

水稻营养器官镉积累特性对稻米镉含量的影响

王志琦^{1,2}, 赵艳玲¹, 崔冠男^{1,3}, 尹洁^{1,3}, 高子平^{1,3}, 赵静¹, 樊金娟², 刘仲齐^{1,2,*}

¹农业部环境保护科研监测所生态毒理与环境修复研究中心, 天津300191; ²沈阳农业大学生物科学技术学院, 沈阳110161; ³天津师范大学生命科学学院, 天津300387

摘要: 对10个籼稻品种营养器官镉积累特性的遗传差异及其与稻米镉含量的关系进行了研究。试验结果表明, 水稻各器官的镉富集能力在不同品种间存在显著差异, 变异系数为25.34%~45.40%; 成熟期各器官的镉积累量依次为: 根系>叶片>穗轴>籽粒。通过通径分析发现, 穗轴中的镉浓度对稻米镉含量的影响最大, 根系中的镉浓度和叶片中镉的输出量共同决定着穗轴中的镉浓度。喷施或涂抹镉溶液都能显著提高水稻叶片中的镉含量, 喷施3次能显著提高叶片中的镉输出量和稻米中的镉含量, 旗叶对稻米镉含量的贡献率显著大于倒二叶和倒三叶。这说明通过大气沉降进入叶片的镉和污染土壤中的镉都会对稻米中的镉积累量产生显著影响。

关键词: 水稻; 镉含量; 穗轴; 遗传差异; 叶片镉输出量

Effects of Cadmium Accumulation Characteristics in Vegetative Organs on Cadmium Content in Grains of Rice

WEN Zhi-Qi^{1,2}, ZHAO Yan-Ling¹, CUI Guan-Nan^{1,3}, YIN Jie^{1,3}, GAO Zi-Ping^{1,3}, ZHAO Jing¹, FAN Jin-Juan², LIU Zhong-Qi^{1,2,*}

¹Centre for Research in Ecotoxicology and Environmental Remediation, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; ²College of Biological Sciences and Technology, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; ³College of Life Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

Abstract: The genetic diversity of cadmium content in vegetative organs of 10 varieties of rice (*Oryza sativa* ssp. *indica*) and its relationship with cadmium content in rice grains were studied in this research. The results showed that the cadmium accumulation capacity of organs was significantly different among different rice varieties and its coefficient variation was 25.34%–45.40%. The order of cadmium levels in different organs at maturity stage was as follows: root>leaf>rachis>grain. Meanwhile, path analysis showed that cadmium content in rice grains was greatly influenced by cadmium concentration in rachis, which was determined by cadmium accumulation in root and output of cadmium from leaves. The cadmium content of leaves could be significantly increased by spraying or daubing cadmium solution. The output of cadmium from leaves and cadmium content in rice were significantly increased after spraying three times. Flag leaf offered rice more cadmium than the second and third leaves under it. These results indicate that cadmium both in leaves through atmospheric precipitation and from contaminated soils significantly influence the cadmium accumulation in rice grains.

Key words: rice; cadmium content; rachis; genetic diversity; output of cadmium from leaves

随着我国工业化进程的加速和社会经济的发展, 重金属污染问题日趋严峻, 水稻生产受重金属镉污染的影响也日益加剧, 严重威胁着粮食生产和食品安全(王永强等2010; 邹继颖等2012)。研究表明, 水稻籽粒中富集的重金属主要来源于土壤和灌溉水等(彭华等2013; 李玉清等2012)。有研究表明铅锌矿区附近大气沉降对大白菜地上部分Cd、Pb和Hg等重金属积累有直接作用; 并且在一些交通污染和工业污染区发现茶叶中Pb、Cd和Cr的含量超标(牛玉璐和曹永胜2010; 杨成等2012; 王阳等2011)。周影等(2012)通过比较大气污染Pb和

土壤Pb对玉米等粮食作物籽粒的贡献率发现大气Pb通过叶面传输是玉米籽粒吸收Pb的重要途径, 但通过模拟大气镉污染来探究水稻体内镉来源的报道并不多见。本文以水稻为研究对象, 通过在

收稿 2015-05-14 修订 2015-07-07

资助 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(农业部环境保护科研监测所)(2014-szjj-lzq)、公益性行业(农业)科研专项(201403015)和2014年中国农业科学院科技创新工程项目(2014-cxgc-lzq)。

