

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.

LONG Si-si, SONG Zheng-guo, LEI Ming, et al. Growth and Cd accumulation of rice (*Oryza sativa* L.) grown in soils amended with Cd from different pollution sources[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 419-424.

不同外源镉对水稻生长和富集镉的影响研究

龙思斯¹, 宋正国^{2*}, 雷鸣^{1*}, 喻理¹, 王艺康¹, 蒋宏芳³, 沈跃²

(1.湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2.农业部产地环境质量重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室, 天津 300191; 3.湖南安邦新农业科技股份有限公司/湖南省安邦农业研究院, 湖南 衡阳 421200)

摘要:为了探究不同来源镉对水稻富集镉的影响,通过盆栽种植水稻实验,以外源添加镉方式分别模拟土壤镉污染源、灌溉水镉污染源和大气降水镉污染源,对水稻的生长及其镉的含量和分布特征进行分析。结果表明:与对照相比,三种不同污染源中镉的含量对水稻株高以及稻谷的重量无显著影响($P>0.05$)。水稻植株各部位的镉含量随着污染源中镉浓度的升高而显著增加($P<0.05$),其中土壤污染和灌溉水污染处理下水稻植株中镉含量分布为根>茎>叶>谷壳>糙米,叶面污染为叶>根>茎>谷壳>糙米。无论是在同一污染源不同镉浓度还是不同单一污染源下,糙米中镉的含量与叶面中镉的含量呈显著线性关系($P<0.05$)。三种污染源对糙米富集镉的贡献顺序为叶面污染源>灌溉水污染源>土壤污染源。

关键词:水稻;镉;土壤污染源;灌溉水污染源;叶面污染源;糙米

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)03-0419-06 doi:10.11654/jaes.2016.03.002

Growth and Cd accumulation of rice (*Oryza sativa* L.) grown in soils amended with Cd from different pollution sources

LONG Si-si¹, SONG Zheng-guo^{2*}, LEI Ming^{1*}, YU Li¹, WANG Yi-kang¹, JIANG Hong-fang³, SHEN Yue²

(1.College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2.Key Laboratory of Production Environment and Agro-product Safety of Ministry of Agriculture and Tianjin Key Laboratory of Agro-environment and Food Safety, Tianjin 300191, China; 3.Hunan Anbang New Agricultural Science and Technology Corp and Hunan Anbang Academy of Agricultural, Hengyang 421200, China)

Abstract: Cadmium from different pollution sources may have different bioavailability, thus showing various effects on plants. Here an experiment was carried out to study the effects of different sources of Cd on growth and Cd uptake of rice (*Oryza sativa* L.) under greenhouse condition. Cadmium was added to soil-rice system via mixing soil with Cd²⁺-containing solution, irrigating water and leaf-spraying to simulate soil pollution, irrigation water pollution, and atmospheric deposit pollution sources, respectively. Compared with the control, there were no significant differences in plant height and grain yields of rice among three different Cd pollution sources ($P>0.05$), while the contents of Cd in rice plants significantly increased ($P<0.05$) with increasing Cd concentrations in three pollution sources. The distributions of Cd in rice plants treated with soil pollution and irrigation water pollution sources were: root>stem>leaf>husk> brown rice, whereas it was leaf>root>stem>husk>brown rice under atmospheric Cd pollution. Significant linear relationship ($P<0.05$) was found between Cd content in leaves and in husks of rice in the same Cd pollution source, or across different pollution sources. The highest concentration of Cd in brown rice was observed under atmospheric pollution source, followed by irrigation water pollution and soil pollution sources, suggesting that enrichment of Cd in brown rice decreased in order of atmospheric pollution>irrigation water pollution>soil pollution.

