

韩潇潇,任兴华,王培培,等.叶面喷施锌离子对水稻各器官镉积累特性的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(8): 1809–1817.

HAN Xiao-xiao, REN Xing-hua, WANG Pei-pei, et al. Effects of foliar application with zinc on the characteristics of cadmium accumulation in organs of rice plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1809–1817.

叶面喷施锌离子对水稻各器官镉积累特性的影响

韩潇潇¹,任兴华²,王培培¹,黄永春¹,张长波¹,刘仲齐^{1*}

(1.农业农村部环境保护科研监测所,天津 300191; 2.湖南省湘潭市农业科学研究所,湖南 湘潭 411134)

摘要:为了探讨锌离子对稻米镉(Cd)积累特性的影响,在水稻开花期喷施不同浓度的ZnSO₄,对成熟期水稻各器官的Cd含量及其他必需元素的变化进行了分析。研究结果表明:在相同的Cd污染农田中,不同处理间晚稻各器官中的Cd含量明显高于早稻。与对照相比,叶面喷施5 mmol·L⁻¹和10 mmol·L⁻¹ ZnSO₄能够显著降低晚稻和早稻籽粒和穗轴以及穗下节中的Cd含量,籽粒中的Cd含量和穗下节以及倒二节中的Cd含量还呈极显著正相关。此外,无论是对照还是各处理小区,晚稻和早稻穗下节中的Cd含量是穗轴和旗叶Cd含量的10倍左右,倒二节Cd含量是倒二节间中Cd含量的3倍左右。与此同时,喷施5 mmol·L⁻¹和10 mmol·L⁻¹的ZnSO₄使晚稻籽粒中的Zn含量分别增加13.81%和44.60%,早稻籽粒中的Zn含量分别增加39.02%和47.88%,但对籽粒中的Mg含量无显著影响。此外,喷施10 mmol·L⁻¹的ZnSO₄显著降低了早稻和晚稻籽粒中的K、Ca、Mn含量。由此可见,叶面喷施ZnSO₄主要通过提高Zn向籽粒的转运效率来抑制Cd由营养器官向穗轴及籽粒的转运,从而产生降Cd增Zn的明显效果。

关键词:水稻;镉;锌;营养元素;叶面喷施

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)08-1809-09 doi:10.11654/jaes.2018-1528

Effects of foliar application with zinc on the characteristics of cadmium accumulation in organs of rice plants

HAN Xiao-xiao¹, REN Xing-hua², WANG Pei-pei¹, HUANG Yong-chun¹, ZHANG Chang-bo¹, LIU Zhong-qi^{1*}

(1.Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2.Xiangtan City Agricultural Science Research Institute, Xiangtan 411134, China)

Abstract: In order to explore the effects of ZnSO₄ on the accumulation of cadmium in different organs of rice plants, different concentrations of zinc were sprayed during the anthesis period and quantities of cadmium as well as other essential elements in the organs were analyzed. Experimental results showed that when plants were grown in the same Cd-contaminated farmland, the cadmium content in different organs of late rice in different treatments was significantly higher than that in early rice. Compared with the control, foliar application with 5 mmol·L⁻¹ and 10 mmol·L⁻¹ ZnSO₄ was found to significantly reduce cadmium in grains and rachises and in the uppermost nodes of late rice and early rice. Grain Cd was significantly and positively correlated with Cd content in the uppermost nodes and in the second nodes. Furthermore, irrespective of the control plot or the treatment plot and regardless of late rice or early rice, the concentration of Cd in uppermost nodes was approximately 10 times higher than that in rachises and flag leaves, and the concentration of Cd in the second nodes was approximately three times higher than that in the second internodes. The results showed that Zn concentrations in grains of late rice increased by 13.81% and 44.60%, and in grains of early rice increased by 39.02% and 47.88% respectively, after spraying with 5 mmol·L⁻¹ and 10 mmol·L⁻¹ of zinc. The concentration of K in grains and rachises decreased in late rice and early rice and foliar application with ZnSO₄ did not have a significant effect on the concentration of Mg in grains. Spraying with 10 mmol·L⁻¹ of zinc significantly reduced levels of K, Ca and Mn in grains of late rice and early rice. These results indicate that foliar application with different concentrations of zinc is able to efficiently increase Zn level and decrease Cd quantity in grains by promoting Zn allocation and inhibiting Cd transport from vegetative organs to grains.

Keywords: rice; cadmium; zinc; nutrient elements; foliar application

收稿日期:2018-12-06 录用日期:2019-02-22

作者简介:韩潇潇(1992—),女,河北廊坊人,硕士研究生,主要从事植物营养生理研究。E-mail:445884965@qq.com

*通信作者:刘仲齐 E-mail:liuzhongqi508@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0801100);中国农科院科技创新工程项目(CAAS-XTCX2016018)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2017YFD0801100); Funds for Science and Technology Innovation Project from the Chinese Academy of Agricultural Sciences(CAAS-XTCX2016018)

湖南被称为“有色金属之乡”,矿产资源在开采过程中排出的废气和废水,能通过大气沉降和灌溉过程进入到农田中,日积月累,使农田中的镉(Cd)含量越来越高^[1-2]。由于Cd的生物活性比较强,能被水稻等作物吸收富集,所以很容易通过食物链进入人体,从而对人体健康造成威胁^[3]。

叶面喷施微量元素不仅能够促进水稻籽粒对微量元素的积累,还能降低各部分的Cd含量^[4-5]。锌(Zn)作为植物生长所必需的微量元素,在植物的生长发育过程中不仅能促进作物的生长发育,还参与了碳水化合物的代谢、蛋白质的代谢以及叶绿素的合成等过程^[6]。Cd²⁺与Zn²⁺作为二价阳离子,化学性质比较相似,其在植物体内的吸收和积累存在一定的相互作用^[7]。有研究表明,在水稻叶面喷施ZnSO₄能够提高水稻叶面的光合作用、缓解Cd对植物的生理毒害^[8],甚至降低籽粒对Cd的积累^[9-10];喷施Zn还能提高籽粒中的Zn含量,改善人体缺Zn的状况^[11-12]。

