	0.14	0.07	0.08	0.43	0.91	1.10	0.25	0.13	0.14
	P3	0.08	0.04	0.05	0.26	0.53	0.69	0.15	0.07	0.09
	P4	0.05	0.04	0.05	0.15	0.55	0.65	0.09	0.08	0.08
	P5	0.09	0.06	0.05	0.28	0.73	0.66	0.17	0.10	0.08
	P6	0.16	0.08	0.07	0.49	1.07	0.97	0.29	0.15	0.12
	P7	0.05	0.04	0.04	0.15	0.45	0.54	0.09	0.06	0.07
	P8	0.07	0.08	0.05	0.21	1.08	0.74	0.13	0.15	0.09
	P9	0.05	0.03	0.03	0.17	0.43	0.41	0.10	0.06	0.05
	P10	0.20	0.15	0.15	0.64	1.98	2.14	0.38	0.28	0.27
	P11	0.17	0.09	0.10	0.53	1.11	1.38	0.32	0.16	0.17
	P12	0.18	0.10	0.10	0.55	1.29	1.39	0.33	0.18	0.17

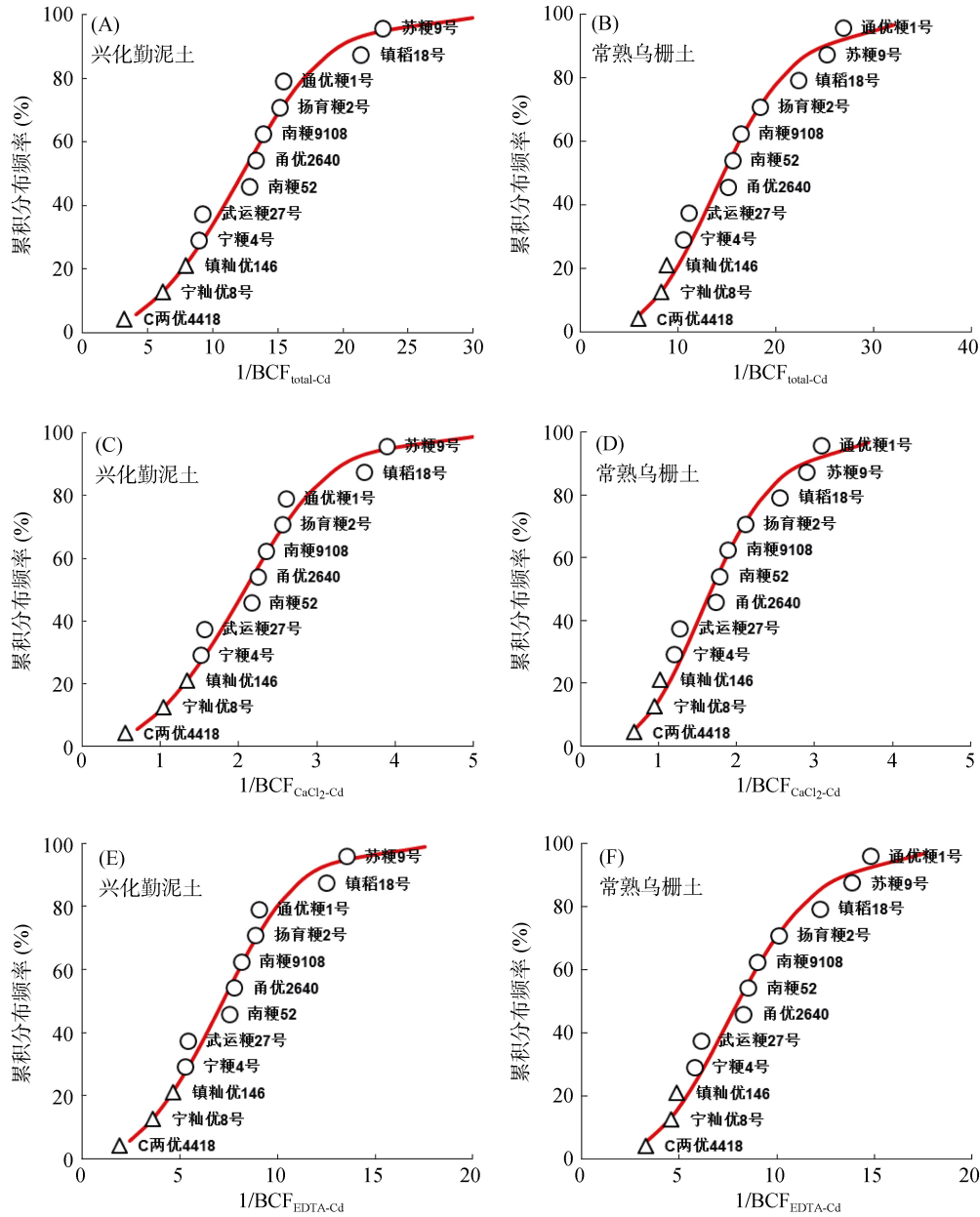
稻品种的 SSD 曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出，在 2 种土壤类型下，12 种水稻品种富集 Cd 的敏感性存在显著差异。C 两优 4418 在 2 种土壤类型下富集 Cd 最为敏感，而苏粳 9 号在勤泥土上富集 Cd 较不敏感，通优粳 1 号在乌栅土上富集 Cd 较不敏感。并且在 2 种土壤类型下，籼型杂交稻总体表现出较强的 Cd 的敏感性。

