

不同水稻品种对镉的积累及其动态分布

唐 非¹, 雷 鸣², 唐 贞², 杨仁斌^{2*}, 宋正国^{3*}, 唐世荣³, 彭 莎², 廖海玉²

(1.湖南农业大学 生命科技学院, 长沙 410128; 2.湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 3.农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘 要:选取 10 个水稻品种进行大田试验,研究了不同水稻品种对 Cd 的积累特征及其动态分布规律。结果表明:成熟期水稻不同部位 Cd 积累规律为根系>茎叶>稻壳>糙米。常规稻根系 Cd 含量在幼苗期最低,分蘖期最高,而杂交稻生长周期小于 120 d 的水稻根系 Cd 含量最大值出现在分蘖期,生长周期大于 120 d 的水稻根系 Cd 含量最大值出现在成熟期。水稻茎和叶中 Cd 的含量呈先升高后降低再升高的趋势,在成熟期达到最高值。不同品种水稻糙米内 Cd 的含量范围为 0.21~1.53 mg·kg⁻¹, Cd 含量相对较低的常规稻和杂交稻分别为湘早粳 42 和 T 优 705,均接近或超过国家粮食卫生标准限值(0.2 mg·kg⁻¹)。

关键词:水稻;Cd;积累;动态分布;稻田;糙米

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)06-1092-07 doi:10.11654/jaes.2013.06.002

Accumulation Characteristic and Dynamic Distribution of Cd in Different Genotypes of Rice (*Oryza sativa* L.)

TANG Fei¹, LEI Ming², TANG Zhen², YANG Ren-bin^{2*}, SONG Zheng-guo^{3*}, TANG Shi-rong³, PENG Sha², LIAO Hai-yu²

(1.College of Biological Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2.College of Resource and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3.Institute of Environmental Protection of Ministry of Agriculture of China, Tianjin 300191, China)

Abstract: Field experiment was conducted to investigate the accumulation characteristics and dynamic distribution of Cd in ten genotypes of rice. The results showed that the distribution of Cd in various rice plant parts was in the order: root>leaf and stem>husk>brown rice. The concentrations of Cd in roots of conventional rice were the lowest at seeding stage, and the highest at tillering stage, while of Cd in root of hybrid rice with growth cycle less than 120 days and over 120 days were the highest at tillering stage and mature stage, respectively. The tendency of Cd concentration in leaf and shoot of rice increased firstly, decreased, and then increased to a peak at mature stage. In the present study, the contents of Cd in brown rice samples (Xiang Zao-xian 42 and T-you 705) were relatively low among conventional rice and hybrid rice, while the ranges of concentrations of Cd in brown rice (0.21~1.53 mg·kg⁻¹) were closed to, even beyond the limit of the food health standard (0.2 mg·kg⁻¹).

Keywords: genotype of rice; Cd; accumulation; dynamic distribution; paddy field; brown rice

我国的重金属污染耕地面积将近 2.0×10^6 hm², 约占总耕地面积的 1/5, 其中受 Cd 污染耕地面积为 1.33×10^4 hm², 涉及 11 个省 25 个地区^[1]。湖南是我国的有色金属之乡, 随着采矿业和冶炼活动的发展, 使得稻田土壤受到不同程度的重金属污染。据第二次土

壤普查(1978—1986)表明, 湖南省受到重金属污染的稻田面积为 6.7×10^3 hm², 1998 年污染面积已增加到 1.13×10^4 hm², 占全省稻田面积的 0.45%, 而且这种污染具有加重趋势^[2]。雷鸣等研究表明, 湖南采矿区和冶炼区的稻田土壤受到严重的重金属污染, 尤其以 Cd 污染较为突出^[3]。稻田土壤的 Cd 污染不仅影响水稻作物的生长、粮食产量和品质, 还将通过食物链途径直接或间接进入人体, 严重威胁人体健康。雷鸣等^[4]对湖南市场和污染区稻米中 As、Pb、Cd 污染及其健康风险评估结果表明, Cd 是湖南稻米中影响人体健康的主要因子。因此, 稻田土壤 Cd 污染将影响农业生产的可持续发展和粮食安全生产。

收稿日期: 2012-11-27

基金项目: 农业部项目“农产品产地重金属污染阈值应用与配套技术集成与示范”(200903015); 农业部产地环境与农产品安全重点开放实验室(2010-zyj-10)