水培试验和盆栽试验结果表明,Zn对水稻Cd的吸收转运具有明显的调节作用,营养液中添加氯化锌、叶面喷施Zn肥或者在Cd污染土壤中施加Zn肥都能够降低水稻的Cd含量^[7,13-16]。田间施用锌肥或土壤钝化剂中配施ZnSO₄肥料,能有效降低小麦、豇豆和烟草等作物对Cd的吸收^[17-19]。叶面喷施Zn肥对水稻籽粒中的Cd含量也有明显的抑制效果^[20]。但在田间自然条件下,叶面喷施ZnSO₄是否能够对不同类型水稻地上部多个器官的Cd积累特性以及其他必需元素的含量产生影响,尚缺乏系统的研究。因此,本研究以Cd污染农田中种植的早稻和晚稻为材料,通过在水稻开花期叶面喷施不同浓度的ZnSO₄,对其降Cd效果及其在早稻和晚稻间的差异进行了比较,以期为降Cd富Zn叶面肥的研发提供参考。

1 材料和方法

1.1 供试土壤和作物

在湖南省湘潭市重金属污染农田(28°42'N, 112°51'E),分别以早稻品种中早35和晚稻品种华占为试验材料进行叶面喷施试验。供试土壤为红壤性水稻土,表层土壤(0~20 cm)的基本理化性质为:pH 5.5,有机质含量41.54 g·kg⁻¹,阳离子交换量(CEC)为19.55 cmol·kg⁻¹,土壤Cd含量为0.69 mg·kg⁻¹。湘潭属中亚热带季风湿润气候区,降水量较充沛,早稻和晚稻分别在三月份和七月份进行播种,六月中旬和九月中旬分别进入抽穗开花期。当地田间施肥方法依照

水稻的测土配方施肥技术,其中每667 m²施用的氮磷钾肥总量分别为:尿素27 kg、普钙40 kg、氯化钾15 kg,整个生育期各处理无明显病虫害发生,采用化学除草剂去除杂草。

1.2 试验设计与处理

试验采用顺序排列,每个小区面积为5.00 m²,长为2.50 m,宽为2.00 m。设置试验为1个对照组(CK)和2个处理组,处理组1喷施1 L浓度为5 mmol·L⁻¹ ZnSO₄,处理组2喷施1 L浓度为10 mmol·L⁻¹ ZnSO₄,每个处理组设置3个重复。水稻开花期后,分别将配制好的5 mmol·L⁻¹和10 mmol·L⁻¹的ZnSO₄溶液倒入容积为1 L的手持式喷壶中,调整喷壶使其喷出雾状水雾,进而将ZnSO₄均匀地喷施在水稻叶面上,对照组喷施1 L自来水(CK)。待水稻成熟后,采集不带根系的水稻植株。水稻自然晾干后,将水稻植株分为籽粒、穗轴、旗叶、穗下节间、穗下节、倒二节、倒二节间、倒二叶共八部分,放入烘箱在70 °C的条件下烘干。

1.3 水稻各部位Cd含量和其他必需元素含量的测定

参照Liu等^[21]的方法,称取0.5 g植株样品放入消煮管中,加入7 mL的HNO₃浸泡过夜,110 °C消煮2.5 h,加入1 mL 30%H₂O₂之后继续110 °C煮1.5 h,之后升温赶酸定容。使用ICP-MS(Agilent 7500a, USA)测定土壤和植物各器官中的Cd、K、Ca、Mg、Fe、Mn和Zn的元素含量。

1.4 数据的处理和分析

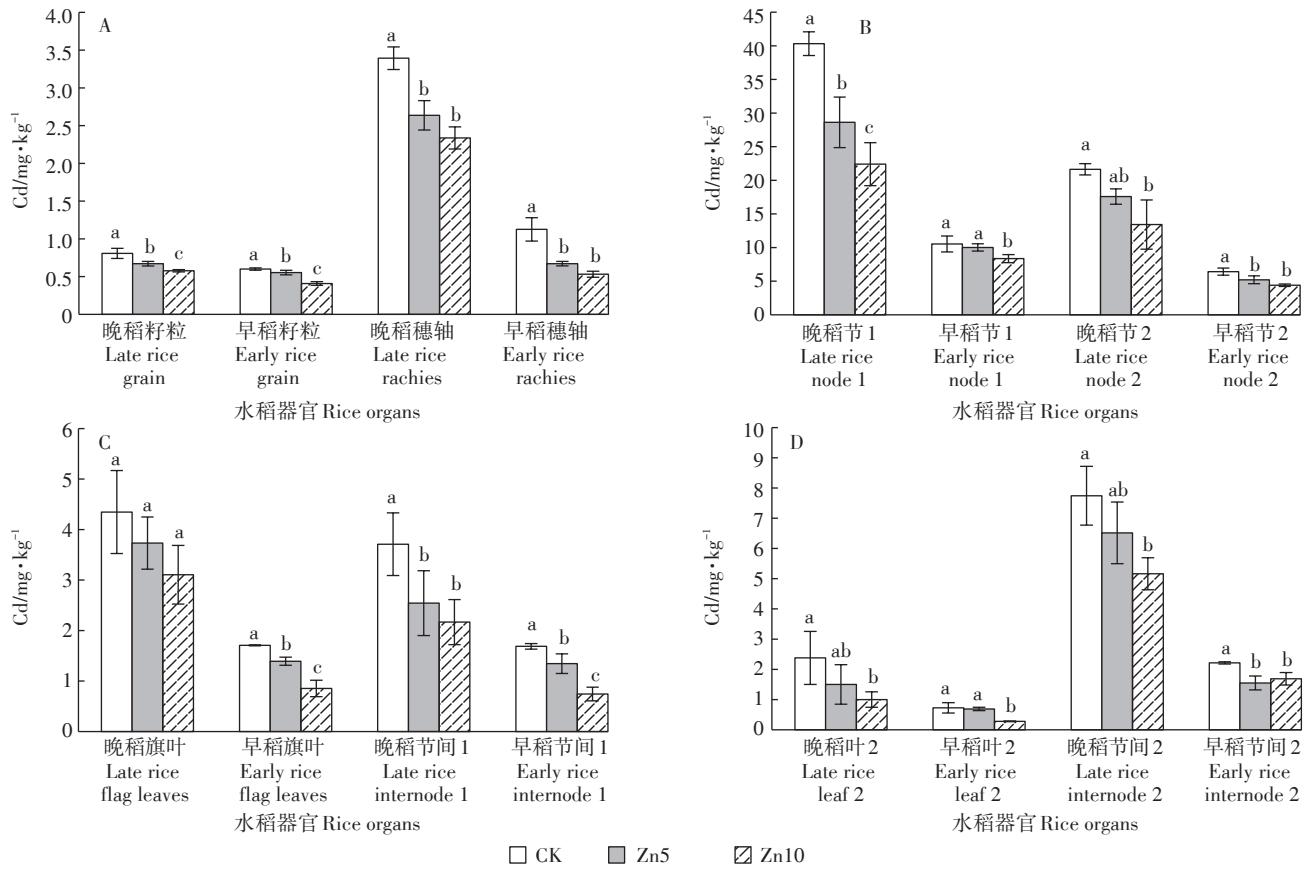
采用Excel和SPSS 19.0软件进行试验数据的处理以及显著性分析,并用Origin 8.0软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 ZnSO₄对水稻各器官Cd含量的影响