Keywords: rice plant; cadmium; soil pollution source; irrigation water pollution source; atmospheric pollution source; brown rice

收稿日期:2015-11-09

基金项目:国家 863 项目子课题(2012AA10404-5);湖南省安邦农业研究院资助项目

作者简介:龙思斯(1991-),女,湖南娄底人,硕士研究生,研究方向为环境污染修复与治理。E-mail:358719093@qq.com

*通信作者:宋正国 E-mail:forestman1218@163.com

雷鸣 E-mail:leiming8297@163.com

水稻是世界三大主要粮食作物之一,也是亚洲最重要的粮食来源。但是由于人类活动的影响,导致水稻中重金属,尤其是镉含量严重超标。由于镉(Cd)对人体危害的风险水平超过 Hg 和 Pb 的 3~4 个数量级^[1],对人体健康造成巨大的威胁。我国稻米中 Cd 含量超标问题日趋严重,随着国民经济发展和人们生活水平的提高,Cd 超标的粮食安全问题也愈加引起国内外消费者的广泛关注。研究表明,造成水稻中重金属含量超标原因有多种,如大气降尘、污水灌溉和污染土壤、工业三废排放、超标肥料施用以及不合理的农业措施等^[2-8],但究竟是哪一种污染源是造成水稻中重金属含量的主要污染源,目前的报道还存在不同的观点。如赵雄等^[3]认为土壤中 Cd 含量对水稻糙米中 Cd 的富集量贡献较大;严连香等^[4]调查表明,污水灌溉能显著导致作物中 Cd 的含量超标;而于瑞莲等^[8]研究发现大气沉降中 Cd 含量导致城市道路和工业区作物中 Cd 含量超标。可见,作物富集重金属 Cd 的来源比较复杂,如何确定稻米富集 Cd 主要污染来源是当前研究的热门问题。本研究在温室开展盆栽实验,通过对土壤添加外源 Cd、灌溉水施加 Cd 和叶面喷施 Cd 分别模拟土壤 Cd 污染源、灌溉水 Cd 污染源和大气降水 Cd 污染源,探讨这三类污染途径下,水稻对 Cd 的吸收积累规律,分析三种不同污染源对糙米富集 Cd 的贡献关系,其结果对水稻的安全生产具有指导作用,并为阻控稻米 Cd 超标问题提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为湖南农业大学耘园农田表层土壤,pH 值为 7.05,土壤 Cd 本底为 $(0.06 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤去除杂质后,风干,混匀,过 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 筛。Cd 的污染物为 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 分析纯化学试剂。供试水稻为中嘉早 17 号(浙审稻 2006020),供试盆栽容器为直径 22 cm、高 25 cm 的塑料桶。

1.2 盆栽试验设计

盆栽实验在湖南农业大学通风玻璃房进行。每个塑料桶装土 6.5 kg,实验设置 4 种处理:无 Cd 污染(对照,CK)、土壤外源 Cd 污染(T)、灌溉水外源 Cd 污染(G)和叶面外源 Cd 污染(Y)。为了避免过多的干扰因素,每种污染源中 Cd 的浓度设置一样,即设置 3 个 Cd 处理浓度 ($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$):1.5、3.0、6.0 $\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,每个浓度设置 3 次平行,对照组(CK)也设

3 次平行,共 30 盆。土壤外源 Cd 的添加是将 Cd 以溶液的形式与风干土混匀,注水至饱和,平衡 3~4 周。移栽水稻秧苗前,按 N:0.150 $\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (氮肥比例按 3:2 的比例做基肥和分蘖肥施用)、 P_2O_5 :0.120 $\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 K_2O :0.150 $\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 施加基肥,注水饱和放置 3~7 d,然后移植水稻秧苗,每桶均匀摘插 3 兜,每穴 2 株。水稻秧苗于 2014 年 4 月 25 日插入盆栽。叶面外源 Cd 和灌溉水外源 Cd 设计在水稻分蘖期、孕穗期、抽穗期、扬花期、乳熟期,于早上 9 点和下午 5 点后分别进行叶面 Cd 喷施和 Cd 溶液的灌溉,每次分别喷施和灌溉 150 mL 不同 Cd 浓度的溶液,共 10 次。叶面喷施时为避免溶液进入土壤,用塑料薄膜覆盖,待叶面近干,移走薄膜。在水稻整个生育期水分管理与大田管理方式一致,所用日常水 Cd 浓度为 $1.12 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,未超过国家灌溉水标准值($<10 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)。在病虫害出现初期,及时喷施农药。