* 通讯作者(E-mail: liuzhongqi508@163.com; Tel: 022-23612803)。

水稻叶片表面喷施镉溶液来模拟大气沉降,对稻米中镉的主要来源进行了分析。

筛选稻米中镉含量较低的低镉积累品种,是保证中轻度污染农田稻米品质安全的有效方法之一。大量的研究表明,稻米中Cd、Pb、Cr等重金属含量在不同的水稻基因型间有极显著差异(陈新红等2014; 贺慧等2014; 范中亮等2010; 杜丽娜等2012; 居学海等2014);不同品种水稻各个部位的分布也明显不同,分配比例基本符合根系>茎叶>颖壳>籽粒(范中亮等2010; 唐非等2013)。但是,有关叶片镉输出量与稻米中镉积累关系的研究却鲜有报道。因此,本文以10种不同的水稻品种为材料,对根、茎不同部位镉积累特性的遗传多样性及其与镉转运积累的关系进行了研究。

材料与方 法

1 供试土壤

试验于2014年5月至10月在农业部环境保护科研监测所日光温室中进行,供试土壤采自于天津市某土壤污染区0~20 cm的表层土,运回后与未污染土壤按1:1混合均匀后等量装盆,盆体积为8 L,每盆装土4.0 kg。取部分土样磨碎后,分别过20目和100目筛。称取混合均匀后过100目筛的土样0.25 g,加10 mL HNO₃和1 mL HF浸泡过夜,用ED54加热器消煮(张燕和廖超英2008),用原子吸收光谱仪测定其镉含量为3.0 mg·kg⁻¹左右。称取混合均匀后适量过20目筛的土样,土液比1:2.5,测定其pH(林丽仙等2013)为7.6左右。外源喷施的重金属镉(CdCl₂·2.5H₂O)为分析纯化学试剂。

2 供试水稻品种

从湖南农丰种业有限公司购买到10个籼稻(*Oryza sativa* L. ssp. *indica*)品种:‘T优705’、‘株两优’、‘嘉249’、‘中嘉早17’、‘湘早籼24号’、‘湘早籼6号’、‘湘早籼45号’、‘湘早籼42号’、‘湘早籼11号’和‘湘早籼143号’。

3 样品的处理与采集

选取饱满均一的水稻种子在1%的次氯酸钠溶液中浸泡15 min,进行消毒并打破其休眠状态,用去离子水洗净,置于培养皿中保持湿润状态,在28 °C恒温箱里发芽,待胚芽露白后播种于育苗盘中,放在人工智能气候室中,水稻苗长到两叶一心

后将育苗盘中的水换成3 L左右1/4Hoagland营养液,长到四叶一心之后,选取长势均一的苗子,将根冲洗干净移栽到事先准备好的土培盆中,每盆7株,每个品种4次重复。在分蘖期和扬花期分别施适量复合肥一次。

遗传多样性分析:扬花期和成熟期分别采集3株,用去离子水冲洗干净后,把旗叶和倒二叶装于信封中,105 °C杀青20 min,70 °C烘干至恒重,叶片剪碎混匀之后备用;成熟期采收旗叶、倒二叶、穗和根系,旗叶、倒二叶和穗装于信封中,105 °C杀青20 min,70 °C烘干至恒重,叶片和穗轴剪碎、籽粒脱壳粉碎之后备用,根系先用去离子水冲洗,再用0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂浸泡20 min去除根表可交换态镉(杜英秋等2009),最后用去离子水将根系冲洗干净,装于信封中105 °C杀青20 min,70 °C烘干至恒重,剪碎混匀后备用。

叶面喷施试验:扬花期开始对预备好的‘T优705’进行喷施,每个处理4次重复,分别喷施1.0 mg·L⁻¹ CdCl₂(含稀释3 000倍的商用三硅氧烷表面活性剂)0、1、2、3次,每次喷施间隔1 d(24 h),每盆喷施70 mL。喷施7 d后和成熟期分别采集3株,先用去离子水冲洗,接着用去离子水浸泡20 min,然后再用去离子水冲洗一遍(Hong等2014)。叶片(旗叶和倒二叶)剪碎后包于锡纸中迅速放入液氮中,在-80 °C冰箱中保存。叶片(旗叶和倒二叶)剪碎混匀后备用,籽粒70 °C烘干至恒重之后脱壳、粉碎,备用。

叶片分层涂抹试验:扬花期开始对预备好的‘T优705’进行涂抹,每个处理3次重复,分别在旗叶、倒二叶和倒三叶上涂抹1.0 mg·L⁻¹ CdCl₂(含稀释3 000倍的商用三硅氧烷表面活性剂),每片叶子涂抹5 mL,每次涂抹间隔1 d(24 h),连续涂抹3次。成熟期收集籽粒,脱壳、粉碎后备用。