Cd含量在早稻和晚稻之间以及水稻各器官间存在明显的差异,晚稻各部分的Cd含量明显高于早稻,穗轴中的Cd含量明显高于籽粒中的Cd含量(图1A);穗下节和倒二节中富含大量的Cd(图1B)。晚稻和早稻各处理穗下节中的Cd含量是旗叶和穗下节间中Cd含量的10倍左右,倒二节中的Cd含量是倒二节间中Cd含量的3倍左右(图1C、图1D)。

开花期叶面喷施5 mmol·L⁻¹和10 mmol·L⁻¹的ZnSO₄,使成熟期籽粒、穗轴、旗叶、穗下节间、穗下节、倒二节间、倒二节中的Cd含量显著下降,且随着Zn浓度的增加其降Cd效果更为明显。与对照相比,喷施5 mmol·L⁻¹和10 mmol·L⁻¹的ZnSO₄使晚稻籽粒Cd



节1和节2分别代表穗下节和倒二节;节间1和节间2分别代表穗下节间和倒二节间;叶2代表倒二叶;

不同字母表示处理间差异达到5%显著水平($n=3$)。下同

Node 1 and node 2 represent the uppermost nodes and second nodes; internode 1 and internode 2 represent the uppermost internodes and second internodes; leaf 2 represents the second leaves; Different letters indicate significant difference among different treatments at 5% level($n=3$)。The same below

图1 ZnSO_4 浓度(Zn5和Zn10)对晚稻和早稻不同器官中Cd含量的影响

Figure 1 Effects of ZnSO_4 (Zn5 and Zn10) on Cd concentrations in different organs of late rice and early rice

含量分别下降16.93%和28.52%,穗轴Cd含量分别下降22.30%和31.14%;使早稻籽粒Cd含量分别下降7.81%和32.00%,穗轴中的Cd含量分别下降40.34%和52.79%。此外,与对照相比,喷施5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 ZnSO_4 明显抑制了早稻穗下节中Cd向穗下节间的转运,喷施10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 ZnSO_4 抑制了晚稻穗轴中的Cd向籽粒的转运,以及抑制了早稻旗叶中的Cd向穗轴的转运。

2.2 水稻不同器官Cd含量的相关性分析

由表1可以看出,湘潭晚稻籽粒Cd含量和穗轴Cd含量、穗下节间Cd含量、倒二节间Cd含量呈极显著($P<0.01$)正相关;穗轴和穗下节间、穗下节Cd含量呈显著($P<0.05$)正相关;穗下节间和穗下节、倒二节间Cd含量呈极显著($P<0.01$)正相关(表1);穗下节和倒二节间、倒二节呈极显著($P<0.01$)正相关,倒二节间和倒二节呈极显著($P<0.01$)正相关,其他器官之间

其Cd含量并没有表现出明显的相关性。

早稻籽粒Cd含量和穗轴、旗叶、穗下节、穗下节、倒二叶、倒二节都呈极显著($P<0.01$)正相关;穗轴Cd含量与旗叶和穗下节间Cd含量呈极显著($P<0.01$)正相关,相关系数分别为0.843**、0.809** (表1);旗叶和穗下节间、倒二叶、倒二节呈极显著($P<0.01$)正相关;穗下节间Cd含量和穗下节、倒二叶、倒二节Cd含量呈极显著($P<0.01$)正相关;此外,除穗轴外,其余各部分Cd含量与倒二节间中Cd含量并没有表现出明显的相关性,这表明籽粒对Cd的吸收积累与穗轴以及穗下节间和穗下节关系密切。

2.3 Zn离子对水稻籽粒和穗轴其他必需元素含量的影响

K是水稻各部位中含量最丰富的离子,晚稻穗轴K含量明显高于籽粒,这说明只有一小部分K转移到了籽粒中,叶面喷施 ZnSO_4 使籽粒和穗轴中的K含量

略有降低。Mg是稻米中第二大丰富的元素,叶面喷施 $ZnSO_4$ 使晚稻穗轴中的Mg含量略有增加,但对早稻和晚稻籽粒中的Mg含量无显著影响。籽粒和穗轴中的Ca和Mn元素含量都随着Zn的喷施而降低,喷施 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Zn能显著降低稻米中的Ca和Mn含量。喷施 $ZnSO_4$ 增加了籽粒和穗轴中的Fe元素含量,并显著提升了籽粒中的Zn含量,喷施 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Zn肥使晚稻籽粒中的Zn含量分别增加13.81%和44.60%(表2)。

对于早稻而言,籽粒中的K含量高于晚稻籽粒,

而穗轴中K元素含量明显低于晚稻穗轴中的K含量,其他元素早稻和晚稻差距不大。喷施 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $ZnSO_4$ 使籽粒和穗轴中的Mg、Ca、Mn、Fe略有下降,但是籽粒Mg、Mn、Fe差异未达到显著水平,穗轴的Ca和Fe未达到显著水平。喷施 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $ZnSO_4$ 使籽粒K、Ca和Mn的含量显著下降。喷施 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的锌肥使早稻籽粒中的Zn含量分别增加39.02%、47.88%,穗轴中的Zn含量分别增加26.93%和105.00%。

Mn、Zn两种元素在水稻各器官中呈现出不同的

表1 晚稻和早稻不同器官中Cd含量的相关性

Table 1 Correlation between Cd concentrations in different organs of late rice and early rice