作者简介: 唐 非(1967—), 男, 博士研究生, 研究方向为生态经济学。
E-mail: tfgx@163.com

* 通信作者: 杨仁斌 E-mail: yrb4806@yahoo.com.cn
宋正国 E-mail: forestman1218@163.com

近年来,国内外在 Cd 污染对水稻生长的影响、水稻富集 Cd 的行为及机理、水稻对 Cd 的吸收与分配和不同水稻品种对 Cd 的积累差异等方面进行了较多的研究^[5-16],但大多研究结果都是在条件相对稳定的盆栽实验中获得,在大田环境下探讨水稻不同生育期 Cd 在植株内迁移和动态分布的研究较少。本研究在湖南湘潭某 Cd 污染区开展野外大田试验,探讨 10 个水稻品种对 Cd 的积累和分布,以及 Cd 随水稻生育期的动态变化规律,以期为筛选镉污染农田安全水稻品种提供理论依据,为改善和提高水稻安全生产质量,保障粮食安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验点位于湖南省湘潭市某 Cd 污染区,土壤类型为第四纪发育红壤,当地常年引用湘江水(经鱼塘蓄积)灌溉,土壤的基本理化性质见表 1,具体测定方法参见土壤农业化学分析方法^[17]。土壤中 Cd 的全量

采用盐酸-硝酸-高氯酸消解法,测定值为(2.66±0.23) mg·kg⁻¹,是国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)^[18] 0.3 mg·kg⁻¹(pH 小于 6.5)的 8 倍。

选用 10 个湖南省广泛种植的水稻品种进行试验(表 2),其中:常规稻 4 种,杂交型水稻 6 种,分别购自湖南农丰种业有限公司和湖南隆平种业有限公司。

1.2 试验设计

供试品种于 2010 年 4 月直播种植,每个水稻品种重复 3 次,小区面积约 30 m²(长 6 m×宽 5 m),各处理设独立灌溉沟渠如图 1 所示,采用随机种植模式。播种前施磷肥和氮钾复合肥做基肥,复合肥中 N、P、K 含量分别为 18%、10%、21%,施用量为 425 kg·hm⁻²,幼苗期追施尿素和钾肥,施用量均为 60 kg·hm⁻²,田间管理按大田常规操作进行。分别采集幼苗期、分蘖期、抽穗期、成熟期的水稻植株样品,播种时间为 2010 年 4 月 2 日。水稻采样时间见表 3。

1.3 植物样品分析

将采集的水稻样品,先用自来水小心洗净根系泥

表 1 供试土壤的基本性质
Table 1 Some properties of the study soil

土壤类型	pH 值	CEC/cmol·kg ⁻¹	有机质/g·kg ⁻¹	有效养分/mg·kg ⁻¹			全 Cd/mg·kg ⁻¹
				速效 N	速效 P	速效 K	
红壤	5.17	18.80	15.22	46.40	24.11	42.95	2.66±0.23
CNEQS	<6.5						0.3

注:CNEQS 为国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)。

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

品种类型	品种名称	生育周期/d
常规稻	湘早粳 42 号(X42)、湘早 143(X143)、湘早粳 24 号(X24)、中嘉早 17(Z17)	107、108、109、110
杂交稻	陆两优 819(L819)、陆两优 611(L611)、两优 2469(L2469)、T 优 705(T705)、Ⅱ 优 416(Ⅱ 416)、新香优 640(X640)	107、107、121、108、135、135