4 分析方法

镉含量测定:备用材料称重(根系0.25 g,叶片0.25 g,籽粒0.5 g,穗轴0.1 g),每个样品3次重复,样品浸泡于比例为7:1的HNO₃:H₂O₂混合液中(杜英秋等2009),用ED54加热器消煮完全之后,去离子水定容至25 mL,过滤,装于防盗瓶中。用原子吸收光谱仪(AAS, ZEE nit 700, Analytikjena, 德国)测定根系(x₁)、穗轴(x₂)、扬花期叶片(x₃)、成熟期叶片(x₄)和籽粒(y)的镉含量(杜英秋等2009)。

5 数据处理

所有数据采用Excel和SPSS17.0进行分析。相关系数(r_{ij}) 在SPSS中通过“分析→相关→双变量”程序实现; 正态检验在SPSS通过“分析→描述统计→探索”程序实现; 直接途径系数(P_{ij}) 在SPSS中通过“分析→回归→线性”程序实现, 任一自变量 x_i 对 y 的间接途径系数=相关系数(r_{ij})×途径系数(P_{ij}) (杜家菊和陈志伟2010; 杜鹃2012)。叶片镉输出量=扬花期叶镉含量×扬花期叶片质量-成熟期叶镉含量×成熟期叶片质量。籽粒镉含量增长率(%)=(Cdn-Cd0)/Cd0×100, 其中Cdn ($n=1, 2, 3$)为涂抹不同叶片后对应的籽粒镉含量, Cd0为未涂抹叶片对应的籽粒镉含量。

实验结果

1 水稻主要器官镉积累特性的遗传多样性分析

从表1可以看出, 相同镉浓度土壤中, 不同水稻品种同一器官中镉含量有显著差异, 说明在培

养环境和管理措施相同的情况下, 水稻品种间镉含量的差异主要由基因型决定。其中水稻品种‘湘早籼143’、‘湘早籼42’、‘湘早籼45’、‘湘早籼24’和‘中嘉早17’的籽粒镉含量明显较低, 而‘T优705’和‘湘早籼6’籽粒中的镉积累量显著高于其他品种。

变异系数是变异潜力大小的重要标志。从表2可以看出, 根系和穗轴中的镉含量在品种间的变异系数最小, 分别为25.62%和25.34%, 籽粒镉含量在品种间的变异系数为36.89%, 最大值是最小值的2.8倍。根系与土壤直接接触, 被动扩散和主动吸收致使根系内的镉浓度相对较高, 因此变异系数较小; 穗轴作为镉进入籽粒的直接通道, 反映了根系和叶片中的镉向籽粒转运的潜力, 其变异系数也比较小。扬花期叶片和成熟期叶片中镉含量的变异系数较大, 分别为45.40%和42.25%; 叶片中镉输出量变异系数介于扬花期叶片和成熟期叶片的镉含量变异系数之间, 为43.07%。由此可见, 不同品种水稻各器官中的镉含量有较高的遗传变异,

表1 不同水稻品种各器官的镉含量

Table 1 The cadmium content of different organs in different rice varieties

品种	镉含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$				
	根系	籽粒	穗轴	扬花期叶	成熟期叶
‘T优705’	8 025.69±21.72 ^a	301.33±8.48 ^a	523.36±2.83 ^a	1 683.55±6.70 ^a	929.37±1.73 ^{bc}
‘湘早籼45号’	3 687.66±709.47 ^c	127.54±5.78 ^c	359.15±2.76 ^{ab}	538.63±1.78 ^{cd}	341.70±11.13 ^f
‘湘早籼6号’	5 559.47±1 063.48 ^{bcd}	268.97±4.04 ^{ab}	373.59±3.08 ^{ab}	1 251.04±5.63 ^{abc}	812.90±2.18 ^{de}
‘中嘉早17’	5 802.48±913.89 ^{bcd}	151.82±1.13 ^c	308.57±2.34 ^{ab}	1 025.55±6.43 ^{abc}	814.25±1.66 ^{de}
‘嘉249’	4 401.87±40.96 ^{cde}	196.17±2.19 ^{bc}	392.31±2.75 ^{ab}	1 429.19±12.93 ^{ab}	1 125.17±17.81 ^b
‘株两优’	6 246.06±217.37 ^{abc}	183.98±3.85 ^{bc}	360.40±2.61 ^{ab}	495.75±6.16 ^d	479.66±4.94 ^{ef}
‘湘早籼24号’	5 310.56±1 103.65 ^{bcd}	147.06±7.42 ^c	306.90±2.61 ^{ab}	701.90±3.23 ^{bcd}	556.58±5.90 ^{def}
‘湘早籼11号’	6 357.25±914.23 ^{ab}	248.03±5.54 ^{ab}	534.92±1.26 ^a	1 564.91±2.83 ^a	1 426.98±13.08 ^a
‘湘早籼143号’	3 770.61±417.25 ^c	108.11±2.49 ^c	257.61±4.71 ^b	1 343.82±2.01 ^{ab}	686.07±1.99 ^{cde}
‘湘早籼42号’	4 158.97±678.45 ^{de}	120.01±2.44 ^c	360.12±4.53 ^{ab}	470.72±8.90 ^d	440.67±2.76 ^{ef}