经过 Burr III 模型计算得到勤泥土和乌栅土上基于土壤全量 Cd 和不同提取态 Cd 的 HC5 值如表 5 所示。对比基于土壤全量 Cd 和 EDTA 提取态 Cd 的 2 种土壤安全阈值，乌栅土显著高于勤泥土；而基于 CaCl<sub>2</sub> 提取态 Cd 的 2 种土壤安全阈值差异并不显著。

### 3 讨论

对比 12 个水稻品种分别在 Cd1 和 Cd2 处理下的产量，发现随着土壤 Cd 添加量的增加，水稻产量的变化规律并不显著，说明低量 Cd 污染不会对水稻产量产生显著影响。孙聪等<sup>[9]</sup>选取了 17 个水稻品种，

添加土壤 Cd 含量范围为 0.30~6.0 mg/kg，发现在低含量(<0.60 mg/kg)范围内对水稻产量的抑制作用并不明显，但是随土壤 Cd 含量的提高，这种抑制作用越来越明显。本研究中 12 个水稻品种糙米 Cd 含量和产量之间存在正相关关系，这是由于本研究选用的 12 个水稻品种中，籼型杂交稻和部分粳型常规稻均属于高产高 Cd 品种(结合图 1 和图 2 可知)。吴启堂等<sup>[13]</sup>选用了 20 个水稻品种(杂交稻、优质稻和常规稻)，通过回归分析发现其产量和糙米 Cd 含量之间的相关性较强，并指出这 20 个水稻品种中杂交稻和优质稻分别为高产高 Cd 和低产低 Cd 水稻品种，常规稻则因品种而异。蔡秋玲等<sup>[14]</sup>选取了 84 个水稻品种，根据糙米富集 Cd 的能力和产量将其划分为 4 个组别(高产高 Cd、低产低 Cd、高产低 Cd 和低产高 Cd)，发现这些品种糙米 Cd 的富集能力与产量之间并不存在相关性。因此，所选用水稻品种的差异是决定其产量和糙米 Cd 含量是否存在相关性以及相关程度的关键因素。



(图 A、B 代表基于土壤全量 Cd 的 SSD 曲线，C、D 代表基于 CaCl<sub>2</sub> 提取态 Cd 的 SSD 曲线，E、F 代表基于 EDTA 提取态 Cd 的 SSD 曲线； $\circ$  表示籼稻品种， $\triangle$  表示粳稻品种)

图 3 12 个水稻品种 Cd 生物富集系数的 SSD 曲线

Fig. 3 SSD curves of BCF values for Cd among 12 rice cultivars

表 5 基于 Burr III 拟合的 2 种土壤不同形态 Cd 的安全阈值(HC5)及拟合参数

Table 5 Safety thresholds (HC5) of Cd in two soil types fitted by Burr III model and associated parameters