注:括号内为水稻品种名称的缩写。

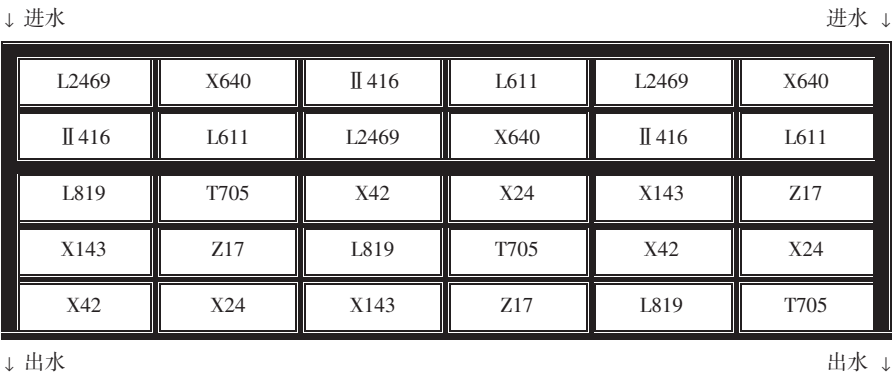


图 1 田间试验种植模式
Figure 1 Planting pattern of field experiment

表 3 水稻采样时间

Table 3 Sampling time of rice

水稻品种	幼苗期	分蘖期	抽穗期	成熟期
湘早籼 42 号	4 月 30 日	5 月 27 日	6 月 18 日	7 月 19 日
湘早 143	4 月 30 日	5 月 27 日	6 月 18 日	7 月 19 日
湘早籼 24 号	4 月 30 日	5 月 27 日	6 月 18 日	7 月 19 日
中嘉早 17	4 月 30 日	5 月 27 日	6 月 18 日	7 月 19 日
陆两优 819	4 月 30 日	5 月 27 日	6 月 18 日	7 月 19 日
陆两优 611	4 月 30 日	5 月 27 日	6 月 18 日	7 月 19 日
两优 2469	4 月 30 日	5 月 27 日	6 月 28 日	8 月 2 日
T 优 705	4 月 30 日	5 月 27 日	6 月 18 日	7 月 19 日
Ⅱ 优 416	4 月 30 日	5 月 27 日	6 月 28 日	8 月 16 日
新香优 640	4 月 30 日	5 月 27 日	6 月 28 日	8 月 16 日

土,然后用超纯水清洗整个植株,用吸水纸吸干表面水分,将植株根系、茎叶分离,105 ℃杀青 20 min,70 ℃烘至恒重,用不锈钢粉碎机粉碎,过 100 目筛。稻谷样品风干,然后按农业部颁布标准(NY 147—1988)^[9]米质测定方法出糙,分离开的糙米和稻壳在 70 ℃烘至恒重,磨碎过 100 目筛。样品称重 0.200 g,用 5 mL 浓硝酸消解,超纯水定容,用原子吸收光谱仪-石墨炉法(AA240FS, VARIAN, USA)测定溶液中 Cd 的含量,以国家标准物质 GBW07603(GSV-2)进行质量控制。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 统计分析软件进行数据处理。

2 结果与讨论

2.1 水稻生长发育状况

水稻种植密度及株间距参照各水稻种植说明书,田间管理按大田常规操作进行,病虫害基本得到控制。10 种水稻的株高、每穗总粒数、每穗实粒数、结实

率、千粒重等经济性性状统计见表 4。

2.2 水稻不同生育期 Cd 积累动态变化

如图 2 所示,常规稻(X42、X143、X24、Z17)的根系 Cd 含量在幼苗期最低,分蘖期最高,抽穗期和成熟期则逐渐降低,这与莫争等^[1]的结果相同。而杂交稻的根系 Cd 含量在 4 个生育期中呈先升高后降低再升高的趋势,其中生长周期小于 120 d 的品种(L819、L611、T705)的根系 Cd 含量最大值出现在分蘖期,生长周期大于 120 d 的品种(L2469、Ⅱ 416、X640)的根系 Cd 含量最大值出现在成熟期。原因可能是幼苗期至分蘖期是水稻营养生长代谢旺盛的阶段,对 Cd 的吸收能力比前期明显提高,根系 Cd 含量迅速上升,抽穗期至成熟期是水稻营养生长与生殖生长的并进阶段,由于首先进入根部的 Cd 会不断向地上部分迁移,同时根部的生物量随时间不断增加,根系积累的 Cd 含量则随时间相对降低。而杂交稻抽穗扬花后灌浆时间一般较常规稻长,这个阶段根系 Cd 含量先随着植株的生长相对降低,当水稻生物量基本稳定时,根系仍不断从土壤中吸收、积累 Cd,水稻对 Cd 的代谢机制相对弱化,因此根系中的 Cd 随时间的延续再次积累,Cd 含量逐渐增加甚至超过分蘖时期。如生长周期大于 120 d 的杂交稻品种Ⅱ 416 和 X640,成熟期根系的 Cd 含量都高于其分蘖期。