同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

表2 水稻不同器官镉含量的遗传多样性

Table 2 The genetic diversity of cadmium contents in different organs of rice

水稻器官	镉含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$			标准差	变异系数/%
	最小值	最大值	均值		
根系	3 687.66	8 025.69	5 332.06	1 366.22	25.62
籽粒	108.11	301.33	185.30	67.21	36.89
穗轴	257.61	534.92	392.11	99.36	25.34
扬花期叶	470.72	1 683.55	1 006.54	456.94	45.40
成熟期叶	341.70	1 426.98	753.87	318.53	42.25
叶片镉输出量	88.03	289.94	176.04	75.82	43.07

叶片中的镉输出量在品种间的变异也非常丰富, 灌浆期间有些品种只输出 $88.03 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而有些品种则输出 $289.94 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

籽粒镉含量与根系、穗轴和扬花期叶片中的镉含量以及灌浆期间叶片中的镉输出量存在极显著的相关性, 而根系与穗轴、扬花期叶片、成熟期叶片和叶片输出镉的量相关性不显著(表3)。穗轴是灌浆期间营养体向籽粒输送各种离子的末端出口, 穗轴中镉含量每增加 $1 \mu\text{g}$, 籽粒中的镉含量

约增加 $0.62 \mu\text{g}$ (图1-A)。说明籽粒充实过程中, 作为运输通道的穗轴, 其物质流中的镉浓度很大程度上决定着籽粒中的镉含量。根系对镉的吸收转运和叶片中镉的输出直接影响穗轴中的镉浓度。随着根系中镉含量和叶片中镉输出量的增加, 籽粒中的镉含量也表现出明显的增加趋势(图1-B、C), 但增加的数量因品种而异, 说明水稻体内的阻控机制能够有效调控根系和叶片中镉向籽粒内的转运。

表3 不同器官之间镉含量相关系数

Table 3 The correlation coefficients of cadmium contents between different organs

	根系	籽粒	穗轴	扬花期叶片	成熟期叶片
籽粒	0.801**				
穗轴	0.625	0.918**			
扬花期叶片	0.563	0.797**	0.701*		
成熟期叶片	0.422	0.630	0.585	0.909**	
叶片镉输出量	0.543	0.769**	0.699*	0.982**	0.965**

