

土壤与水稻籽粒镉含量相关性分析及水稻产地土壤镉临界值的研究^①

陈宏坪¹, 戴碧川¹, 杨新萍^{1*}, 王国庆², 林玉锁², 赵方杰¹

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要:在全国采集 8 个水稻产区、不同镉(Cd)含量的水稻土, 添加 0~4 mg/kg 外源 Cd, 通过盆栽试验, 分析水稻土、水稻籽粒 Cd 含量间的相关性, 基于水稻籽粒 Cd 含量符合食品安全国家标准污染物限值(GB 2762-2012)的前提下, 确定 8 个水稻产地土壤的 Cd 临界值。结果表明: 水稻土中 Cd 含量为 0.20~6.27 mg/kg 时, 随土壤 Cd 浓度增加, 水稻生长没有出现 Cd 毒害症状。籽粒 Cd 含量随水稻土 Cd 浓度的增加而增加, Logistic 方程拟合表明籽粒 Cd 含量和水稻土 Cd 浓度间相关性显著; 依据食品安全国家标准中稻米 Cd 限量值(0.2 mg/kg), 反推得到 8 种水稻土 Cd 临界值范围为 0.70~4.79 mg/kg, 与现行土壤环境质量标准(GB15618-1995)相比, 均高于其相应限值(0.3 mg/kg、pH≤7.5, 0.6 mg/kg、pH>7.5); 对土壤理化性质和水稻土 Cd 临界值间关系进行多元回归分析, 发现水稻土 Cd 临界值与 pH 和土壤黏粒显著相关($R^2 = 0.83$, $P < 0.01$)。

关键词: 镉; 水稻; 相关性; 临界值; 水稻土

中图分类号: X53 文献标识码: A

镉(Cd)具有较强的化学活性和易于被植物吸收等特点, 容易通过土壤-农产品途径进入食物链, 给人体健康带来显著风险^[1-3]。水稻(*Oryza sativa* L.)是我国最主要的粮食作物, 全国大约 60% 的人口以水稻为主食^[4], Cd 是影响我国稻米生产安全的主要污染物。国家环保部和国土部 2014 年联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 我国重金属 Cd 的点位超标率达 7%, 稻米安全生产问题日趋严重^[5]。

研究者从不同角度对生长在 Cd 污染土壤中的水稻食品安全进行了研究, 例如低 Cd 积累水稻品种筛选^[6-7]、Cd 在水稻各器官中的分配与水稻耐 Cd 间的关系研究^[8-9]、Cd 污染稻田土壤农艺修复措施研究^[10-13]等, 这些研究为 Cd 污染土壤稻米安全生产提供了很好的技术基础。研究者通过土壤、水稻籽粒 Cd 间的剂量效应关系, 并结合国家食品安全标准逆推土壤 Cd 临界值, 是建立满足稻米食品安全的土壤 Cd 安全阈值方法之一。然而, 对于 Cd 污染土壤种植水稻, 满足稻米食品安全的土壤 Cd 安全阈值的研究结果受土壤理化性质^[14-15]、栽培方式^[2]、水稻品种^[16]等多种因素的影响, 这方面的基础数据远远不能满足

水稻土 Cd 安全阈值制定的需要。我国现行《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)中 Cd 元素标准值自公布以来, 一直存在很多争议。以全国统一的土壤重金属限量值作为评价土壤重金属污染的标准有利于提高土壤重金属污染评价的可比性。但在实际应用中, 由于我国地域广阔, 不同地区土壤理化性质差异极大, 土壤 pH、有机质含量和质地等对土壤中 Cd 的生物有效性影响显著^[17], 使得该土壤环境质量标准在应用中存在许多不确定因素, 例如, 应用该标准进行农田土壤环境质量评价时经常出现“土壤重金属超标而农产品不超标”和“农产品超标但土壤重金属不超标”的情况^[18]。事实上, 与欧盟相比, 我国土壤 Cd 环境质量二级标准要严得多^[19]。确定水稻产地土壤 Cd 的安全阈值是保障水稻籽粒 Cd 含量不超标的关键。尽管土壤 Cd 污染对水稻的环境风险已受到广泛关注, 但针对我国不同性质稻田土的 Cd 临界值研究还相对薄弱。

本文采取向采自我国水稻主产区江苏、四川、福建、广西、湖北、安徽、浙江、湖南的 8 种水稻土外源添加不同浓度 Cd 的方式, 形成具有不同 Cd 浓度

基金项目: 环保部行业科研专项(201409041)和公益性行业(农业)科研专项(201403014)资助。

* 通讯作者(xpyang@njau.edu.cn)