1.3 土壤和植物样品采集与分析

土壤样品以四分法取样,经风干后,研磨过 100 目尼龙筛,采用电位法(水土比为 2.5:1)测定 pH^[9],用王水(HNO_3 : HCl =3:1)硝化法消煮,同时用土壤国家标准参比物质(GSS-5)和空白样进行分析质量控制,并用原子吸收分光光度计-石墨炉法(GTA120,美国 Varian)测定土壤本底 Cd 含量。

在水稻收获期采集植株样品,用自来水清洗,并分离根、茎、叶、谷壳和糙米。将谷粒样品置于室外阳光下晒干,其他部位样品皆装入 A4 信封袋编号后置于 $102 \text{ } ^\circ\text{C}$ 烘箱内 2 h,后调至 $65 \text{ } ^\circ\text{C}$ 烘至恒重。记录谷粒的干重后,用 JLG-II 型砻谷机分离谷壳和糙米,水稻的根、茎、叶用植物粉碎机粉碎后,装入密封袋保存待用。水稻样品(根、茎、叶、谷壳和糙米)采用混合酸硝酸-高氯酸(体积比为 4:1)消化法消煮,同时用植物国家标准参比物质[灌木枝叶 GBW07603(GSV-2)]、大米植物国家标准参比物质[GBW10010(GSB-1)]和空白样进行分析质量控制。镉全量测定采用原子吸收分光光度计-石墨炉法(GTA120,美国 Varian)测定。分析过程中所用试剂均为优级纯。

1.4 数据处理

所有数据均采用 3 次重复的平均值 \pm 标准偏差来表示。采用 SPSS 18.0 统计分析软件进行单因素方差分析,采用 Excel 2003 进行数据的绘图。相关方程与相关系数在 SPSS 中通过“分析-回归-线性”程序检验实现。

2 结果与讨论

2.1 外源 Cd 对水稻株高和稻谷产量的影响

Cd 进入植物体内后,对水稻的污染具有强烈的隐蔽性和危害性。由表 1 可知,三种污染源处理的株高与对照无显著差异($P>0.05$),土壤源和叶面源的不同浓度间均无显著差异($P>0.05$);灌溉水污染源处理下 G-1 的株高显著大于 G-2 和 G-3,说明此类污染源的 Cd 胁迫对水稻生长有一定抑制作用。水稻稻谷的重量在不同处理间均无显著性差异($P>0.05$),说明三种污染源下的不同 Cd 浓度对本实验供试水稻的产量影响不大。有研究表明,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^[9],最终毒害作用相对减轻。孙聪等^[11]通过盆栽试验发现在中碱性水稻土中,多种水稻品种生物量随

着 Cd 污染浓度增加没有显著性差异,说明在低浓度 Cd($10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)污染下不同水稻品种表现的生长性各有差异^[12]。

2.2 外源 Cd 污染下水稻植株各部位的 Cd 含量

如表 2 所示,对照处理下,水稻谷壳和糙米中 Cd 的含量分别为 $0.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。随着土壤中 Cd 浓度的增加,水稻各部位 Cd 的含量也相应升高,稻谷中的 Cd 含量差异性显著($P<0.05$)。水稻各部位 Cd 含量大小顺序为根>茎>叶>谷壳>糙米。水稻地上部分 Cd 的含量远低于根,这一规律和已有的研究结果一致^[13]。

土壤受到灌溉水 Cd 污染时,水稻各部位 Cd 含量与对照组相比达到了显著差异水平($P<0.05$),其大小顺序为根>茎>叶>谷壳>糙米。随着灌溉水中 Cd 浓度的增加,水稻植株各部位中 Cd 含量升高。可见,灌