常规稻和杂交稻茎叶 Cd 含量都是呈先升高后降低再升高的趋势。幼苗期最低,分蘖期随根系吸收量的增加且不断向上运输,茎叶 Cd 含量升高,抽穗期 Cd 含量逐渐降低,原因可能是此阶段茎叶的生物量增加,对 Cd 的耐受和代谢机制加强,成熟期根系传输上来的 Cd 在茎叶里逐渐积累,茎叶 Cd 含量缓慢上升,达到最大值。随着根系 Cd 含量的积累,成熟

表 4 水稻生长发育的基本性状

Table 4 Basic characters of growth and development of rice

水稻品种	缩写代码	株高/cm	每穗总粒数	每穗实粒数	结实率/%	千粒重/g
湘早籼 42 号	X42	84.6	105.7	87.3	82.6	23.5
湘早 143	X143	82.4	105.3	86.0	81.7	22.8
湘早籼 24 号	X24	83.3	106.3	86.4	81.3	23.7
中嘉早 17	Z17	85.7	105.2	87.8	83.5	24.1
陆两优 819	L819	85.1	106.5	88.3	82.9	24.3
陆两优 611	L611	86.7	105.9	88.3	83.4	23.5
两优 2469	L2469	87.2	106.2	89.3	84.1	24.3
T 优 705	T705	83.8	105.1	87.4	83.2	23.8
Ⅱ 优 416	Ⅱ 416	85.3	106.2	87.4	84.9	22.9
新香优 640	X640	87.7	105.9	91.9	86.8	24.2