作者简介: 陈宏坪(1991—), 男, 福建泉州人, 硕士研究生, 主要从事环境污染控制研究。E-mail: 2014103063@njau.edu.cn

梯度的盆栽土,就水稻土中 Cd 浓度对水稻生长影响以及土壤中 Cd 浓度与水稻籽粒 Cd 含量相关性进行分析,并深入研究稻米安全生产要求的水稻土 Cd 临界值,以及影响 Cd 临界值的土壤理化性质,为稻米安全生产和 Cd 污染土壤安全农用及农产品产地适宜性评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

在我国水稻主要产区,江苏盱眙、四川都江堰、福建泉州、广西河池、湖北宜昌、安徽合肥、浙江宁波、湖南湘乡采集 8 种典型水稻田表层(0~20 cm)土壤。土壤采集后风干过 4 mm 筛,储存备用。另取少许土样过 2 mm 和 0.15 mm 筛,分别用于土壤常规分析和 Cd 含量测定。土壤理化性质指标均参照《土

壤农业化学分析方法》^[20]进行分析测定,其中土壤 pH 按水土比 2.5:1 电位法测定,土样的机械组成用激光粒度仪测定,土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定。

1.2 土壤、水稻籽粒中 Cd 含量测定

土壤样品采用 HNO₃-HCl(1:4, v/v),石墨消解仪(上海海能, SH220)消解,采用电感耦合等离子质谱仪 ICP-MS (PERKIN-ELMER, NexION 300X)测定 Cd 含量。水稻籽粒采用 HNO₃,微波消解仪(CEM, MARS 6)消解,采用同上 ICP-MS 测定 Cd 含量。土壤标样(GBW07428)、大米国家标准参比物质(GBW10010(GSB-1))被用来进行分析过程中的质量控制。

水稻土 Cd 含量、pH、有机质含量及黏粒含量等基本理化性质见表 1。

表 1 供试水稻土基本理化性质
Table 1 Basic properties of tested paddy soils

水稻土	pH	有机质(g/kg)	阳离子交换量(cmol/kg)	黏粒(g/kg)	粉砂粒(g/kg)	砂粒(g/kg)	Cd 浓度(mg/kg)
江苏盱眙	4.94	22.00	25.60	127	801	72	0.20
安徽合肥	5.49	5.57	19.10	214	727	59	0.27
广西河池	5.50	58.20	9.87	325	432	243	2.27
湖北宜昌	5.76	26.50	6.98	119	645	236	0.39
福建泉州	6.16	14.30	9.23	126	471	403	0.30
四川都江堰	6.77	31.70	26.10	136	618	246	0.42
湖南湘乡	7.47	38.60	14.80	295	489	216	0.93
浙江宁波	7.75	24.60	18.40	222	596	182	0.23

1.3 水稻品种

水稻品种选用中嘉早 17,属籼型常规水稻,在长江中下游常作双季早稻种植,全生育期平均为 109 d,株型大小适中,结实率较高。

1.4 水稻土处理与盆栽试验

8 种水稻土风干后过 4 mm 筛,采用单一污染试验,在土壤中添加不同浓度的外源 Cd (CdCl₂·2.5H₂O)。Cd 添加量分别是 0、0.25、0.50、1.00、2.00、4.00 mg/kg,以溶液形式加入所需要的 Cd,每个处理 3 次重复,总计 144 个处理。种植前每盆施加 N、P、K 肥,施用量为:N(尿素)0.15 g/kg 土,P(磷酸二氢钙)0.05 g/kg 土,K(硫酸钾)0.10 g/kg 土,确保水稻生长期所需要的养分。土壤充分混匀后装入塑料桶内,用去离子水保持田间最大持水量的 60%,稳定 2 周后待用。

将水稻种子用 1% H₂O₂ 处理 24 h,再用蒸馏水洗净,保持湿润水分,置于 30 °C 发芽箱内催芽,等种

子胚芽露白后,播种到装有珍珠岩和 1/2 Hoagland (pH 5.0)营养液的花盆中进行前期培养。待水稻幼苗出现三叶一心时,选择长势一致的苗移栽至装有 5 kg 干土的塑料桶中,每桶 1 穴,每穴 3 株。将幼苗放置在南京农业大学的自然光温玻璃温室内进行统一管理,排水期之前始终保证土壤处在淹水状态,表层水深度约为 2 cm,穗黄达二分之一后将水排干,直到成熟期收获水稻。将谷粒样品置于温室风干,记录谷粒干重后,用砻谷机(浙江台州, JLGJ 4.5)分离谷壳和糙米。

1.5 数据统计和分析方法

所有数据均采用 3 次重复的平均值±标准偏差来表示。数据统计和差异显著性分析使用 SPSS statistics 20 和 Excel 2007,采用 SigmaPlot 12.3 绘图。