*: 表示显著相关($P<0.05$); **: 表示极显著相关($P<0.01$)。

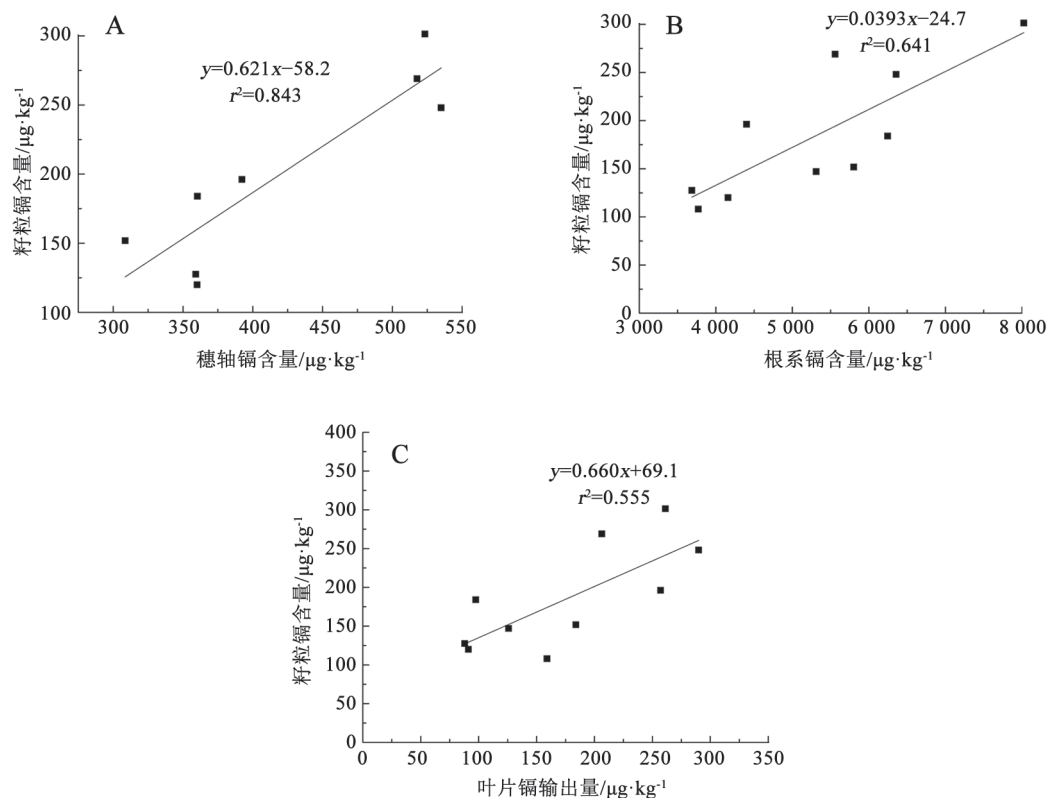


图1 10个品种水稻穗轴、根系镉含量和叶片镉输出量与籽粒镉含量之间的相关性

Fig.1 The relationship between cadmium in rice and cadmium content in rachis (A), roots (B) and output of cadmium from leaves (C) of 10 varieties of rice

2 水稻营养器官对籽粒镉积累的影响方式

利用Shapiro-Wilk Test模型对不同品种的籽粒镉含量进行正态性检验, 统计量为0.916, 达到0.05的显著水平, 说明籽粒镉含量(y)服从正态分布, 符合回归分析的前提条件。途径分析的结果表明, 各营养器官对籽粒镉积累直接作用均是正效应(表

4), 其中穗轴作用最大, 其直接途径系数为0.580。根系吸收的镉一部分通过穗轴直接进入籽粒, 另一部分转运到叶片储存起来, 在灌浆期通过穗轴进入籽粒。因此, 穗轴只是根系和叶片中营养物质进入籽粒进行积累的运输通道, 根系和叶片才是镉的储存库, 叶片镉输出量对籽粒的直接途径

表4 根系、穗轴和叶片输出镉对籽粒镉含量的途径分析

Table 4 Path analysis of roots, rachis and output of cadmium from leaves to Cd content in rice

项目	与籽粒的简单相关系数	直接途径系数	间接途径系数			合计
			根系	穗轴	叶片镉输出量	
根系	0.801	0.341	-	0.363	0.097	0.460
穗轴	0.918	0.580	0.213	-	0.125	0.338
叶片镉输出量	0.769	0.179	0.185	0.405	-	0.590

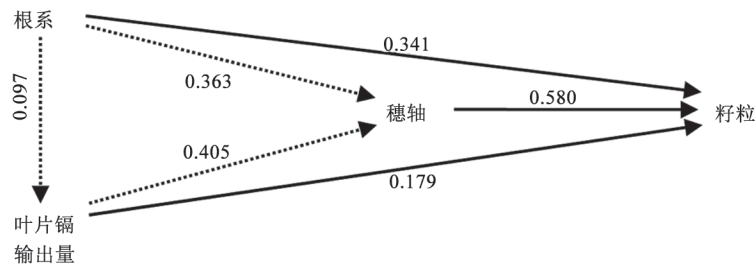


图2 根系、穗轴和叶片输出镉对籽粒镉含量的途径系数

Fig.2 Path coefficient of roots, rachis and for Cd content in rice

虚线箭头为间接途径系数; 实线箭头为直接途径系数。

系数为0.179, 根系对籽粒的直接途径系数为0.341, 说明根系对籽粒镉积累量的直接贡献显著大于叶片。根系和叶片对穗轴的途径系数非常接近(图2), 意味着灌浆期间根系对穗轴的直接转运量和叶片中镉的输出量对穗轴中镉含量的贡献率基本相等。

3 水稻叶片饲喂镉对籽粒镉含量的影响

开花期喷施CdCl₂溶液后7 d, 顶部两片叶中镉的积累量显著增加, 叶片中的镉含量与喷施次数呈正相关, 喷施3次>喷施2次>喷施1次>喷施0次(图3), 成熟期叶片镉喷施后7 d的叶片镉含量均有所减少。随叶片镉含量的增加, 叶片中镉的输出量和籽粒中镉含量也随之增加, 但未喷施、喷施1次和喷施2次的叶片镉输出量显著低于喷施3次的叶片镉输出量, 并且籽粒中镉含量和叶片镉输出量呈现出相同的规律。由此可见, 灌浆期间叶片中镉的输出量对水稻籽粒的镉含量有显著影响。