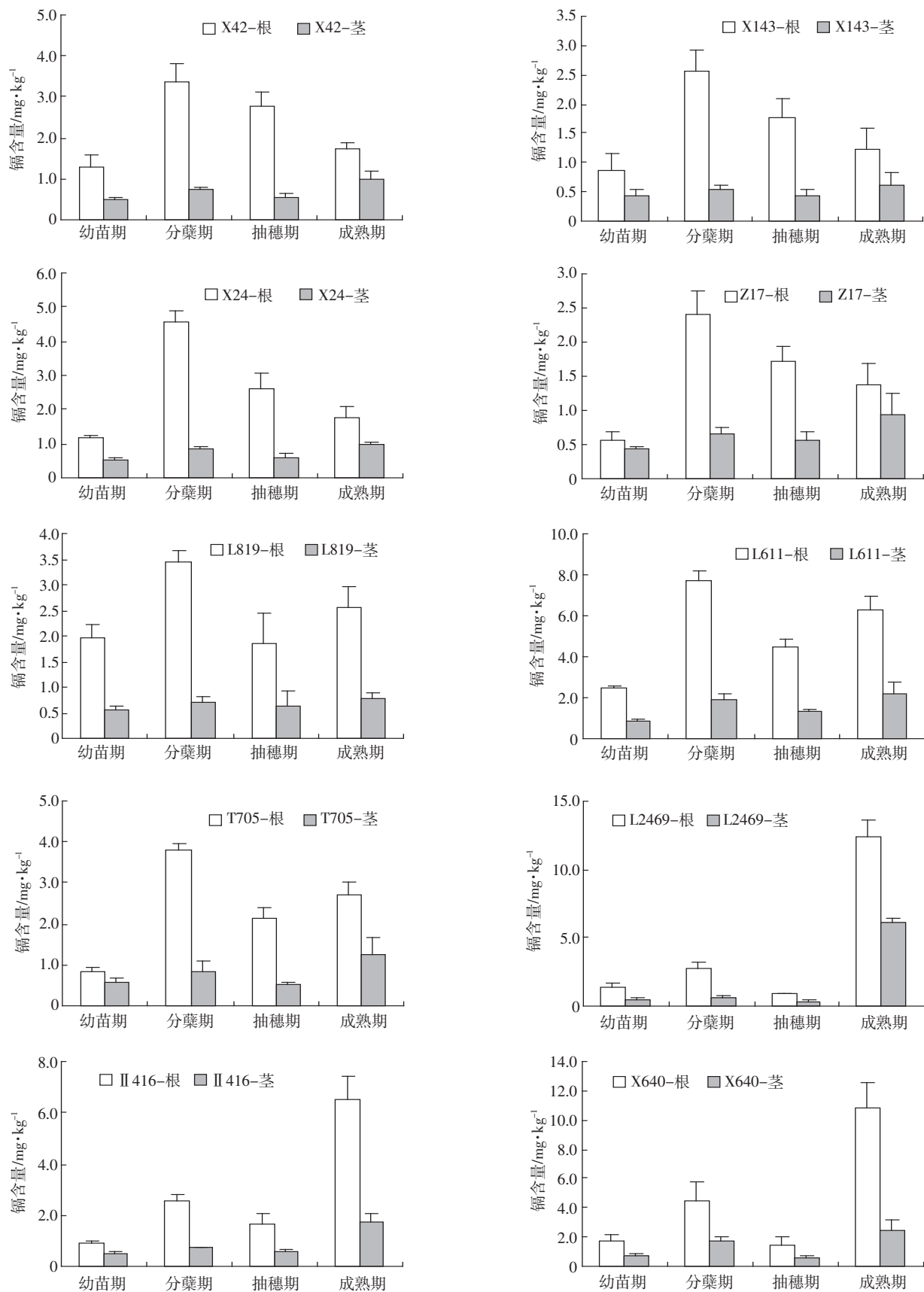


图 2 不同品种水稻不同生长时期对 Cd 的积累动态

Figure 2 The trends of Cd accumulation in rice at different growth periods

期时生长周期大于 120 d(L2469、II 416、X640)的品种茎叶中的 Cd 含量均高于生长周期小于 120 d 的 Cd 含量。

由此可见, 常规稻与杂交稻根系积累 Cd 的动态变化存在差异, 茎叶积累 Cd 的动态变化相似, 这种动态变化不仅与水稻自身的回避机制、抗性机制的差异有关, 还与水稻不同生长时期的代谢机制有关, 并且水稻生育周期的长短, 尤其是生物量相对稳定的后期的生长时间直接或间接地影响水稻对 Cd 的积累变化。王凯荣等^[20]的研究也表明, 水稻生长后期(抽穗—成熟期)吸收 Cd 的比重占全生育期总量的一半以上。

2.3 水稻不同部位积累 Cd 的差异

由表 5 可知, 成熟期时 10 个水稻品种根系的 Cd 含量均显著高于其他部位, 水稻不同部位积累 Cd 的规律为根系>茎叶>稻壳>糙米, 表明 Cd 主要集中在水稻的根部, 这与赵熊等^[10]盆栽试验的结论一致。进入水稻根部的 Cd 首先与蛋白质、多糖类和核酸等结合, 然后向植株地上部分转移。水稻吸收的 Cd 分配到糙米中的比例较低, 糙米中 Cd 的含量仅为水稻植株 Cd 总量的 3.3%~9.7%。4 种常规稻品种间的糙米、稻壳、茎叶、根系 Cd 含量差异不显著($P>0.05$), 而 6 种杂交稻品种间的糙米、稻壳、茎叶、根系 Cd 含量差异极显著($P<0.01=0.000$)。

常规稻糙米 Cd 含量的变幅不大, 介于 0.21~0.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 而杂交稻糙米 Cd 含量变幅很大, 介于 0.26~1.53 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 其最大积累含量为最小值的 5.8 倍, 且杂交稻糙米中的 Cd 含量大都高于常规稻, 说明与常规品种相比, 杂交稻对环境 Cd 具有更强的

吸收积累能力。关于不同类型水稻糙米积累 Cd 的差异研究, 有研究认为水稻对 Cd 的积累有明显的基因型特征, 杂交稻积累 Cd 浓度高于常规稻^[21-22], 吴启堂等^[23]报道, 供试的 20 个水稻品种种植于同一污染土壤上, 杂交稻产量较高, 但同时糙米 Cd 含量也较高, 而一些特种稻产量较低, 糙米 Cd 含量也较低, 两者平均相差 1 倍以上。李正文等^[24]的研究进一步表明品种间存在显著差异。但也有研究认为水稻类型间 Cd 含量没有显著差异, 应针对品种来筛选^[25]。稻米中 Cd 累积和基因型与环境有极大关系, 筛选低累积的水稻品种具有重要的生物学和生态学意义。随着分子标记的发展和广泛应用, 遗传图谱的使用价值也随之提高, 利用饱和的遗传图谱, 开展耐 Cd 水稻分子标记辅助选择育种成为可能, 并能显著提高育种效率^[26]。同时, 分子生物学的迅速发展, 利用 T-DNA 和转座子遗传标签试图获得与 Cd 代谢有关的基因突变体, 最终可达到有益功能基因的解析与转移, 即从转基因技术上解决 Cd 的污染问题。从分子水平上明确水稻 Cd 的吸收与积累以及育成理想的水稻品种无疑具有重大的推动作用。