	穗轴 Rachises	旗叶 Flag leaves	穗下节间 Internodes 1	穗下节 Node 1	倒二叶 Second leaves	倒二节间 Internodes 2	倒二节 Node 2
晚稻籽粒	0.904**	0.557	0.856**	0.761*	0.333	0.899**	0.614
早稻籽粒	0.813**	0.912**	0.982**	0.803**	0.932**	0.551	0.863**
晚稻穗轴		0.218	0.758*	0.716*	0.533	0.781*	0.543
早稻穗轴		0.843**	0.809**	0.688*	0.738*	0.771*	0.789*
晚稻旗叶			0.442	0.356	-0.078	0.541	0.386
早稻旗叶			0.900**	0.685*	0.816**	0.492	0.826**
晚稻穗下节间				0.896**	0.266	0.874**	0.785*
早稻穗下节间				0.798**	0.856**	0.650	0.940**
晚稻穗下节					0.330	0.848**	0.921**
早稻穗下节					0.694*	0.490	0.708*
晚稻倒二叶						0.025	0.034
早稻倒二叶						0.349	0.659
晚稻倒二节间							0.832**
早稻倒二节间							0.796*

注:**表示在0.01水平上显著;*表示在0.05水平上显著。下同。

Note:** is significant at 0.01 level and * is significant at 0.05 level. The same below.

表2 $ZnSO_4$ (Zn5和Zn10)对晚稻和早稻籽粒及穗轴K、Mg、Ca、Mn、Fe、Zn含量的影响

Table 2 Effects of $ZnSO_4$ (Zn5 and Zn10) on concentrations of K, Mg, Ca, Mn, Fe, Zn in grains and rachises of late rice and early rice

器官 Organs	处理 Treatments	$\text{K/g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\text{Mg/g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\text{Ca/g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\text{Mn/mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\text{Fe/mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\text{Zn/mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
晚稻籽粒	CK	2.98±0.11a	0.95±0.04a	0.28±0.01a	123±10.00a	7.0±1.00a	28.3±1.25c
	Zn5	2.82±0.15ab	0.93±0.02a	0.26±0.02ab	112±5.03ab	8.3±0.58a	32.2±1.65b
	Zn10	2.68±0.04b	0.88±0.05a	0.25±0.01b	109±4.93b	8.0±1.00a	40.9±1.15a
晚稻穗轴	CK	25.37±0.45a	1.11±0.03a	1.54±0.11a	636±80.47a	92.0±2.00b	340.2±15.1a
	Zn5	20.56±1.53b	1.27±0.12a	1.31±0.08b	550±17.69ab	117.3±3.21a	290.8±3.5b
	Zn10	21.56±1.81b	1.17±0.08a	1.41±0.05ab	486±19.35b	98.0±11.53b	210.3±6.6c
早稻籽粒	CK	5.23±0.02ab	1.31±0.05a	0.42±0.01a	109±2.28a	13.3±4.16a	29.4±0.15b
	Zn5	5.45±0.05a	1.21±0.04a	0.36±0.02b	107±5.00a	8.6±0.23a	40.8±2.00ab
	Zn10	5.18±0.19b	1.24±0.08a	0.36±0.02b	84.8±1.17b	9.0±1.07a	43.4±1.26a
早稻穗轴	CK	7.56±0.04a	0.91±0.06a	0.82±0.06a	291±1.01a	85.2±0.01a	106.5±4.62c
	Zn5	6.61±0.09b	0.83±0.01b	0.83±0.01a	234±9.71b	84.4±2.97a	135.2±2.62b
	Zn10	5.08±0.47c	0.94±0.06a	0.75±0.05b	229±14.28b	89.4±8.37a	218.7±18.63a

分布特征,喷施Zn肥影响了其在水稻体内的分布。在晚稻Cd污染农田中,Mn、Zn两种元素都表现为穗下节和倒二节中含量最高,与对照相比,叶面喷施Zn肥使除旗叶和倒二叶外的其他部分的Mn含量呈现降低的趋势(表3),同时各部分Cd和Mn表现为正相关。Zn在籽粒、旗叶、穗下节、倒二叶、倒二节中的含量都随着Zn含量的增加呈增加的趋势。K元素表现为穗下节间和倒二节间含量最高,为50~72 g·kg⁻¹(图2A),其余各器官中K元素在不同处理间差异不显著。Ca和Fe元素都是在旗叶和倒二叶中的含量比较高(图2B、图2D),但是各器官中Ca、Fe和Mg元素也

没有随着处理的变化产生明显的差异性。

在早稻中,Mn元素在倒二叶和倒二节中的含量比较高,其次是旗叶和穗下节中含量。Zn元素同晚稻一致,表现为穗下节和倒二节中含量最高,在籽粒、穗轴、旗叶中的含量都随着Zn含量的增加呈增加的趋势(表4)。K元素同样表现为穗下节间和倒二节间中的含量最高,为39~62 g·kg⁻¹(图3A),并且随着Zn浓度的增加呈现增加的趋势,其余各器官中K元素在不同处理间并没有表现出明显的差异性。Ca元素与晚稻趋势一致,表现为旗叶和倒二叶中含量最高(图3B),但是各器官中Ca和Mg元素也没有随着处理的

表3 ZnSO₄(Zn5和Zn10)对晚稻各器官Mn和Zn分布的影响

Table 3 Effects of ZnSO₄(Zn5 and Zn10) on Mn and Zn concentrations in different organs of late rice

器官 Organs	晚稻 Mn Late rice Mn/g·kg ⁻¹			晚稻 Zn Late rice Zn/mg·kg ⁻¹		
	CK	Zn5	Zn10	CK	Zn5	Zn10
籽粒	0.12±0.01a	0.11±0.01a	0.11±0.01a	28.26±1.25c	32.16±1.65b	40.86±1.15a
穗轴	0.64±0.08a	0.55±0.02ab	0.49±0.02b	3.37±0.15a	2.90±0.30b	2.13±0.06c
旗叶	0.28±0.10a	0.34±0.09a	0.30±0.01a	169.53±26.95b	257.60±10.00a	275.27±19.45a
穗下节间	0.42±0.03a	0.37±0.04a	0.35±0.04a	96.50±0.50a	103.60±13.88a	94.50±0.50a
穗下节	1.29±0.08a	1.20±0.20a	1.05±0.13a	751.10±22.90a	787.67±35.55a	819.60±53.60a
倒二叶	0.17±0.02a	0.22±0.03a	0.21±0.07a	139.30±5.90b	171.57±7.75ab	181.50±30.90a
倒二节间	0.67±0.09a	0.54±0.02b	0.47±0.03b	110.33±5.55a	98.17±18.34a	101.20±1.00a
倒二节	1.53±0.13a	1.39±0.04a	1.11±0.20b	731.63±42.39a	709.93±19.65a	764.30±12.40a