为了区分不同叶片镉的输出量对籽粒镉含量

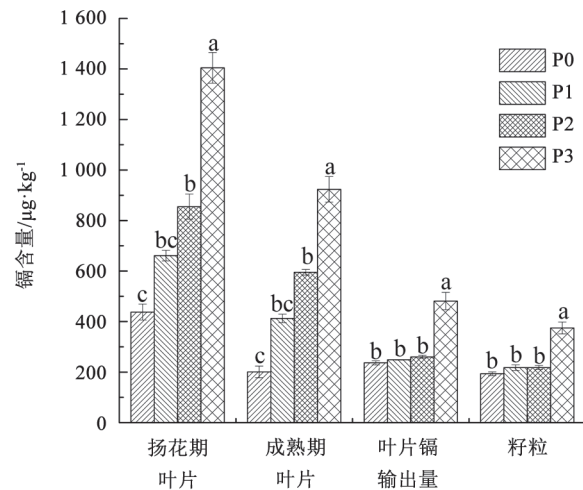


图3 喷施镉溶液后不同时期叶片和籽粒镉含量及叶片镉输出量的变化

Fig.3 Changes of the Cd content in rice and leaves at different stages as well as export amount from leaves after

同一器官不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$).

P0: 空白对照; P1: 喷施1次; P2: 喷施2次; P3: 喷施3次。

的贡献率, 开花期对顶部3片叶分别涂抹 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉溶液, 结果表明, 涂抹旗叶后使籽粒中的镉含量比对照增加了91.6% (图4)。涂抹倒二叶和倒三叶分别使籽粒中的镉含量增加了28.7%和9.4%。说明旗叶中的镉含量对籽粒镉含量的贡献率远远大于倒二叶和倒三叶。

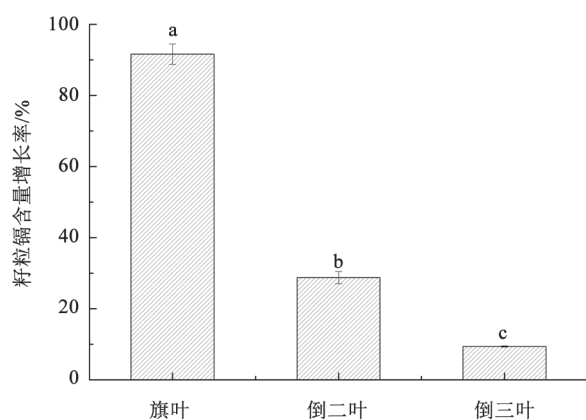


图4 在不同叶位叶片上涂抹镉溶液后籽粒镉含量
Fig.4 Cd content in rice after daubing cadmium solution on the different leaves
各柱形上不同小写字母表示差异达到5%显著水平。

讨 论

1 水稻主要器官镉积累量的差异

在相同浓度镉污染的土壤中, 不同水稻品种对镉的积累量及各器官中的分布各不相同, 同一品种水稻各部分对镉的富集能力也存在很大差异(姚春馨等2007; 孙聪等2014; 张路等2014)。本研究对10个籼稻品种主要器官镉积累量进行测定后发现, 不同水稻品种相同器官中的镉含量存在显著差异, 高积累品种如‘T优705’等叶片、穗轴和籽粒中镉含量均较高, 而低积累品种如‘湘早籼24’等叶片、穗轴和籽粒镉含量均只有‘T优705’的1/2左右, 说明在相同浓度镉胁迫下, 高积累品种根系能源源不断的从土壤中吸收镉并向地上部转运, 使地上部各器官镉含量较高; 而低积累品种根系吸收镉的能力较弱并且向地上部转运镉的能力也较差(Ueno等2010; Uraguchi和Fujiwara等2013), 因此低积累品种各器官镉含量较低。

水稻不同器官的镉积累量差异很大, 根系镉含量最高, 是籽粒镉含量的20~40倍, 是穗轴镉含

量的10~18倍, 是叶片镉含量的4~13倍, 说明水稻吸收的镉主要集中在根系和叶片中, 灌浆过程中叶片中的镉大量输出, 致使其中的镉含量明显下降。叶片镉输出量与籽粒中的镉含量高度正相关, 相关系数为0.769。通径分析发现, 穗轴作用最大, 但它只是根系和叶片中营养物质进入籽粒进行积累的运输通道, 根系和叶片才是镉的储存库。因此, 叶片和根系对籽粒镉积累起主要作用。扬花期之前根系吸收的镉首先转运到地上部, 积累在叶片、叶鞘等营养器官中, 在灌浆期间根系吸收的镉和叶片中储存的镉同时通过穗轴转运到发育籽粒中。叶片中输出镉的变异系数较高, 为43.07%, 说明品种的遗传背景对叶片中镉的输出量有显著影响。