尽管常规稻中 X143 与杂交稻中 L819 和 T705 的各部位对 Cd 的积累量相对较少, 而 L2469 积累量最多, 但 10 种水稻糙米中 Cd 含量都接近或超过国家粮食卫生标准 ($0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 这与土壤 pH 值(pH 5.17) 有关。研究表明, 在南方酸性土壤条件下(pH 5.25±0.39), 水型镉污染对作物品质的危害要比在北方中性和碱性土壤环境下严重得多。王玉纵等^[27]报道, 当土壤含 Cd 量为 $2.211 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 糙米中 Cd 可达到 $2.640 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

表 5 成熟时期水稻不同部位对 Cd 的积累

Table 5 Cd accumulation in different organs of rice at ripening period

类型	品种	糙米/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	稻壳/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	茎叶/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	根系/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
常规稻	X42	0.21±0.10	0.38±0.08	0.98±0.21	1.72±0.15
	X143	0.23±0.08	0.29±0.03	0.63±0.19	1.23±0.34
	X24	0.27±0.11	0.32±0.02	0.96±0.09	1.78±0.30
	Z17	0.23±0.05	0.35±0.04	0.93±0.32	1.38±0.32
杂交稻	L819	0.27±0.09	0.31±0.09	0.77±0.11	2.55±0.39
	L611	0.41±0.16	0.60±0.06	2.15±0.58	6.31±0.60
	L2469	1.53±0.20	1.82±0.11	6.12±0.31	12.43±1.20
	T705	0.26±0.03	0.40±0.04	1.25±0.42	2.69±0.31
	II 416	0.62±0.04	0.71±0.04	1.74±0.36	6.53±0.86
	X640	0.48±0.10	0.62±0.07	2.50±0.67	10.82±1.68
CNHSC		≤0.2			

注: 表中数据为 3 次重复的平均值±标准误差; CNHSC 为国家粮食卫生标准(GB 2715—2005)。

2.4 糙米与水稻不同部位 Cd 含量的线性回归分析

对不同水稻品种的糙米与稻壳、茎叶、根系的 Cd 含量进行线性回归分析,如图 3 所示,其线性方程分别为

$$y=0.866x-0.051(R=0.984, P=0.000<0.01)$$

$$y=0.238x+0.022(R=0.933, P=0.000<0.01)$$

$$y=0.081x+0.069(R=0.641, P=0.003<0.01)$$

表明水稻糙米 Cd 含量与稻壳、茎叶、根系的 Cd 含量间都达到极显著的正相关。曾翔等^[13]研究也表明糙米镉含量还与苗期根系镉含量、成熟期根系镉含量和植株平均镉含量呈显著正相关。因此,一方面,利用水稻生长过程中的不同水分管理措施来调节耕层土壤的氧化还原状态,促进根系表面的氧化铁胶膜的形成与增加,通过氧化铁胶膜对 Cd 的吸收来阻挡 Cd 进入根系内部,从而降低稻米中的 Cd 含量;另一方面,调节土壤 pH 值,在作物适应的土壤酸碱度范围内,提高土壤 pH 值可明显降低土壤溶液中 Cd 的活性,从而降低作物对 Cd 的吸收和积累。如在受 Cd 污染的土壤中施用石灰性物质,如氢氧化钙、碳酸钙、硅酸钙等来提高土壤 pH,即可有效地降低 Cd 的活性^[28]。

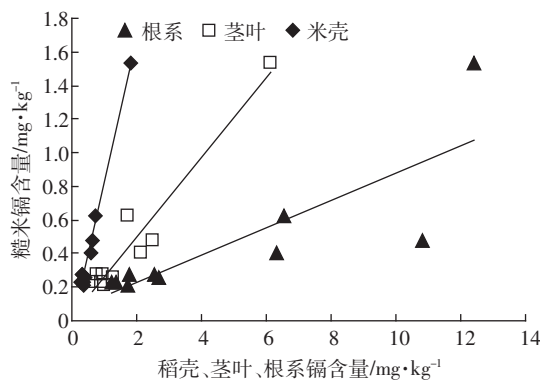


图 3 糙米与水稻不同部位 Cd 含量的线性关系

Figure 3 The correlations between Cd concentrations in brown rice and different parts of rice