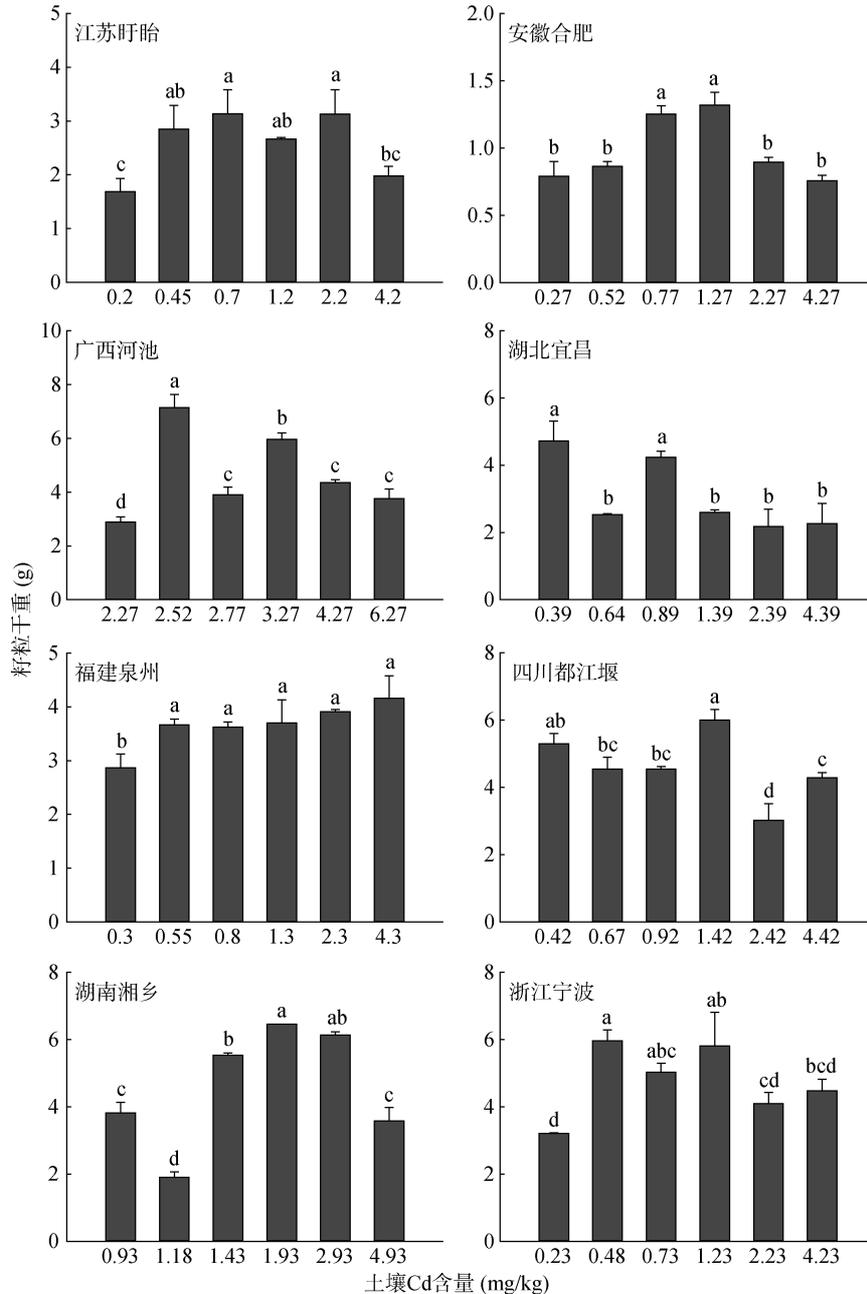
2 结果与分析

2.1 水稻土 Cd 浓度对水稻籽粒干重的影响

水稻土基本理化性质如 pH、阳离子交换量、有

机质含量、土壤质地和 Cd 含量等见表 1。8 种水稻土中广西河池、湖南湘乡、四川都江堰、湖北宜昌 4 种水稻土 Cd 含量超过国家土壤环境质量二级标准 (GB15618-1995), 属于 Cd 污染土壤, 例如广西河池水稻土 Cd 浓度为 2.27 mg/kg, 超出我国土壤环境质量二级标准(0.3 mg/kg)7.53 倍。江苏盱眙、安徽合肥、福建泉州、浙江宁波水稻土符合国家土壤环境质量二级标准, 没有 Cd 污染。本试验外源添加 Cd 浓度为 0~4.00 mg/kg, 当外源添加 0 mg/kg Cd 时, 土壤 Cd 浓