表 1 外源 Cd 污染对水稻地上部生物量的影响

Table 1 Effects of Cd pollution on aboveground biomass of rice

处理 Treatment		株高 Plant height/cm	相对值 Relative value/%	谷重 Grain weight/g·盆 ⁻¹	相对值 Relative value/%
对照(Blank)	CK	85.5±2.12ab	100.0	17.9±1.43a	100.0
土壤污染源 Soil pollution resource	T-1	82.5±0.70a	96.5	18.4±0.45a	102.7
	T-2	82.0±1.41a	95.9	19.6±1.22a	109.4
	T-3	82.5±0.70a	96.5	15.6±1.01a	87.3
灌溉水污染源 Irrigation water pollution resource	G-1	89.5±3.53b	104.7	17.2±1.23a	96.3
	G-2	83.5±0.70a	97.7	18.2±0.48a	101.7
	G-3	80.0±2.82a	93.6	15.6±1.42a	87.3
叶面污染源 Atmospheric pollution resource	Y-1	81.5±2.12a	95.3	19.9±0.05a	111.2
	Y-2	80.5±3.53a	94.2	18.8±1.18a	104.8
	Y-3	80.5±2.12a	94.2	17.5±0.73a	97.6

注:同一列中带不同小写字母表示处理间差异显著($LSD, P<0.05$),下同。

Note: Different letters indicate significant difference between treatments ($LSD, P<0.05$). The same below.

表 2 不同 Cd 污染源条件下水稻植株 Cd 的含量

Table 2 Content of Cd in rice plants treated with different pollution sources

处理 Treatment		镉 Cd/mg·kg ⁻¹				
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	谷壳 Husk	糙米 Brown rice
对照(Blank)	CK	0.97±0.32a	0.30±0.07a	0.21±0.34a	0.09±0.02a	0.04±0.01a
土壤污染源 Soil pollution resource	T-1	11.68±0.39ab	2.16±0.39ab	1.15±0.54ab	0.40±0.06a	0.20±0.09b
	T-2	17.79±3.51ab	3.94±0.29ab	1.78±0.50b	0.66±0.04b	0.46±0.02bc
	T-3	44.00±8.44b	4.51±0.83b	2.03±0.17b	0.91±0.17c	0.74±0.02c
灌溉水污染源 Irrigation water pollution resource	G-1	22.84±6.99ab	3.12±0.06ab	1.08±0.44ab	0.40±0.08 a	0.33±0.08 b
	G-2	39.55±3.53b	4.71±0.70d	2.33±0.33bc	0.80±0.03ab	0.56±0.04bc
	G-3	53.27±8.48b	5.36±0.52cd	4.06±2.11c	1.00±0.07 b	0.71±0.05 c
叶面污染源 Atmospheric pollution resource	Y-1	23.12±2.55bc	10.25±0.51b	22.47±3.66b	8.43±0.53b	1.96±0.23b
	Y-2	25.01±0.41bc	16.08±4.04c	35.49±10.32c	17.77±1.48c	2.67±0.19c
	Y-3	26.81±2.72bc	35.11±1.06d	74.36±5.08d	35.00±2.60d	4.39±0.50d
稻米标准 Rice standard(GB2762—2012)					0.2	

溉水中 Cd^{2+} 极易被水稻吸收积累, 水稻地上部分的 Cd 主要来源于根部对灌溉水中离子态 Cd 的吸收, 且李玉清等^[14]研究表明当 Cd^{2+} 质量浓度 $>0.005 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 稻米富集 Cd 的量随着灌溉水中 Cd 质量浓度的升高而显著增加。

通过喷施叶面 Cd^{2+} 时, 发现水稻叶子中 Cd 的积累效果非常明显, 其次就是茎跟籽实, 达到了显著水平 ($P < 0.05$)。随着 Cd 喷施浓度的增加, 水稻地下部分的 Cd 含量相差不大, 差异水平不显著 ($P > 0.05$)。水稻植株中 Cd 的含量大小顺序为叶 $>$ 根 $>$ 茎 $>$ 谷壳 $>$ 糙米, 表明叶片中 Cd 的含量可作为判断水稻富集重金属来源的依据。糙米 Cd 含量所占叶片中的比重随污染浓度增加而减小, 说明 Cd 在叶片中存在永久性积累^[15], 超过一定浓度后, 叶片向糙米的运输会有局限性。