2 地上部镉含量对籽粒镉含量的影响

许多植物叶片表皮细胞及叶肉组织可以吸收空气中的多种重金属元素, 因此大气沉降也是植物体内镉来源之一(汤洁等2012; 侯佳渝等2013; 葛彦双等2013; 章明奎等2010)。通过外源喷施镉溶液来模拟大气沉降的结果表明, 喷施3次镉溶液后, 灌浆期叶片镉的输出量、叶片和籽粒中镉的积累量都显著高于其他处理。这可能是因为沉降到叶片上的镉先积累在细胞壁和细胞间隙中(于辉等2008; 王芳等2009, 2010)。但细胞壁和细胞间隙的容量有限, 当其中的镉超过一定程度后就会进入细胞膜构成的共质体系统, 一部分镉储存在细胞液或细胞器中, 另一部分在灌浆期间向籽粒中转运致使籽粒中镉含量超标。可见, 如果大气中镉借助雾气或降雨沉降到水稻叶片上, 通过叶片的吸收和转运就会增加水稻籽粒中的镉含量, 叶片中的镉积累量与水稻种植区大气污染程度有关。因此, 在稻米生产区应该重视大气环境的建设和大气污染的治理, 并避免在大气污染严重的地方种植水稻或其他粮食作物。

3 不同部位的叶片对籽粒镉含量的影响

不同部位的叶片对果实、花穗或籽粒发育所需要的营养物质的供应存在差异, 其中旗叶的贡献最高(鲁清林等2013; 杨建峰等2013)。本研究发现, 对水稻不同叶位的叶片涂抹相同量的镉溶液, 籽粒中的镉含量明显不同。与未涂抹的对照组相比, 涂抹旗叶后籽粒中镉增加量最明显, 随叶位的

下降籽粒中镉的增加量也随之减少,说明灌浆期间,旗叶不仅为籽粒提供大量的碳水化合物,同时也会将其中积累的镉高效转运到籽粒中,倒二叶和倒三叶对籽粒中镉的积累影响较小。