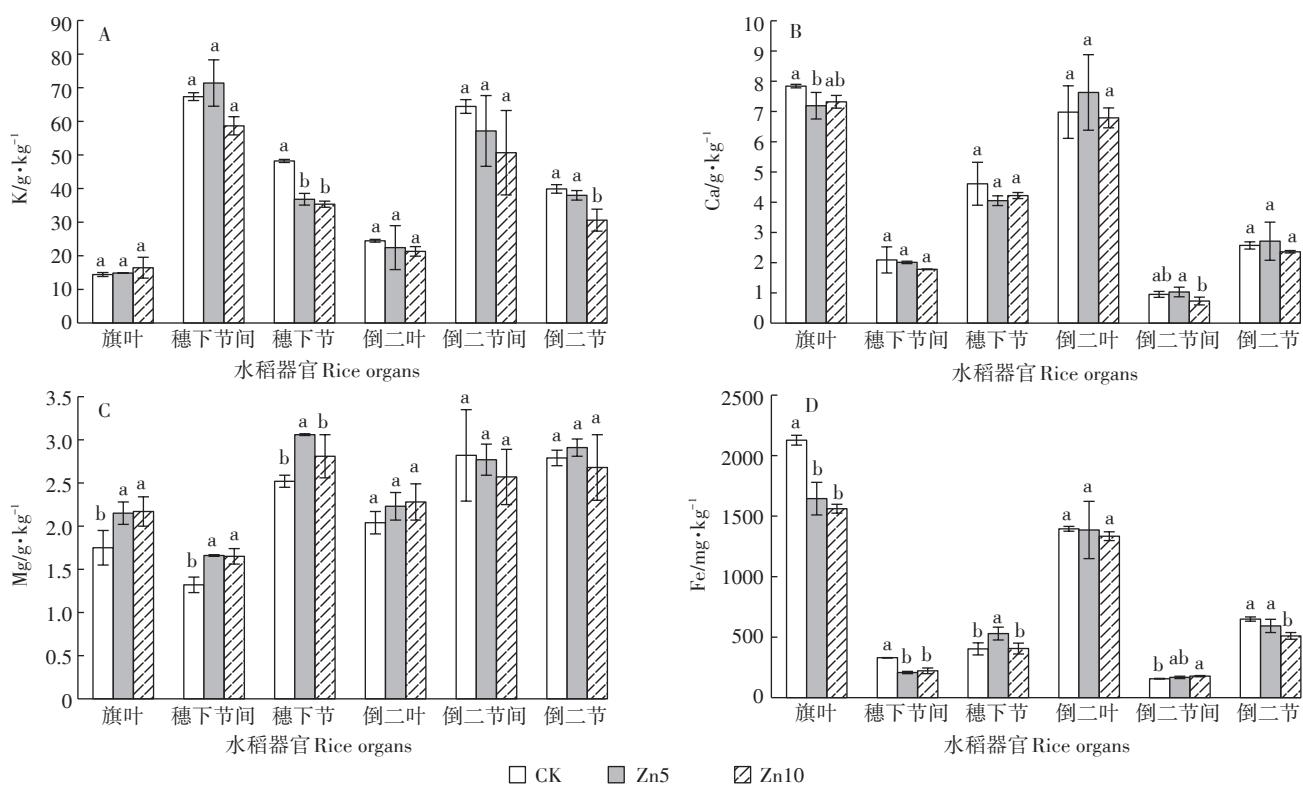


图2 喷施ZnSO₄(Zn5和Zn10)对晚稻各器官中K、Ca、Mg和Fe分布的影响

Figure 2 Effects of ZnSO₄(Zn5 and Zn10) on the distribution of K, Ca, Mg and Fe in different organs of late rice

表4 ZnSO₄(Zn5和Zn10)对早稻各器官Mn和Zn分布的影响Table 4 Effects of ZnSO₄(Zn5 and Zn10) on Mn and Zn concentrations in different organs of early rice

器官 Organs	早稻 Mn Early rice Mn/g·kg ⁻¹			早稻 Zn Early rice Zn/mg·kg ⁻¹		
	CK	Zn5	Zn10	CK	Zn5	Zn10
籽粒	0.11±0.01a	0.11±0.01a	0.08±0.01b	29.35±0.15b	41.00±2.00ab	43.39±11.26a
穗轴	0.29±0.01a	0.23±0.09b	0.23±0.01b	107.83±4.62c	135.18±2.62b	218.72±18.63a
旗叶	1.29±0.06a	1.12±0.04b	1.18±0.10ab	105.81±8.59b	184.71±6.43a	109.54±3.25b
穗下节间	0.19±0.01c	0.32±0.01a	0.29±0.02b	80.67±6.51b	95.00±1.00a	91.00±1.00a
穗下节	1.23±0.02b	1.65±0.18a	1.19±0.04b	425.33±0.58a	473.67±69.50a	444.00±9.00a
倒二叶	1.50±0.06a	1.50±0.18a	1.34±0.05a	59.70±0.31c	124.32±5.99a	97.48±11.97b
倒二节间	0.43±0.03c	0.50±0.01b	0.71±0.01a	73.59±3.72a	95.74±20.46a	74.48±0.65a
倒二节	1.45±0.05a	1.42±0.16a	1.22±0.01b	552.33±19.50a	495.00±51.00ab	435.33±15.50b