综上所述, 随着外源 Cd 污染浓度的增加, 水稻各部位 Cd 含量也相应增加^[16]。相同 Cd 浓度条件下, 不同污染源对水稻 Cd 积累贡献顺序基本为叶面污染源 $>$ 灌溉水污染源 $>$ 土壤污染源。当 Cd 处理浓度 $\geq 1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 三种污染源都导致了稻米中 Cd 含量超标。研究表明, 如果是土壤污染源和灌溉水污染源, 水稻主要通过根的质外体和共质体途径从土壤溶液中吸收 Cd, 然后从根系中柱流向木质部, 最后 Cd 被运输到茎、叶以及籽实中^[17], 且根际周围 Cd 离子越多, 水稻地下部分对 Cd 的吸收积累也会增多^[18]。土壤源和灌溉水源较叶面源下糙米 Cd 含量所占根部 Cd 含量比重小, 由于土壤自身生态环境以及气候条件等诸多因素都会对植株从土壤中吸收 Cd 造成一定影响^[19], 根部积累的 Cd 通过维束管组织向地上各器官转运过程中会受到各组织细胞壁的活性化合物阻控作用, 最后能达到叶片和谷粒的量是有限的^[20-21]。而叶面污染源, 水稻吸收 Cd 主要是通过叶面气孔、叶表面角质层的亲水小孔以及叶片细胞的质外连丝进行主动吸收这三种途径进入叶肉细胞^[22]。根茎部 Cd 含量在 Y-1 和 Y-2 处理下分别大于 T-1 和 T-2 的处理, 分析认为叶片一部分 Cd 能向下迁移, 叶片中富集的 Cd 主要来自于叶面喷施污染源, 而不是从土壤中吸收获得。

2.3 外源 Cd 污染处理下水稻各部位 Cd 含量的相关性分析

2.3.1 外源 Cd 污染处理下水稻各部位和稻谷中 Cd 富集的相关性

水稻暴露在不同的污染源下, 经过根或叶面对 Cd 的吸收后, 都会进入其体内造成一定的富集^[23]。为

了探究水稻各部位 Cd 含量对稻谷中 Cd 含量的影响, 建立水稻根、茎、叶片与稻谷(谷壳+糙米)的一元方程, 如图 1 所示。在三种污染源处理下, 水稻根部 Cd 含量与稻谷中 Cd 含量的相关方程为 $y = -0.0016x + 3.4481$, $R^2 = 0.00004$ ($P > 0.05$, $n = 10$); 水稻茎中 Cd 含量与稻谷中 Cd 含量的相关方程为 $y = 0.3847x + 0.1140$, $R^2 = 0.8565$ ($P > 0.05$, $n = 10$), 水稻叶片中 Cd 含量与稻谷中 Cd 含量的相关方程为 $y = 0.1714x + 0.9077$, $R^2 = 0.9108$ ($P < 0.01$, $n = 10$)。由此可知, 叶片中 Cd 含量对稻谷富集 Cd 有显著的影响。