土壤类型	Cd 形态	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>k</i>	HC5(mg/kg)
兴化勤泥土	total-Cd	16.9	6.07	0.34	0.78
	CaCl <sub>2</sub> -Cd	2.84	6.07	0.34	0.13
	EDTA-Cd	9.88	6.07	0.34	0.46
常熟乌栅土	total-Cd	17.5	4.66	0.59	1.17
	CaCl <sub>2</sub> -Cd	1.98	4.58	0.61	0.14
	EDTA-Cd	9.61	4.67	0.59	0.64

12个水稻品种糙米 Cd 含量随着土壤 Cd 处理含量的升高而升高,且同一 Cd 处理下,不同品种糙米 Cd 含量差异显著,其中籼型杂交稻显著高于粳型杂交稻和粳型常规稻。这与李坤权等<sup>[15]</sup>和龙小林等<sup>[16]</sup>研究结果一致。不同水稻品种糙米 Cd 含量差异主要受根部吸收和向地上转运这两个过程的影响<sup>[17]</sup>。

本研究中勤泥土和乌栅土上同一 Cd 处理(0.60 mg/kg)下,12个水稻品种糙米 Cd 含量分别相差7倍和5倍。李坤权等<sup>[15]</sup>选取了20个水稻品种,通过人工添加外源 Cd 的盆栽试验,得出 Cd 在水稻不同品种糙米内浓度相差3倍。因此,在进行土壤重金属安全阈值研究时应当考虑品种差异带来的影响。现有关于土壤 Cd 安全阈值的研究大部分是基于一个水稻品种,如范中亮等<sup>[18]</sup>以杂交籼稻 K 优 818 为材料,选择两种 pH 分别为 5.94 和 7.50 的土壤,通过人工添加外源 Cd 的盆栽试验,推导出两种土壤基于全量 Cd 的安全阈值分别为 0.74 mg/kg 和 1.63 mg/kg。陈宏坪等<sup>[19]</sup>采集了全国 8 个地区的水稻土(pH 4.94 ~ 7.75),水稻品种选用籼型常规稻中嘉早 17,通过人工添加外源 Cd 的盆栽试验,得出保证稻米安全生产的 8 种水稻土基于全量 Cd 的临界范围为 0.70 ~ 4.79 mg/kg。本研究基于 12 个水稻品种对土壤 Cd 的敏感性差异,利用糙米 Cd 的富集系数和 Burr III 型分布函数拟合出 SSD 曲线,以国家食品安全标准(0.20 mg/kg)为基准,反推出基于土壤全量 Cd 的勤泥土和乌栅土的安全阈值分别为 0.78 mg/kg 和 1.17 mg/kg,与我国《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)相比,均高出其限值(0.30 mg/kg、pH ≤ 7.5)。

土壤环境中 Cd 含量的自然背景值超标与人为污染超标有着本质的不同。目前,按照《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)评价土壤 Cd 含量会出现高背景值点位无外源污染但超标的情况。因为该国标中 Cd 是以平均背景含量及 95% 置信水平来确定的,代表的是该元素的总贮存量,不一定代表该地区的 Cd 污染水平。土壤中 Cd 一般以可给态、交换态和难溶态存在,不同存在形态的 Cd 其迁移、转化、吸附、解吸能力不同,其受土壤 pH 和有机质含量影响较大。在监测评价中有效态标准值无疑优于土壤 Cd 全量值<sup>[20-21]</sup>。当土壤 Cd 背景值较高时,利用有效态标准值可以更准确地对该地区 Cd 污染水平进行评价。现有关于土壤 Cd 安全阈值的研究主要基于土壤全量 Cd,对于基于土壤有效态 Cd 安全阈值的研究较少,本研究新增了基于 SSD 法的对土壤有效态 Cd 的安全阈值推导。由于同一土壤中有有效态 Cd 含量受

提取剂的影响较大,本研究采用 0.01 mol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 和 0.05 mol/L 的 EDTA 这两种提取剂进行提取。CaCl<sub>2</sub> 溶液离子强度与土壤溶液相似,其提取的是土壤中植物可直接利用的易移动态 Cd。EDTA 被认为是一种比较强的络合剂,可与土壤中多种重金属和碳酸钙等发生络合作用,其提取的还包括对植物潜在有效的可移动态 Cd,其提取的 Cd 量比 CaCl<sub>2</sub> 大很多<sup>[22]</sup>。0.01 mol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 是在进行有效态 Cd 提取中常用的提取剂,但提取率不高,勤泥土和乌栅土在 CaCl<sub>2</sub> 提取态 Cd 下的安全阈值分别为 0.13 mg/kg 和 0.14 mg/kg,差异并不显著。而 EDTA 作为一种较强的提取剂,勤泥土和乌栅土在 EDTA 提取态 Cd 下的安全阈值分别为 0.46 mg/kg 和 0.64 mg/kg,两种土壤差异显著。