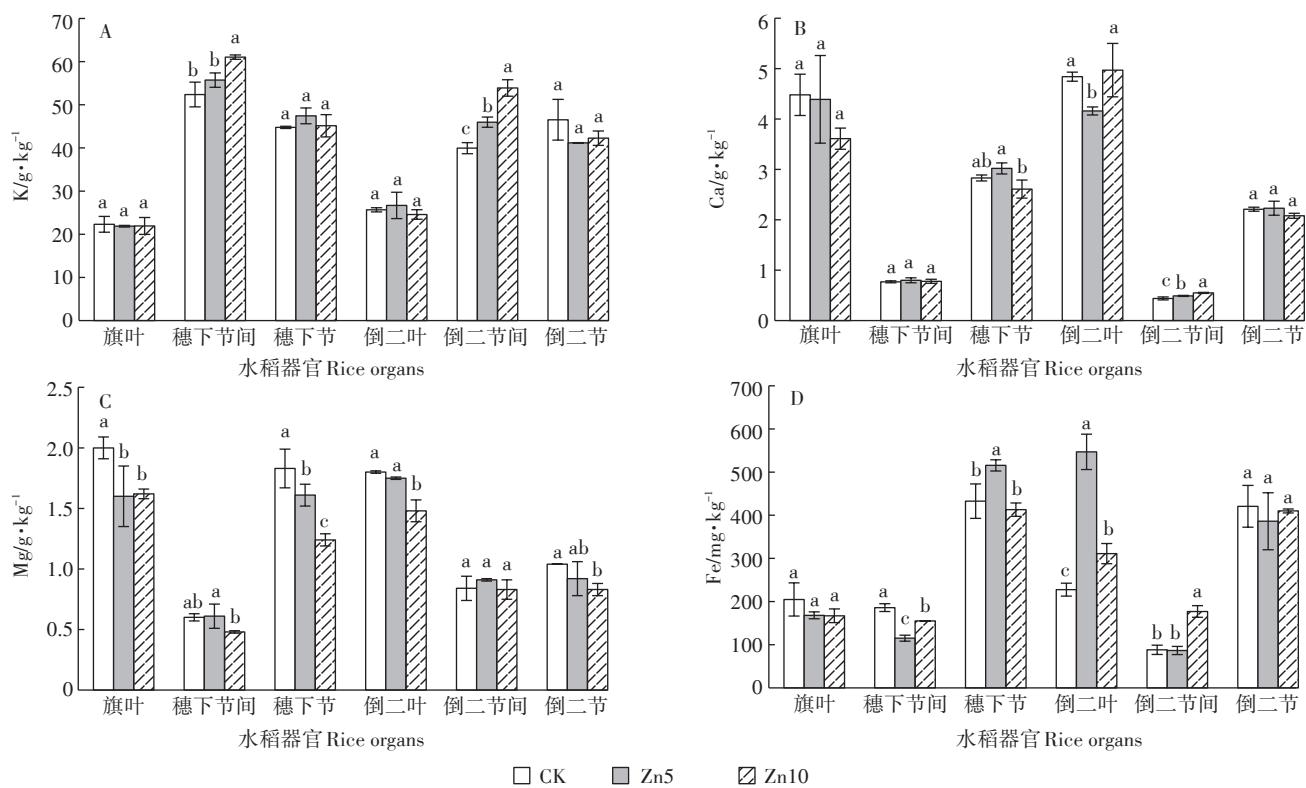
图3 ZnSO₄(Zn5和Zn10)对早稻各器官中K、Ca、Mg和Fe分布的影响Figure 3 Effects of ZnSO₄(Zn5 and Zn10) on the distribution of K, Ca, Mg and Fe in different organs of early rice

表5 早稻和晚稻籽粒中Cd含量与其他元素含量的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between Cd content of other elements in rice grains

	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn
晚稻 Cd	0.881**	0.616	0.708*	-0.541	0.496	-0.833**
早稻 Cd	0.339	0.63	0.134	0.389	0.908**	-0.786*

变化产生明显的差异性。

早稻和晚稻籽粒中的Cd元素与其他元素间的相关性不同(表5)。晚稻籽粒中的Fe元素与籽粒中的

Cd呈负相关,但不显著;Zn与Cd呈极显著负相关,其相关系数为-0.833**;K和Mg与Cd呈显著正相关,Mn与Cd呈正相关,但是相关性不显著。早稻籽粒中的Mn与Cd呈极显著正相关,相关系数为0.908**,籽粒中的Zn与Cd呈负相关,其他各元素与Cd的相关性不显著。

3 讨论

水稻籽粒中的Cd含量通常与土壤中有效态Cd

含量呈正相关,然而,降雨量对土壤中有效态Cd含量有显著影响^[22~23]。本研究发现,晚稻各器官的Cd含量明显高于早稻,这可能是由于湖南地处亚热带季风气候区,年平均降水量在1500 mm左右,一半以上的降水量集中在3月到7月之间。早稻根系土壤周围的Cd离子在降水量较高时可能更容易沉降到深层土壤中^[24~25],同时,降水量的增加还会降低植物的蒸腾作用,减少通过蒸腾拉力向旗叶和穗部转运的Cd离子数量,从而减少了早稻籽粒中Cd的积累。相反,晚稻灌浆期间气候干燥,蒸腾作用比较强,这可能会促进Cd由土壤深层向地上部的转运^[26~28]。因此,灌浆期间降水量的差异可能是致使晚稻和早稻之间各部位中Cd含量不同的主要环境因素。

水稻在其成熟的过程中,存储于各营养器官中的部分营养元素会被迁移转运到籽粒中^[29~30]。穗下节和倒二节对Cd从木质部到韧皮部的转运起主要的调节作用^[31],节中的转运蛋白对某些矿质营养元素的转运也起着重要的调节作用^[32~34]。穗轴是连接水稻茎秆和籽粒的部位,根系和叶片中的营养元素都会通过穗轴转运到籽粒中,水稻籽粒中的Cd含量与穗轴中的Cd含量呈极显著正相关^[14]。本试验发现,籽粒中的Cd含量与穗轴、节以及节间中的Cd含量相关性比较高,通过穗下节的固定,穗下节间、旗叶和穗轴中的Cd含量明显降低。此外,无论是雨水充沛的早稻灌浆期,还是秋高气爽的晚稻灌浆期,开花期喷施Zn离子后,都能显著降低稻米中的Cd含量。这可能是由于Zn与Cd为同族元素,它们的化学性质相似,当Zn²⁺与Cd²⁺同时竞争相同的转运蛋白时,膜蛋白会优先结合水稻生长发育所必需的Zn²⁺,从而抑制了Cd²⁺从旗叶向穗轴和籽粒的转运。此外,喷施Zn还可能抑制了水稻的蒸腾作用,从而对Cd的吸收、运输和再分配产生影响^[20,35~36];同时,细胞壁中的[Si-半纤维素-Zn]络合物能和Cd产生共沉淀,将Cd固定在节、茎秆和叶片等器官的细胞壁中,从而抑制了Cd在细胞间的转运^[37~38]。