度即为各土壤 Cd 本底含量, 即对照处理。所有 Cd 处理下, 水稻生长正常, 没有出现叶片发黄、生长受阻等 Cd 毒害症状。8 种 Cd 含量不同的水稻土对水稻籽粒干重的影响见图 1。除湖北宜昌、四川都江堰、湖南湘乡水稻土存在籽粒干重低于对照处理外, 其余盆栽试验中的水稻在土壤 Cd 含量为 0.20~6.27 mg/kg 时, 水稻籽粒干重随水稻土 Cd 浓度增加而增加, 水稻土 Cd 浓度增加至较高浓度后, 籽粒干重才呈现增长减慢或者稳定趋势。例如江苏盱眙水稻土,



(图中小写字母不同表示处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平)

图 1 不同 Cd 含量水稻土对水稻籽粒干重的影响

Fig. 1 Effects of Cd concentrations of paddy soils on dry mass of brown rice grains

Cd 本底浓度为 0.20 mg/kg, 外源添加 0.25、0.50、1.00、2.00 mg/kg Cd 时, 水稻籽粒干重显著增加, 当外源 Cd 添加量进一步增加至 4.00 mg/kg 时, 籽粒干重与空白处理相比, 仍然有所增加, 但没有显著差异。

2.2 水稻土 Cd 浓度与水稻籽粒 Cd 含量相关性

江苏盱眙、安徽合肥、福建泉州、浙江宁波水稻土, 自身 Cd 含量符合国家土壤环境质量二级标准, 其上生长的水稻籽粒 Cd 含量分别为 0.016、0.019、0.016 和 0.001 mg/kg, 均低于食品安全国家标准污染物限值(GB 2762-2012)。广西河池土壤自身 Cd 含量为 2.27 mg/kg(pH 为 5.50), 属于 Cd 污染土壤, 其上生长的水稻籽粒 Cd 含量达到 0.271 mg/kg, 超出了食品安全国家标准 Cd 限量值(0.2 mg/kg)。而其余自身属于 Cd 污染土壤, 四川都江堰、湖北宜昌、湖南湘乡水稻土上生长的水稻籽粒 Cd 含量分别为 0.128、0.055 和 0.079 mg/kg, 均符合国家食品安全标准。

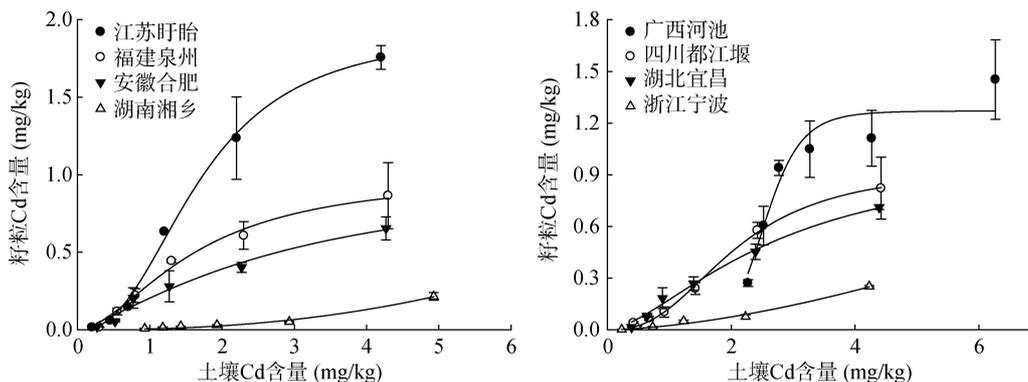


图 2 水稻土中 Cd 浓度与稻米中 Cd 含量的相关性

Fig. 2 Relationship between Cd concentrations in paddy soils and in brown rice grains

2.3 水稻土 Cd 临界值及影响因素

我国食品安全国家标准——食品中污染物限量值(GB2762-2012)中规定稻米中 Cd 的安全限值为 0.2 mg/kg。当籽粒 Cd 含量为 0.2 mg/kg 时, Logistic 模型方程中对应的土壤 Cd 浓度即为引起水稻籽粒 Cd 污染的土壤 Cd 临界值(表 2)。

8 种土壤的 Cd 临界值从大到小依次是: 湘乡水稻土(4.79 mg/kg)>宁波水稻土(3.68 mg/kg)>河池水稻土(2.12 mg/kg)>都江堰水稻土(1.25 mg/kg)>宜昌水稻土(1.11 mg/kg)>合肥水稻土(0.98 mg/kg)>泉州水稻土(0.74 mg/kg)>盱眙水稻土(0.70 mg/kg), Cd 临界值范围为 0.70~4.79 mg/kg, 由此可见不同土壤中的 Cd 对水稻的生物有效性存在明显差异。