土壤重金属的植物有效性与土壤理化性质密切相关,具有不同理化性质如 pH 和有机质含量的勤泥土和乌栅土,其安全阈值也与本研究推导出的存在一定差异。因此,下一步需要建立生物富集预测模型,将不同土壤上的生物富集数据归一化到同一土壤上,拟合 SSD 曲线并推导 HC5 值,最终确立 HC5 值与土壤理化性质的定量关系。与田间实际污染土壤相比,外源 Cd 盐的添加以及温室盆栽的试验方法很有可能促进了水稻对 Cd 的富集,在本试验结果广泛应用之前还需要在田间条件下进一步验证。

由于温室盆栽试验在水稻全生育期内需保持长期淹水状态,这会显著减少水稻对 Cd 的吸收,与田间试验相比,本研究水稻糙米 Cd 含量相对偏低。水稻在不同生育期、不同水分管理模式下的土壤有效态 Cd 含量差别较大。王英<sup>[23]</sup>通过盆栽试验,发现水稻土中有效态 Cd 含量在水稻整个生育期内呈先降低后升高的趋势。刘昭兵等<sup>[24]</sup>发现不同水分管理模式下水稻土中有效态 Cd 含量高低顺序为:全生育期淹水 < 乳熟期晒田 < 湿润灌溉 < 分蘖-乳熟期两次晒田。因此,在基于有效态 Cd 的安全阈值实际应用过程中,如何确定合适的土壤采样时间还需要进一步研究。此外,由于有效态 Cd 提取受提取剂、提取时间、温度等影响较大,提取剂的科学性与广谱性问题仍没有得到实质性的解决。无论是否建立合适的有效态标准,在进行土壤环境质量评价时都不应忽略总量的重要性,在制定区域和地方性标准时可将总量和有效态含量一并考虑<sup>[25-26]</sup>。

## 4 结论

不同水稻品种富集 Cd 的敏感性存在显著差异,其中籼型杂交稻显著高于粳型常规稻和粳型杂交稻。



本文结合国家食品安全标准中Cd的限量标准和水稻糙米Cd的BCF值,对勤泥土和乌栅土两种水稻土Cd的安全阈值进行推导,其中全量Cd分别为0.78 mg/kg和1.17 mg/kg, CaCl<sub>2</sub>提取态Cd分别为0.13 mg/kg和0.14 mg/kg, EDTA提取态Cd分别为0.46 mg/kg和0.64 mg/kg。两种土壤全量Cd的安全阈值均高出我国《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)的二级指标(0.30 mg/kg、pH≤7.5),因此该标准值对于种植粳稻为主的水稻土来说可能过于严格,应当适当放宽。