水稻体内Cd的转运与其他营养元素的吸收转运有着密切的关系。细胞膜上的转运蛋白以及离子通道不仅能够转运多种植物所需的必需元素例如K⁺、Zn²⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Mn²⁺,还能转运一些非必需元素,如Cd²⁺^[39~40]。Cd不仅能够抑制植物的生长,还能够抑制其他必需元素的吸收积累从而造成植物细胞的死亡。本研究发现,水稻开花期喷施5~10 mmol·L⁻¹的ZnSO₄不仅增加了晚稻和早稻籽粒中的Zn含量;还增加了

晚稻籽粒和穗轴中的Fe含量,这可能是因为进入叶片的Zn加强了锌铁转运蛋白(ZIP)的活性,促进了其对Zn和Fe的亲和力,提高了其转运率^[41~42]。此外,晚稻籽粒中的Cd含量与籽粒中的K和Ca正相关,早稻籽粒中的Cd含量与Ca和Mn显著正相关,这说明大多数的Cd都能通过Mn、K、Ca离子通道或者转运通道进入水稻籽粒中,并伴随着这些元素的降低而减少。因此,叶面喷施ZnSO₄,既可以通过增加籽粒中Zn²⁺浓度,与Cd²⁺竞争离子通道,从而直接抑制Cd的吸收和转运,也可以通过影响籽粒和穗轴中其他必需元素的积累,间接地抑制水稻籽粒对Cd的吸收和积累。

4 结论

(1)晚稻籽粒和穗轴中的Cd含量都显著高于早稻,水稻开花期喷施ZnSO₄能显著降低晚稻和早稻籽粒中的Cd含量。与对照相比,喷施5 mmol·L⁻¹和10 mmol·L⁻¹的ZnSO₄使晚稻籽粒Cd含量分别下降16.93%和28.52%;使早稻籽粒Cd含量分别下降7.81%和32.00%。

(2)穗下节是Cd含量最高的地上部器官,对穗轴和籽粒中的Cd含量有显著影响。喷施5 mmol·L⁻¹和10 mmol·L⁻¹Zn能使晚稻穗下节Cd含量(40.32 mg·kg⁻¹)分别下降29.00%和44.44%,早稻穗下节Cd含量(10.53 mg·kg⁻¹)分别下降4.89%和20.66%。通过穗下节的固定,穗下节以上的节间、穗轴和籽粒中的Cd含量大幅度下降。

(3)叶面喷施ZnSO₄,既能增加籽粒中Zn²⁺浓度,也能影响籽粒和穗轴中Fe、Ca、Mn等必需元素的含量。

参考文献:

- [1] Gui Li, Fang-Ping T, Zhen-Hua L. Analysis on pollution of heavy metal in Shuikoushan Pb-Zn mining and smelting area in Hengyang[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2012, 32(7): 105~109.
- [2] 阮玉龙,李向东,黎廷宇,等.喀斯特地区农田土壤重金属污染及其对人体健康的危害[J].地球与环境,2015,43(1):92~97.
RUAN Yu-long, LI Xiang-dong, LI Ting-yu, et al. Heavy metal pollution in farmland soil and its harm to human health in karst area[J]. *Earth and Environment*, 2015, 43(1):92~97.
- [3] Kerkhove E V, Valérie Pennemans, Swennen Q. Cadmium and transport of ions and substances across cell membranes and epithelia[J]. *Bio-metals*, 2010, 23(5):823~855.
- [4] 贺前锋,李鹏祥,易凤姣,等.叶面喷施硒肥对水稻植株中镉、硒含量分布的影响[J].湖南农业科学,2016(1):37~39.