由 Pearson 相关性分析(表 3)可知, 土壤 Cd 临界值与土壤 pH、土壤黏粒含量显著相关, 其 R^2 分别为 0.787($P<0.01$)、0.699($P<0.05$)。8 处水稻产地土壤 Cd

选用 Sigmaplot 12.3 中的 Logistic 模型方程拟合 8 种土壤 Cd 浓度与对应的水稻籽粒 Cd 含量间的关系, 对土壤 Cd 浓度与籽粒 Cd 含量进行回归分析, 结果如图 2 所示。8 种水稻土 Cd 浓度增加, 水稻籽粒 Cd 含量也相应增加。土壤 Cd 浓度与水稻籽粒 Cd 含量存在显著的正相关性。随着外源 Cd 添加, 江苏盱眙水稻土种植的水稻籽粒 Cd 含量增加非常明显, 当外源 Cd 添加量为 1.00 mg/kg 时, 籽粒 Cd 含量出现超标, 为 0.633 mg/kg, 外源 Cd 增加至 4.00 mg/kg 时, 籽粒 Cd 含量高达 1.757 mg/kg。四川都江堰、福建泉州、湖北宜昌、安徽合肥水稻土当外源 Cd 添加量为 0.50 或 1.00 mg/kg 时, 籽粒 Cd 含量开始出现超标。浙江宁波、湖南湘乡土壤对应水稻籽粒 Cd 含量增加趋势最为缓慢, 当外源 Cd 增加至 4.00 mg/kg 时, 籽粒 Cd 含量才出现超标, 分别为 0.251 mg/kg 和 0.215 mg/kg。

临界值与土壤黏粒含量、pH 间的相关性分析见图 3。随着土壤黏粒含量和 pH 升高, 土壤 Cd 临界值呈现上升趋势, 与土壤黏粒含量($R^2 = 0.49$, $P<0.01$)、pH($R^2 = 0.74$, $P<0.05$)间分别存在显著正相关性。

将土壤理化性质如有机质、土壤黏粒含量、pH 与土壤 Cd 临界值进行多元回归分析, 发现土壤黏粒含量、pH 2 个因素与水稻土 Cd 临界值存在显著线性相关($R^2 = 0.83$, $P<0.01$):

$$(\text{水稻土 Cd 临界值}) = 0.979 \times (\text{pH}) + 0.098 \times (\text{黏粒含量}) - 6.100$$

3 讨论

本次盆栽试验土壤 Cd 浓度设定范围为 0.20~6.27 mg/kg, 随土壤 Cd 浓度增加, 水稻生长均没有出现 Cd 毒害症状。盆栽试验中, 湖北宜昌、四川都江堰、湖南湘乡水稻土在添加外源 Cd 后, 在个别 Cd

表 2 基于稻米 Cd 限量值的供试水稻土 Cd 临界值
Table 2 Threshold values of Cd of paddy soils based on upper limit value of Cd contents in brown rice grains

土壤种类	Logistic 模型方程	R ²	Cd 临界值(mg/kg)
江苏盱眙	$y = \frac{1.93}{1 + \left(\frac{x}{1.69}\right)^{-2.45}}$	0.99	0.70
安徽合肥	$y = \frac{1.05}{1 + \left(\frac{x}{2.97}\right)^{-1.30}}$	0.96	0.98
广西河池	$y = \frac{1.27}{1 + \left(\frac{x}{2.56}\right)^{-8.92}}$	0.86	2.12
湖北宜昌	$y = \frac{1.04}{1 + \left(\frac{x}{2.73}\right)^{-1.59}}$	0.99	1.11
福建泉州	$y = \frac{1.00}{1 + \left(\frac{x}{1.63}\right)^{-1.77}}$	0.98	0.74
四川都江堰	$y = \frac{0.94}{1 + \left(\frac{x}{2.07}\right)^{-2.58}}$	0.99	1.25
湖南湘乡	$y = \frac{628}{1 + \left(\frac{x}{145}\right)^{-2.36}}$	0.98	4.79
浙江宁波	$y = \frac{1389}{1 + \left(\frac{x}{894}\right)^{-1.61}}$	0.98	3.68

注：y 代表籽粒 Cd 含量，x 代表土壤中 Cd 浓度。

表 3 土壤 Cd 临界值与土壤属性之间的相关性
Table 3 Pearson's correlation matrix of threshold values of Cd and some properties of paddy soils

	土壤 Cd 临界值	pH	有机质	阳离子交换量
pH	0.787**			
有机质	0.434	0.124		
阳离子交换量	-0.084	0.041	-0.231	
黏粒含量	0.699*	0.265	0.628*	-0.213