3 结论

(1)常规稻根系 Cd 含量在幼苗期最低,分蘖期最高,杂交稻生长周期小于 120 d 的水稻根系 Cd 含量最大值出现在分蘖期,生长周期大于 120 d 的水稻根系 Cd 含量最大值出现在成熟期。水稻茎叶 Cd 含量呈先增后减再增的趋势,成熟期达到最高值。

(2)水稻的不同部位对 Cd 的吸收和积累存在差异,为根系>茎叶>稻壳>糙米。水稻品种之间的差异是常规稻糙米中的 Cd 含量低于杂交稻。

(3)虽然糙米中 Cd 含量相对较低的常规稻和杂交稻分别为湘早籼 42 号和 T 优 705,但是由于土壤酸化的原因,所有品种的糙米 Cd 含量已接近或超过国家粮食卫生标准,因此要采取适当的化学措施来降低土壤 Cd 的活性,以期减低糙米 Cd 的含量。

参考文献:

- [1] 王凯荣. 农业生态系统镉污染研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2004: 10.
WANG Kai-rong. Studies on cadmium pollution in farming ecosystems [D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2004: 10.
- [2] 陈艳. 湖南省土壤污染现状与修复[J]. 湖南农业科学, 2002(6): 31-33.
CHEN Yan. The present conditions and remediation of soil pollution in Hunan[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2002(6): 31-33.
- [3] 雷鸣, 曾敏, 郑袁明, 等. 湖南采矿区和冶炼区水稻土重金属污染及其潜在风险评价[J]. 环境科学学报, 2008, 28(6): 1212-1220.
LEI Ming, ZENG Min, ZHENG Yuan-ming, et al. Heavy metals pollution and potential ecological risk in paddy soils around mine areas and smelting areas in Hunan Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(6): 1212-1220.
- [4] 雷鸣, 曾敏, 王利红, 等. 湖南市场和污染区稻米中 As、Pb、Cd 污染及其健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2310-2314.
LEI Ming, ZENG Min, WANG Li-hong, et al. Arsenic, lead, and cadmium pollution in rice from Hunan markets and contaminated areas and their health risk assessment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(11): 2310-2314.
- [5] 王凯荣. 镉对不同基因型水稻生长毒害影响的比较研究[J]. 农村生态环境, 1996, 12(3): 18-23.
WANG Kai-rong. Comparative study on Cd phytotoxicity to different genes of rice[J]. *Rural Eco-Environment*, 1996, 12(3): 18-23.
- [6] CHENG Wang-da, ZHANG Guo-ping, YAO Hai-gen. The difference in growth and four microelement concentrations between two rice genotypes differing in grain cadmium accumulating capacity[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2004, 6(3): 416-424.
- [7] 杨春刚, 朱智伟, 章秀福, 等. 重金属镉对水稻生长影响和矿质元素代谢的关系[J]. 中国农学通报, 2005, 21(11): 176-178, 192.
YANG Chun-gang, ZHU Zhi-wei, ZHANG Xiu-fu, et al. Relation of Cd on growth and mineral concentration of rice plant[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(11): 176-178, 192.
- [8] GE Cai-lin, WANG Ze-gang, WAN Ding-zhen. Proteomic study for responses to cadmium stress in rice seedlings[J]. *Rice Science*, 2009, 16(1): 33-44.
- [9] HUANG He, XIONG Zhi-ting, LI Min-jin, et al. Effect of cadmium and herbicides on the growth, chlorophyll and soluble sugar content in rice seedlings[J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2006, 11(3): 742-748.
- [10] 赵熊, 李福燕, 张东明, 等. 水稻土镉污染与水稻镉含量相关性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2236-2240.
ZHAO Xiong, LI Fu-yan, ZHANG Dong-ming, et al. Relationship be-