#### 参考文献:

- [1] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 2014(5): 10-14
- [2] 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
- [3] Yu H, Wang J L, Fang W, Yuan J G, Yang Z Y. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice[J]. The Science of the total environment, 2006, 370(2/3): 302-309
- [4] Yoshihara T, Goto F, Shoji K. Cross relationships of Cu, Fe, Zn, Mn, and Cd accumulations in common japonica and indica rice cultivars in Japan[J]. Environmental & Experimental Botany, 2010, 68(2): 180-187
- [5] 周东美, 王玉军, 陈怀满. 论土壤环境质量重金属标准的独立性与依存性[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(2): 205-216
- [6] 青长乐, 牟树森, 蒲富永, 等. 论土壤重金属毒性临界值[J]. 农业环境保护, 1992, 11(2): 51-56
- [7] 徐晓炎. 土壤中镉的吸附解吸特性及其对水稻吸收镉的影响[M]. 南京: 南京农业大学, 2004
- [8] 赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 等. 土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议[J]. 环境科学, 2014, 35(4): 1491-1497
- [9] 孙聪, 陈世宝, 马义兵, 等. 基于物种敏感性分布(Burr-III)模型预测 Cd 对水稻毒害的生态风险阈值 HC<sub>5</sub> [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2316-2322
- [10] 吴丰昌, 冯承莲, 张瑞卿, 等. 我国典型污染物水质基准研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(5): 665-672
- [11] 丁昌峰, 李孝刚, 王兴祥. 我国两种典型土壤汞的安全阈值研究——以根茎类蔬菜为例[J]. 土壤, 2015, 47(2): 427-434
- [12] Heemsbergen D A, Warne M S, Broos K. Application of phytotoxicity data to a new Australian soil quality guideline framework for biosolids[J]. The Science of the total environment, 2009, 407(8): 2546-2556
- [13] 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
- [14] 蔡秋玲, 林大松, 王果, 等. 不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1028-1033
- [15] 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
- [16] 龙小林, 向朝, 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
- [17] 李鹏, 葛滢, 吴龙华, 等. 两种籽粒镉含量不同水稻的镉吸收转运及其生理效应差异初探[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(3): 291-296
- [18] 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
- [19] 陈宏坪, 戴碧川, 杨新萍, 等. 土壤、水稻籽粒镉含量相关性分析及水稻产地土壤镉的临界值研究[J]. 土壤, 2018, 50(2): 361-368
- [20] 张红振, 骆永明, 章海波, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究 V. 镉在土壤—作物系统中的富集规律与农产品质量安全[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 628-638
- [21] 赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 等. 土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议[J]. 环境科学, 2014, 35(4): 1492-1496
- [22] 胡宁静, 骆永明, 宋静, 等. 土壤中植物有效态镉提取方法比较[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(3): 64-68
- [23] 王英. 土壤-水稻系统镉生物有效性的动态特征[M]. 南宁: 广西大学, 2007
- [24] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 水分管理模式对水稻吸收累积镉的影响及其作用机理[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 908-914
- [25] 丁昌峰. 根茎类蔬菜土壤镉铅铬汞砷的安全阈值研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014
- [26] 胡宁静, 骆永明, 宋静. 长江三角洲地区典型土壤对镉的吸附及其有机质、pH 和温度的关系[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 437-443



## Food Safety Thresholds of Cadmium in Two Typical Paddy Soils of Jiangsu Province Based on Species Sensitivity Distribution

ZHENG Qianqian<sup>1,2</sup>, WANG Xingxiang<sup>2</sup>, DING Changfeng<sup>2\*</sup>

(1 *School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210046, China*; 2 *Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

**Abstract:** Understanding the sensitivity differences of cadmium (Cd) uptake by different rice cultivars and the food safety thresholds of Cd in typical paddy soils of Jiangsu Province is necessary for the safe production of rice and the environmental assessment of paddy field. In the present study, twelve rice cultivars widely grown in Jiangsu Province were selected, and two paddy soils (acid soil sampled from Xinghua City and neutral soil sampled from Changshu City) with different physicochemical properties were collected from Jiangsu Province. The soils were spiked with Cd in different Cd addition levels. The greenhouse pot experiments were conducted to study the sensitivity differences of accumulation ability of different rice cultivars. The results indicated that there were significant differences in Cd concentrations in brown rice due to the difference of enrichment ability, the highest concentration is 3–6 times higher than the minimum concentration, and the indica hybrid rice was significantly higher than that of japonica regular rice and japonica hybrid rice. The SSD curves for Cd were fitted with Burr III type distribution based on the bioconcentration factors of the twelve rice cultivars. The 5% hazardous concentrations were then derived inversely by the national food safety standard. The threshold values based on total Cd content in Xinghua soil and Changshu soil were 0.78 and 1.17 mg/kg respectively. The corresponding threshold values based on CaCl<sub>2</sub> extractable Cd were 0.13 and 0.14 mg/kg, while the corresponding threshold values based on EDTA extractable Cd were 0.46 and 0.64 mg/kg, respectively. Cd thresholds based on total Cd in the soils were higher than the 2<sup>nd</sup> Grade (0.30 mg/kg for soils with pH ≤ 7.5) of the Chinese Soil Environmental Quality Standard (GB 15618–1995).

**Key words:** Cadmium; Rice cultivars; Paddy soils; Food safety threshold