注：* 表示显著性达到 $P < 0.05$ 显著水平，** 表示显著性达到 $P < 0.01$ 显著水平。

浓度下，存在籽粒干重低于对照的现象，其余 5 种水稻土上生长的籽粒干重在低、中 Cd 浓度下表现出显著增加趋势，龙思斯等^[21]、刘宏鸽等^[15]的试验也观察到类似现象。孙聪等^[16]的研究也表明水稻在土壤 Cd 浓度为 1.2 和 4.8 mg/kg 时，与对照相比，生物量增加 4% ~ 56%，认为这是 Cd 在低剂量时表现出对水稻生长的刺激作用。Chaca 等^[22]认为，水稻在长期受到 Cd 胁迫时会产生抗性，从而使植株适应这种逆

境并进行生长补偿。这些结果表明水稻是一种对 Cd 耐性较强的作物，这在一定程度上增加了水稻土 Cd 污染的隐蔽性。

本试验表明，水稻籽粒中 Cd 含量随着土壤 Cd 浓度增加而增加，这与张红振等^[2]研究者结论一致，但籽粒 Cd 含量与籽粒干重间没有明显相关性(数据没有列出)。蔡秋玲等^[23]种植 84 个水稻品种统计结果表明，水稻产量与糙米 Cd 富集能力不存在相关性，这与本试验结论相似。对照处理中，四川都江堰、湖北宜昌、湖南湘乡水稻土自身是 Cd 污染土壤，生产的水稻籽粒 Cd 含量都符合国家食品安全标准，属于“土壤 Cd 超标而作物不超标”的情况。都江堰、宜昌水稻土本底 Cd 浓度相近，但都江堰水稻土生产的水稻籽粒 Cd 含量比宜昌的高 2.3 倍，湖南湘乡水稻土 Cd 浓度比四川都江堰水稻土高出 2.2 倍，但湘乡水稻籽粒 Cd 含量反而低于都江堰。究其原因，可能土壤基本理化性质如 pH、土壤有机质含量、阳离子交换量、土壤质地等因素对水稻籽粒 Cd 含量有着影

响。有研究表明,水稻中 Cd 的积累量与土壤中总 Cd 关系不确定,而和土壤中有效态 Cd 含量关系更密切

[24-25]。但我们发现水稻籽粒中 Cd 含量与 8 种土壤总 Cd 浓度均存在显著相关性。

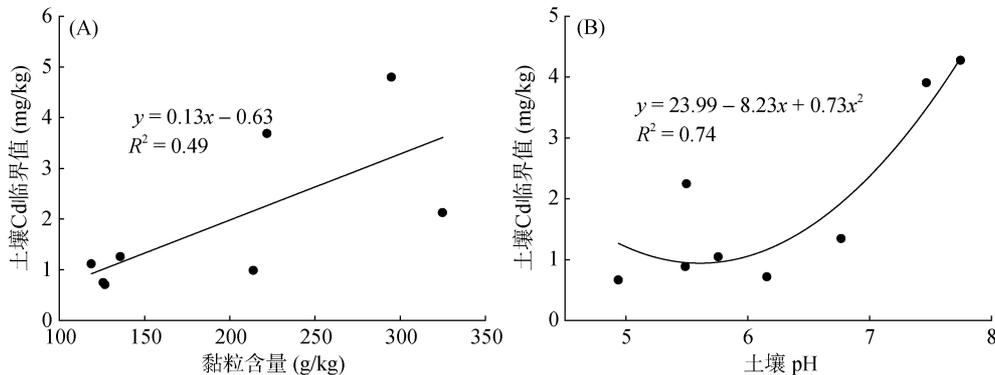


图 3 土壤黏粒含量、pH 与土壤 Cd 临界值的相关性

Fig. 3 Correlation between clay content, pH and Cd threshold value of paddy soils