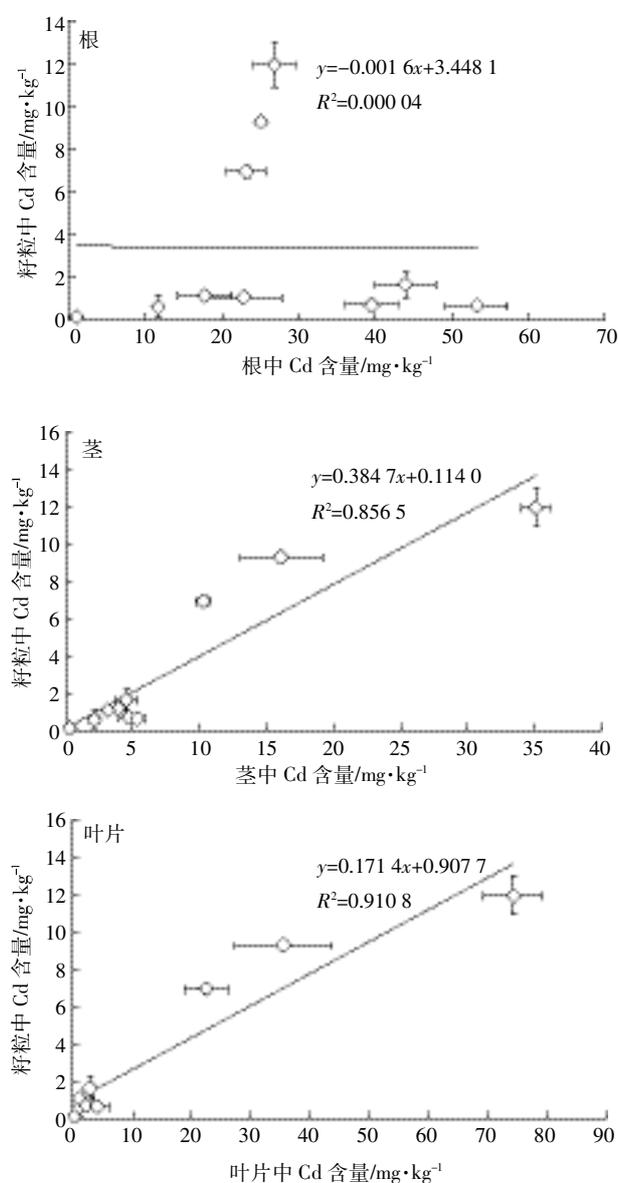


图 1 三种污染源处理下水稻根、茎、叶片 Cd 含量与稻谷中 Cd 含量相关性

Figure 1 Correlation between Cd concentrations in roots, shoots, and leaves and brown rice under three Cd pollution sources

2.3.2 外源 Cd 污染处理下水稻叶片 Cd 含量和稻谷中 Cd 富集的相关性

为了进一步探究不同污染源下叶片 Cd 含量对糙米 Cd 含量的影响,建立水稻叶片和糙米之间的一元方程。如图 2 所示,土壤外源污染时,糙米中 Cd 含量与叶片中 Cd 含量之间的相关方程为 $y=0.269 2x-0.059 7$, $R^2=0.979 8$; 叶面外源污染时,糙米中 Cd 含量与叶片中 Cd 含量之间的相关方程为 $y=0.056 9x+0.378 8$, $R^2=0.964 9$; 灌溉水外源污染时,糙米中 Cd 含量与叶片中 Cd 含量之间的相关方程为 $y=0.171 5x+0.082 5$, $R^2=0.922 9$ 。在三种污染源处理下,叶片中 Cd 含量与糙米中 Cd 含量的相关系数都显著相关 ($P<0.05$), 说明此处理下叶片中 Cd 的输出可直接影响水稻糙米中的 Cd 含量,因此在盆栽条件下,通过叶片 Cd 含量的测定来检测水稻可食部分 Cd 超标是可行的。

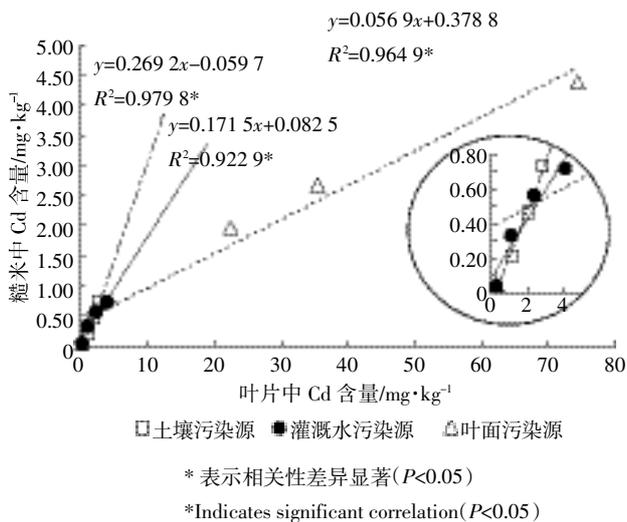


图 2 三种污染源处理下叶片 Cd 含量和糙米 Cd 含量相关性
Figure 2 Correlations between Cd concentrations in leaves and brown rice under three Cd pollution sources