- tween paddy soils cadmium pollution and cadmium content in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11):2236-2240.
- [11] 莫争, 王春霞, 陈琴, 等. 重金属 Cu, Pb, Zn, Cr, Cd 在水稻植株中的富集和分布[J]. 环境化学, 2002, 21(2):110-116.
- MO Zheng, WANG Chun-xia, CHEN Qin, et al. Distribution and enrichment of heavy metals of Cu, Pb, Zn, Cr and Cd in paddy plant[J]. *Environmental Chemistry*, 2002, 21(2):110-116.
- [12] 周鸿凯, 何觉民, 陈小丽, 等. 大田生产条件下不同品种水稻植株中镉的分布特点[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2):229-234.
- ZHOU Hong-kai, HE Jue-min, CHEN Xiao-li, et al. The Cd uptake and distribution features of plant organs in four rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2010, 29(2):229-234.
- [13] 曾翔, 张玉烛, 王凯荣, 等. 水稻植株镉积累分配的差异[J]. 作物研究, 2006, 20(4):342-344.
- 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, 20(4):342-344.
- [14] 冯文强, 涂仕华, 秦鱼生, 等. 水稻不同基因型对铅镉吸收能力差异的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2):447-451.
- FENG Wen-qiang, TU Shi-hua, QIN Yu-sheng, et al. Uptake capacity of different rice genotypes for lead and cadmium from soil[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2008, 27(2):447-451.
- [15] HONG-mei, CHENG Wang-da, YAO Hai-gen. Influences of cadmium on grain mineral nutrient contents of two rice genotypes differing in grain cadmium accumulation[J]. *Rice Science*, 2009, 16(2):151-156.
- [16] HUANG Yi-zong, HU Ying, LIU Yun-xia. Combined toxicity of copper and cadmium to six rice genotypes (*Oryza sativa* L.)[J]. *Journal of Environmental Science*, 2009, 21:647-653.
- [17] 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, 2000:325-336.
- LU Ru-kun. Chemical analysis method of soil agriculture[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000:325-336.
- [18] 中华人民共和国国家标准 GB 15618—1995. 土壤环境质量标准[S].
- National standards of peoples republic of China GB 15618—1995. Environmental Quality Standard for Soils[S].
- [19] 中华人民共和国农业部. NY 147—1988. 米质测定方法[S].
- Department standards of ministry of agriculture of Peoples Republic of China. NY 147—1988. Determination method of quality for rice[S].
- [20] 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.
- [21] 王凯荣, 龚惠群. 两种基因型水稻对环境镉吸收与再分配差异性比较研究[J]. 农业环境保护, 1996, 15(4):145-149, 176.
- WANG Kai-rong, GONG Hui-qun. Study on the effect of heavy metal contamination to rice quality[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1996, 15(4):145-149, 176.
- [22] 王英, 李正文, 贺紫荆. 不同水稻品种积累镉的差异及其动态变化[J]. 广西农业生物科学, 2007, 26(增刊):82-85.
- WANG Ying, LI Zheng-wen, HE Zi-jing. Difference and dynamics of Cd uptake in four rice cultivars[J]. *Journal of Guangxi Agricultural and Biological Science*, 2007, 26(Suppl):82-85.
- [23] 吴启堂, 陈卢, 王广寿, 等. 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(1):104-107.
- WU Qi-tang, CHEN Lu, WANG Guang-shou, et al. Differences on Cd uptake and accumulation among cultivars and its mechanism[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999(1):104-107.
- [24] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒 Cd, Cu 和 Se 的含量差异及其人类膳食摄取风险[J]. 环境科学, 2003, 24(3):112-115.
- LI Zheng-wen, ZHANG Yan-ling, PAN Gen-xing, et al. Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(3):112-115.
- [25] 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-Environmental Science*, 2009, 28(7):1346-1352.
- [26] 柯庆明. 水稻对镉累积的遗传生态学特性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2006:10.
- KE Qing-ming. The properties of genetic ecology on cadmium accumulation in rice[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture & Forestry University, 2006:10.
- [27] 王玉纵, 张金彪, 苏年华. 福建耕地土壤重金属污染的生态效应[J]. 福建农业大学学报, 1996, 25(4):461-466.
- WANG Yu-zong, ZHANG Jin-biao, SU Nian-hua. The ecological effect of heavy metal pollution in cultivated land in Fujian Province[J]. *Journal of Fujian Agricultural University*, 1996, 25(4):461-466.
- [28] Jansson G, Oborn L. Cadmium content of Swedish carrots and the influence of soil factors[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica Sect B, Soil and Plant Science*, 2000, 50:49-56.