利用 Logistic 回归模型,对土壤 Cd 浓度与籽粒 Cd 含量关系进行统计分析,得到二者间的拟合方程。以国家粮食 Cd 安全标准值 0.2 mg/kg 为评价标准,根据拟合方程计算得本试验中引起水稻 Cd 含量超标的 8 种土壤 Cd 临界值范围为 0.70 ~ 4.79 mg/kg,显著高于相应的土壤环境质量标准限值(GB15618-1995)。范中亮等^[14]通过人工添加外源 Cd 试验,推算当土壤 pH 为 7.50 时,土壤 Cd 临界值为 1.63 mg/kg,当土壤 pH 为 5.94 时,土壤 Cd 临界值为 0.74 mg/kg;张红振等^[2]通过搜集筛选文献数据建立水稻 Cd 含量与土壤 Cd 临界值及 pH 之间的多元线性回归方程,推算得出土壤 pH > 7 时,土壤 Cd 临界值约为 1.5 mg/kg,远高于相应的土壤环境质量标准。本文试验确定的水稻土 Cd 临界值不仅高于我国土壤环境质量标准,而且也高于这些研究报道。研究表明,除生物因素(物种、生育期、生物适应性差异及不同评价终点等)外,非生物因素(老化作用、土壤性质、环境条件等)也是影响 Cd 生物有效性的显著因子^[26-28]。刘彬等^[29]研究了外源 Cd 在 5 种水稻土中的老化动力学特征与影响因子,结果表明不同 Cd 添加浓度的土壤中有有效态 Cd 含量均随着老化时间的增加而逐渐下降,外源添加的低浓度 Cd 在土壤达到平衡的时间较高浓度 Cd 所需时间短。李传飞等^[30]的土壤培养试验结果表明,外源添加 Cd 后,土壤中 Cd 的有效态在培养 15 d 内迅速下降,随后缓慢降低;当外源 Cd 添加量 ≤ 2 mg/kg 时,30 d 后基本达到平衡;外源 Cd 添加量 ≥ 5 mg/kg 时,60 d 后才趋于稳定。本试验中外源添加 Cd 的土壤,老化时间为 2 周,因此外源添加 Cd 的生物有效性会高于含有相同 Cd 全量的实际污染土壤,我们推导出的 8 种土壤 Cd 临界值实

际上代表着最不利情形,包含了一定的安全系数。本文的盆栽试验对水稻生长实行模拟田间管理,在稻穗 1/2 变黄之前保持水稻处于淹水状态,因而可能比水稻田间生长保持较长的淹水期,而王荣萍等^[31]的研究表明,水稻淹水处理,可以降低土壤中 Cd 的有效性,这可能使我们试验得到的水稻土壤 Cd 临界值呈现偏高趋势。

土壤理化性质是影响土壤中 Cd 植物有效性的主要因素,土壤 pH 是所有理化性质中影响土壤 Cd 有效性最重要的因子之一,根本原因在于 pH 对土壤中 Cd 溶解性有很大的影响^[25]。叶新新和孙波^[32]认为随着土壤 pH 升高,土壤胶体带负电荷数会相应增加,土壤对重金属 Cd 的吸附能力加强,从而降低了 Cd 的生物有效性。王卫等^[33]认为,土壤 pH、有机质含量是影响烟草 Cd 积累的重要因素。我们将水稻籽粒 Cd 含量与土壤 pH、有机质含量、阳离子交换量、土壤黏粒含量等土壤性质分别进行单因素回归分析,发现水稻籽粒 Cd 含量与土壤 pH 显著相关,通过多元回归分析,表明土壤 Cd 临界值与土壤 pH 和黏粒含量 2 个因素存在显著线性相关。林大松等^[34]认为土壤有机质含量是影响水稻吸收 Cd 的重要因素之一,但本文结果表明,土壤有机质含量对水稻籽粒吸收土壤 Cd 的影响并不显著。

4 结论

8 种水稻土 Cd 含量为 0.20 ~ 6.27 mg/kg 时,水稻生长均没有出现 Cd 毒害症状。籽粒 Cd 含量与土壤 Cd 浓度呈显著正相关,随土壤 Cd 浓度的增加而增加。由 Logistic 方程反推得到 8 种水稻土 Cd 临界值范围为 0.70 ~ 4.79 mg/kg,均高于土壤环境质量标

准相应限值(0.3 mg/kg、 $\text{pH} \leq 7.5$, 0.6 mg/kg、 $\text{pH} > 7.5$)。多元线性回归分析结果表明,土壤 pH 和土壤黏粒含量是影响水稻土 Cd 临界值的主要因素,基于二者的回归方程可以很好地预测 8 种水稻土的 Cd 临界值($R^2 = 0.83$, $P < 0.01$) , 回归方程为 : (水稻土 Cd 临界值) = $0.979 \times (\text{pH}) + 0.098 \times (\text{黏粒含量}) - 6.100$ 。