根据图 2 线性方程得出,当叶片富集 Cd $<1.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,糙米中富集 Cd 的程度大小为灌溉水污染源>土壤污染源;当叶片富集 Cd $<2.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,糙米中富集 Cd 的程度大小为叶面污染源>土壤污染源;当叶片富集 Cd $<2.61 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,糙米中富集 Cd 的程度大小为叶面污染源>灌溉水污染源。综上所述,在叶片含 Cd 浓度为 $1.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下时,三种污染源对水稻稻谷中富集 Cd 的贡献大小为叶面污染源>灌溉水污染源>土壤污染源。以国家粮食安全标准值 Cd $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (GB 2762—2012)为评价标准,发现大气沉降中的 Cd 很容易通过叶片吸收向水稻稻谷转

移,因此,相比土壤和灌溉水污染源更容易造成稻米中 Cd 含量超标问题。

3 结论

(1)与空白对照组相比,模拟土壤污染源、灌溉污染源和叶面污染源中 Cd 的含量对水稻的生长及稻谷重量无显著影响。

(2)在三种污染源处理下,水稻植株各部位 Cd 的含量随污染源中 Cd 的浓度升高而显著增加,其中土壤污染源和灌溉水污染源处理下,水稻各部位 Cd 含量大小顺序为根>茎>叶>谷壳>糙米,叶面污染源为叶>根>茎>谷壳>糙米。

(3)可以通过测定叶片 Cd 含量来预测水稻糙米中 Cd 的含量,但是在田间的实际应用,有待于进一步研究。

(4)叶面污染源更容易导致糙米中 Cd 含量超过国家食品卫生标准值,其次是灌溉水污染源,最后是土壤污染源。

此外,本研究只考虑在单一污染源下的可能性,但是在农田环境中,水稻可同时受到多方面的污染源影响。因此,在三种污染源的复合污染下,具体是哪一种或者哪几种污染源中 Cd 对水稻富集 Cd 的贡献率最大还有待深入研究。

参考文献:

- [1] 沈体忠,朱明祥,肖杰. 天门市土壤-水稻系统重金属迁移累积特征及其健康风险评估[J]. 土壤通报, 2014, 45(1):221-226.
SHEN Ti-zhong, ZHU Ming-xiang, XIAO-jie. Characteristics of migration and accumulation of heavy metals in soil-rice system of Tianmen and its health risk assessment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1):221-226.
- [2] 欧阳达,谭长银,余霞,等. 湘江长沙段土壤和沉积物重金属污染模糊评价及污染源分析[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2014, 37(5):1-7.
OUYANG Da, TAN Chang-yin, YU Xia, et al. Fuzzy comprehensive evaluation and analysis of the pollutant source of heavy metal in soils and sediments in Xiangjiang Changsha section[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2014, 37(5):1-7.
- [3] 赵雄,李福燕,张冬明,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 between paddy soils cadmium pollution and cadmium content in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11):2236-2240.
- [4] 严连香,黄标,邵学新,等. 不同工业企业周围土壤-作物系统重金属 Pb、Cd 的空间变异及其迁移规律[J]. 土壤学报, 2009, 46(1):52-62.