参考文献

- 陈新红,叶玉秀,潘国庆,赵步洪,杨建昌(2014). 杂交水稻不同器官重金属铅浓度与累积量. 中国水稻科学, 28 (1): 57~64
- 杜家菊,陈志伟(2010). 使用SPSS线性回归实现通径分析的方法. 生物学通报, 45 (2): 4~6
- 杜鹃(2012). 通径分析在Excel和SPSS中的实现. 陕西气象, (1): 15~18
- 杜丽娜,李军,彭义,孙岩,周雨薇(2012). 不同水稻品种中镉及微量元素含量的差异分析. 沈阳农业大学学报, 43 (2): 229~232
- 杜英秋,程国友,马永华,廖辉,苏萍(2009). 微波消解与ICP-MS联用测定水稻不同器官中镉含量的研究. 黑龙江农业科学, (5): 102~104
- 范中亮,季辉,杨菲,吴琦,张卫建(2010). 不同土壤类型下杂交籼稻地上部器官对重金属镉和铅的富集特征. 中国水稻科学, 24 (2): 183~188
- 葛彦双,曹弈璘,曾春菡,李志强,王丽(2013). 地面苔藓对成都大气沉降重金属污染的监测. 生态环境学报, 22 (5): 844~850
- 贺慧,陈灿,郑华斌,刘建霞,姚林,黄璜(2014). 不同基因型水稻镉吸收差异及镉对水稻的影响研究进展. 作物研究, 28 (2): 211~215
- 侯佳渝,刘金成,曹淑萍,程绪江,张亚娜,王卫星(2013). 天津市城区大气干湿沉降地球化学研究. 地质调查与研究, 36 (2): 131~135
- 居学海,张长波,宋正国,韩立娜,陆仲烟,王景安,刘仲齐(2014). 水稻籽粒发育过程中各器官镉积累量的变化及其与基因型和土壤镉水平的关系. 植物生理学报, 50 (5): 634~640
- 李玉清,周雪梅,姜国辉,苏瑛,于东洋(2012). 含镉水灌溉对水稻产量和品质的影响. 灌溉排水学报, 31 (4): 120~123
- 林丽仙,张庆美,黄飏,柯合作,李惠华,郑明琼(2013). 土壤pH测定影响因素探讨及蓝莓种植园土壤pH值的测定. 福建热作科技, 38 (4): 22~26
- 鲁清林,柴玉玺,张礼军,周刚(2013). 冬小麦叶片和非叶器官对粒重的贡献. 草业学报, 22 (5): 165~174
- 牛玉璐,曹永胜(2010). 大气主要污染物对植物叶形态结构的影响. 生物学教学, 35 (12): 7~8
- 彭华,戴金鹏,纪雄辉,刘昭兵,黄科延(2013). 稻田土壤与稻米中的镉含量关系初探. 湖南农业科学, (7): 68~72
- 孙聪,陈世宝,宋文恩,李宁(2014). 不同品种水稻对土壤中镉的富集特征及敏感性分布(SSD). 中国农业科学, 47 (12): 2384~2394
- 汤洁,李娜,李海毅,卞建民,李昭阳,崔玉军(2012). 大庆市大气干湿沉降重金属元素通量及来源. 吉林大学学报(地球科学版), 42 (2): 507~513
- 唐非,雷鸣,唐贞,杨仁斌,宋正国,唐世荣,彭莎,廖海玉(2013). 不同水稻品种对镉的积累及其动态分布. 农业环境科学学报, 32 (6): 1092~1098
- 王芳,丁杉,张春华,葛滢(2010). 不同镉耐性水稻非蛋白巯基及镉的亚细胞和分子分布. 农业环境科学学报, 29 (4): 625~629
- 王芳,杨勇,张燕,李花粉(2009). 不同蔬菜对镉的吸收累积及亚细胞分布. 农业环境科学学报, 28 (1): 44~48
- 王阳,李宝刚,章明奎(2011). 大气沉降对茶叶重金属积累的影响. 科技导报, 29 (21): 55~59
- 王永强,肖立中,李诗殷,李伯威,蔡信德(2010). 镉对水稻的毒害效应及其调控措施研究进展. 中国农学通报, 26 (3): 99~104
- 杨成,罗绪强,王娅,贺华中,黄亮(2012). 大气污染影响下凯里植物、土壤氟含量特征. 中国农学通报, 28 (19): 76~79
- 杨建峰,邬华松,郝朝运,祖超,李志刚,郑维全,谭乐和,鱼欢,孙燕(2013). 胡椒花穗发育过程中不同功能叶营养物质动态变化规律的研究. 热带农业科学, 33 (2): 13~16, 21
- 姚春馨,隆四清,和立忠,许明辉(2007). 水稻镉积累基因型差异及其对镉胁迫的反应. 湖南农业大学学报(自然科学版), 33 (S1): 37~41
- 于辉,杨中艺,杨知建,向佐湘(2008). 不同类型镉积累水稻细胞镉化学形态及亚细胞和分子分布. 应用生态学报, 19 (10): 2221~2226
- 张路,张锡洲,李廷轩,余海英,戢林(2014). 镉胁迫对水稻亲本材料Cd吸收分配的影响. 农业环境科学学报, 33 (12): 2288~2295
- 张燕,廖超英(2008). 大棚中土壤和番茄中Cd含量及其生物有效性. 西北农业学报, 17 (3): 246~249, 253
- 章明奎,刘兆云,周翠(2010). 铅锌矿区附近大气沉降对蔬菜中重金属积累的影响. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 36 (2): 221~229
- 周影,李国琛,张红,王颜红,崔杰华,王世成(2012). 土壤和大气铅对玉米植株体内铅积累的影响和贡献率. 生态学杂志, 31 (9): 2299~2304
- 邹继颖,刘辉,祝惠,吴文龙,荣洪刚(2012). 重金属汞镉污染对水稻生长发育的影响. 土壤与作物, 1 (4): 227~232
- Hong J, Peralta-Videa JR, Rico C, Sahi S, Viveros MN, Bartonjo J, Zhao LJ, Gardea-Torresdey JL (2014). Evidence of translocation and physiological impacts of foliar applied CeO₂ nanoparticles on cucumber (*Cucumis sativus*) plants. Environ Sci Technol, 48 (8): 4376~4385
- Ueno D, Yamaji N, Kono I, Huang CF, Ando T, Yano M, Ma JF (2010). Gene limiting cadmium accumulation in rice. Proc Natl Acad Sci USA, 107 (38): 16500~16505
- Uraguchi S, Fujiwara T (2013). Rice breaks ground for cadmium-free cereals. Curr Opin Plant Biol, 16 (3): 328~334