参考文献：

- [1] Li J T, Liao B, Dai Z Y, et al. Phytoextraction of Cd-contaminated soil by carambola (*Averrhoa carambola*) in field trials[J]. *Chemosphere*, 2009, 76(9): 1233-1239
- [2] 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
- [3] 李野, 赵玉杰, 周启星, 等. 基于土壤-稻米镉传输模型的太湖流域水稻禁产区筛选研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(1): 75-84
- [4] 史静, 李正文, 龚伟群, 等. 2 种常规水稻 Cd、Zn 吸收与器官分配的生育期变化: 品种、土壤和 Cd 处理的影响[J]. *生态毒理学报*, 2007, 2(1): 32-40
- [5] 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(5): 10-11
- [6] 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
- [7] 张锡洲, 张洪江, 李廷轩, 等. 水稻镉耐性差异及镉低积累种质资源的筛选[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(11): 1434-1440
- [8] 肖美秀, 林文雄, 陈祥旭, 等. 镉在水稻体内的分配规律与水稻镉耐性的关系[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(2): 379-381
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 陈喆, 张森, 叶长城, 等. 富硅肥料和水分管理对稻米镉污染阻控效果研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(12): 4003-4011
- [12] 辜娇峰, 周航, 杨文波, 等. 复合改良剂对镉砷化学形态及在水稻中累积转运的调控[J]. *土壤学报*, 2016, 53(6): 1576-1585
- [13] 周歆, 周航, 曾敏, 等. 石灰石和海泡石组配对水稻糙米重金属积累的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(3): 555-563
- [14] 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
- [15] 刘宏鸽, 宋静, 潘云雨, 等. 基于稻米食品卫生标准的天津潮土 Cd 临界值研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(2): 220-224
- [16] 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
- [17] Romkens P F A M, Brus D J, Guo H Y, et al. Impact of model uncertainty on soil quality standards for cadmium in rice paddy fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(17): 3098-3105
- [18] 王国庆, 骆永明, 宋静, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究 I. 国际动态及中国的修订考虑[J]. *土壤学报*, 2005, 42(4): 666-673
- [19] Zhao F J, Ma Y, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2): 750-759
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [21] 龙思斯, 宋正国, 雷鸣, 等. 不同外源镉对水稻生长和富集镉的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(3): 419-424
- [22] Chaca M V P, Vigliocco A, Reinoso H, et al. Effects of cadmium stress on growth, anatomy and hormone contents in *Glycine max* L. Merr[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2014, 36(10): 2815-2826
- [23] 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
- [24] Nocito F F, Lancilli C, Dendena B, et al. Cadmium retention in rice roots is influenced by cadmium availability, chelation and translocation[J]. *Plant Cell and Environment*, 2011, 34(6): 994-1008
- [25] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(1): 84-91
- [26] Chapman E E, Dave G, Murimboh J D. A review of metal (Pb and Zn) sensitive and pH tolerant bioassay organisms for risk screening of metal-contaminated acidic soils[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 179(8): 326-342
- [27] Ma Y, Lombi E, Mclaughlin M J, et al. Aging of nickel added to soils as predicted by soil pH and time[J]. *Chemosphere*, 2013, 92(8): 962-968
- [28] Sayen S, Guillon E. Aging effect on Zn retention on a calcareous soil: Column experiments and synchrotron X-ray micro-spectroscopic investigation[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 487(1): 545-556
- [29] 刘彬, 孙聪, 陈世宝, 等. 水稻土中外源 Cd 老化的动力学特征与老化因子[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(7): 2137-2145

- [30] 李传飞, 李延轩, 张锡洲, 等. 外源镉在几种典型农耕土壤中的稳定化特征[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 85-92
- [31] 王荣萍, 张雪霞, 郑煜基, 等. 水分管理对重金属在水稻根区及在水稻中积累的影响[J]. 生态环境学报, 2013(12): 1956-1961
- [32] 叶新新, 孙波. 品种和土壤对水稻镉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
- [33] 王卫, 梁振飞, 李菊梅, 等. 土壤性质对烟草中镉富集的影响及预测模型研究[J]. 土壤, 2014, 46(1): 178-183
- [34] 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

Cadmium (Cd) Threshold Values of Paddy Soils to Brown Rice as Determined by Cd Concentrations in Soils and Rice Grains as well as Soil Properties

CHEN Hongping¹, DAI Bichuan¹, YANG Xinping^{1*}, WANG Guoqing², LIN Yusuo², ZHAO Fangjie¹
(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2 Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: The accumulation of Cd in brown rice as affected and predicted by Cd concentrations of soils and soil properties was investigated by pot experiments with eight different paddy soils with a wide range of Cd concentration (0.20–6.27 mg/kg). Compared with the control, no toxic symptom was observed when rice exposure to high Cd concentrations. Based on national maximum levels of contaminants in foods (GB 2762-2012), Cd threshold values of the studied paddy soils were derived to be 0.70-4.79 mg/kg, all of which exceeded the guideline values in national soil environmental quality standard (GB15618-1995) (0.3 mg/kg when $\text{pH} \leq 7.5$ and 0.6 mg/kg when $\text{pH} > 7.5$). The multiple regression analysis showed that there were significant positive correlation ($R^2=0.83$, $P<0.01$) between soil pH, clay content and the threshold values of Cd to brown rice.

Key words: Cadmium, Rice, Correlation, Threshold values, Paddy soil