- YAN Lian-xiang, HUANG Biao, SHAO Xue-xin, et al. Spatial variability and transfer of Pb and Cd in soil-crop system around different types of factories[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1):52-62.
- [5] 田恒川, 徐国志. 镉地球化学行为与我国西南地区镉污染[J]. *现代矿业*, 2014(11):134-136.
- TIAN Heng-chuan, XU Guo-zhi. Cadmium geochemical behavior and cadmium pollution in southwest of our country[J]. *Modern Mining*, 2014(11):134-136.
- [6] 张萌, 毋燕妮, 解静芳, 等. 太原市污灌区土壤镉存在形态与生物可利用性研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(10):3276-3283.
- ZHANG Meng, WU Yan-ni, XIE Jing-fang, et al. Chemical speciation and bioavailability of cadmium in sewage-irrigated farm soils in Taiyuan[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(10):3276-3283.
- [7] 侯佳渝, 刘金成, 曹淑萍, 等. 天津市城区大气干湿沉降地球化学研究[J]. *地质调查与研究*, 2013, 36(2):131-135.
- HOU Jia-yu, LIU Jin-cheng, CAO Shu-ping, et al. Study on the dry and wet atmospheric deposition in the urban area of Tianjin[J]. *Geological Survey and Research*, 2013, 36(2):131-135.
- [8] 于瑞莲, 胡恭任. 土壤中重金属污染源解析研究进展[J]. *有色金属*, 2008, 60(4):158-165.
- YU Rui-lian, HU Gong-ren. Research progress in sources identification of soil heavy metal pollution[J]. *Nonferrous Metals*, 2008, 60(4):158-165.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 474-490.
- LU Ru-kun. Analysis of soil agricultural chemical[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 2000:474-490.
- [10] Chaca M V P, Viglocco 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.
- [11] 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 soils and its species sensitivity distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(12):2384-2394.
- [12] 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]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(11):61-66.
- [13] 陈群芳, 叶瑶瑶, 徐青, 等. 水稻对镉的吸收规律及大米的安全控制技术研究进展[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2014, 15(10):1801-1804.
- CHEN Qun-fang, YE Yao-yao, XU Qing, et al. Research advance on absorption law of cadmium by rice and safety control technology of cadmium in rice grain[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2014, 15(10):1801-1804.
- [14] 李玉清, 周雪梅, 姜国辉, 等. 含镉水灌溉对水稻产量和品质的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(4):120-123.
- LI Yu-qing, ZHOU Xue-mei, JIANG Guo-hui, et al. Influence of irrigation with different concentrations of cadmium solution on rice yield and quality[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(4):120-123.
- [15] Wagner G J, Yeargan R. Variation in cadmium accumulation potential and tissue distribution of cadmium in tobacco[J]. *Plant Physiol*, 1986, 82(1):274-279.
- [16] Uraguchi S P, Fujiwara T. Cadmium transport and tolerance in rice: Perspectives for reducing grain cadmium accumulation[J]. *Rice*, 2012, 5(5):1-8.
- [17] 陈爱葵, 王茂意, 刘晓海, 等. 水稻对重金属镉的吸收及耐性机理研究进展[J]. *生态科学*, 2013, 32(4):514-522.
- CHEN Ai-kui, WANG Mao-yi, LIU Xiao-hai, et al. Research progress on the effect of cadmium on rice and its absorption and tolerance mechanisms[J]. *Ecological Science*, 2013, 32(4):514-522.
- [18] Craig Plett D, Mller I S. Na⁺ transport in glycophytic plants: What we know and would like to know[J]. *Plant Cell Environment*, 2010, 33(4):612-626.
- [19] 陈涛, 常青瑞, 刘京. 长期污灌农田土壤Cd赋存形态及其有效性的空间变异研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(7):1322-1327.
- CHEN Tao, CHANG Qing-rui, LIU Jing. Fractions and bioavailability spatial distribution of soil Cd under long-term sewage irrigation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7):1322-1327.
- [20] 杨志敏, 郑绍建, 胡霁堂, 等. 镉磷在小麦细胞内的积累和分布特性及其交互作用[J]. *南京农业大学学报*, 1998, 21(2):54-58.
- YANG Zhi-min, ZHENG Shao-jian, HU Ai-tang, et al. Accumulation and distribution of cadmium and phosphorus and their interaction in wheat suspension-cultured cells[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1998, 21(2):54-58.
- [21] Clemens S, Aarts M G, Thomine S, et al. Plant science: The key to preventing slow cadmium poisoning[J]. *Trends in Plant Science*, 2013, 18(2):92-99.
- [22] 李燕婷, 李秀英, 肖艳, 等. 叶面肥的营养机理及应用研究进展[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(1):162-172.
- LI Yan-ting, LI Xiu-ying, XIAO Yan, et al. Advances in study on mechanism of foliar nutrition and development of foliar fertilizer application[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(1):162-172.
- [23] 胡星明, 王丽平, 杨坤, 等. 城市道路旁小蜡叶片对重金属的富集特征[J]. *环境化学*, 2009, 28(1):89-93.
- HU Xing-ming, WANG Li-ping, YANG Kun, et al. Accumulation of atmospheric heavy metals by *Ligustrum sinense* leaves in urban traffic road[J]. *Environmental Chemistry*, 2009, 28(1):89-93.