- HE Qian-feng, LI Peng-xiang, YI Feng-jiao, et al. Effects of selenium fertilizer foliage application on distribution of cadmium and selenium in rice[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2016(1):37–39.
- [5] 宋安军. 镉污染条件下叶面喷施水杨酸、镁、谷氨酸对水稻镉等元素积累的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2015.
- SONG An-jun. Effect of foliar spraying salicylic acid, magnesium and glutamic acid on the cadmium accumulation of cadmium and other elements in rice was influenced by cadmium pollution[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2015.
- [6] Ishimaru Y, Bashir K, Nishizawa N K. Zn uptake and translocation in rice plants[J]. *Rice*, 2011, 4(1):21–27.
- [7] 尹洁, 赵艳玲, 徐莜, 等. 锌对粳稻幼苗镉吸收转运特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(5):834–841.
- YIN Jie, ZHAO Yan-ling, XU You, et al. Effects of zinc supply on absorption and translocation of cadmium in rice seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(5):834–841.
- [8] 辜娇峰, 杨文弢, 周航, 等. 外源锌刺激下水稻对土壤镉的累积效应[J]. 环境科学, 2016, 37(9):3554–3561.
- GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, et al. Provoking effects of exogenous Zn on cadmium accumulation in rice[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(9):3554–3561.
- [9] Chaney R, Reeves P J, Simmons R, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks[J]. *Biometals*, 2004, 17(5):549–553.
- [10] 史静, 潘根兴, 张乃明. 镉胁迫对不同杂交水稻品种Cd/Zn吸收与积累的影响[J]. 环境科学学报, 2013, 33(10):2904–2910.
- SHI Jing, PAN Gen-xing, ZHANG Nai-ming. Effect of cadmium stress on Cd and Zn uptake and accumulation of different cultivars of hybrid rice[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(10):2904–2910.
- [11] 付力成, 王人民, 孟杰, 等. 叶面锌/铁配施对水稻产量/品质及锌铁分布的影响及其品种差异[J]. 中国农业科学, 2010, 43(24):5009–5018.
- FU Li-cheng, WANG Ren-min, MENG Jie, et al. Effect of foliar application of zinc and iron fertilizers on distribution of zinc and iron, quality and yield of rice grain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(24):5009–5018.
- [12] Brown K H, Rivera J A, Bhutta Z, et al. International zinc nutrition consultative group (IZiNCG) technical document #1. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control[J]. *Food & Nutrition Bulletin*, 2004, 25(2):99–203.
- [13] 索炎炎, 吴士文, 朱骏杰, 等. 叶面喷施锌肥对不同镉水平下水稻产量及元素含量的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2012, 38(4):449–458.
- SUO Yan-yan, WU Shi-wen, ZHU Jun-jie, et al. Effects of foliar Zn application on rice yield and element contents under different Cd levels[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2012, 38(4):449–458.
- [14] 曲荣辉, 张曦, 李合莲, 等. 不同锌水平对低剂量镉在水稻中迁移能力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4):517–523.
- QU Rong-hui, ZHANG Xi, LI He-lian, et al. Effects of zinc level on low dose cadmium transport in rice plant[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(4):517–523.
- [15] 胡坤, 喻华, 冯文强, 等. 中微量元素和有益元素对水稻生长和吸收镉的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(8):2341–2348.
- HU Kun, YU Hua, FENG Wen-qiang, et al. Effects of secondary, micro- and beneficial elements on rice growth and cadmium uptake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8):2341–2348.
- [16] 刘昭兵, 纪雄辉, 田发祥, 等. 碱性废弃物及添加锌肥对污染土壤镉生物有效性的影响及机制[J]. 环境科学, 2011, 32(4):1164–1170.
- LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, TIAN Fa-xiang, et al. Effects and mechanism of alkaline wastes application and zinc fertilizer addition on Cd bioavailability in contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2011, 32(4):1164–1170.
- [17] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, et al. Zinc effects on cadmium accumulation and partitioning in near-isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium concentration[J]. *New Phytologist*, 2005, 167(2):391–401.
- [18] 丁琼, 杨俊兴, 华璐, 等. 不同钝化剂配施硫酸锌对石灰性土壤中镉生物有效性的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2):312–317.
- DING Qiong, YANG Jun-xing, HUA Luo, et al. Effects and mechanism of alkaline wastes application and zinc fertilizer addition on Cd bioavailability in contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(2):312–317.
- [19] 曹晨亮, 王卫, 马义兵, 等. 钝化剂-锌肥降低烟草镉含量长期效果研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(3):628–636.
- CAO Chen-liang, WANG Wei, MA Yi-bing, et al. Effects of long-term amendment with passivant and zinc fertilizer on cadmium reduction in tobacco growing in a Cd contaminated field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3):628–636.
- [20] 龙思斯, 杨益新, 宋正国, 等. 三种类型阻控剂对不同品种水稻富集镉的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(5):459–465.
- LONG Si-si, YANG Yi-xin, SONG Zheng-guo, et al. Effects of three inhibitors on the accumulation of cadmium in rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(5):459–465.
- [21] Liu Y, Zhang C, Zhao Y, et al. Effects of growing seasons and genotypes on the accumulation of cadmium and mineral nutrients in rice grown in cadmium contaminated soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579:1282–1288.
- [22] Cao F, Wang R, Cheng W, et al. Genotypic and environmental variation in cadmium, chromium, lead and copper in rice and approaches for reducing the accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 496:275–281.
- [23] Du Y, Hu X F, Wu X H, et al. Affects of mining activities on Cd pollution to the paddy soils and rice grain in Hunan Province, Central South China[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2013, 185(12):9843–9856.
- [24] Shimojima E, Tamagawa I, Horiuchi M, et al. Observation of water and solute movement in a saline, bare soil, groundwater seepage area,

- Western Australia. Part 2. Annual water and solute balances[J]. *Soil Research*, 2015, 54(1):78–93.
- [25] Xiao Y, Huang Z, Yang F, et al. Dynamics of soil moisture and salt content after infiltration of saline ice meltwater in saline-sodic soil columns[J]. *Pedosphere*, 2017, 27(6):1116–1124.
- [26] Foster K J, Miklavcic S J. Modeling root zone effects on preferred pathways for the passive transport of ions and water in plant roots[J]. *Front Plant Sci*, 7:914. http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2016.00914.
- [27] Fricke W. The significance of water co-transport for sustaining transpirational water flow in plants: A quantitative approach[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(3):731–739.
- [28] Shrestha R K, Engel K, Becker M. Effect of transpiration on iron uptake and translocation in lowland rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178(3):365–369.
- [29] Bahrami A, Joo M H. Flag leaf role in N accumulation and remobilization as affected by nitrogen in a bread and durum wheat cultivars[J]. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 2010, 8(6):728–735.
- [30] Zhang C F, Peng S B, Rebecca C. Senescence of top three leaves in field-grown rice plants[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2003, 26(12):2453–2468.
- [31] Fujimaki S, Suzui N, Ishioka N S, et al. Tracing cadmium from culture to spikelet: Noninvasive imaging and quantitative characterization of absorption, transport, and accumulation of cadmium in an intact rice plant[J]. *Plant Physiology*, 2010, 152(4):1796–1806.
- [32] Zhao B H, Wang P, Zhang H X, et al. Source-sink and grain-filling characteristics of two-line hybrid rice Yangliangyou 6[J]. *Rice Science (English version)*, 2006, 13(1):34–42.
- [33] Kato M, Ishikawa S, Inagaki K, et al. Possible chemical forms of cadmium and varietal differences in cadmium concentrations in the phloem sap of rice plants (*Oryza sativa L.*) [J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2010, 56(6):839–847.
- [34] Shimpei U, Takehiro K, Takuya S, et al. Low-affinity cation transporter(OsLCT1) regulates cadmium transport into rice grains[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(52):20959–20964.
- [35] Harris N S, Taylor G J. Cadmium uptake and translocation in seedlings of near isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium accumulation[J]. *BMC Plant Biol*, 2004, 4:4.
- [36] Harris N S, Taylor G J. Remobilization of cadmium in maturing shoots of near isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium accumulation[J]. *J Exp Bot*, 2001, 52:1473–1481.
- [37] Ma J, Cai H, He C, et al. A hemicellulose-bound form of silicon inhibits cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells[J]. *New Phytologist*, 2015, 206(3):1063.
- [38] Ma J, Zhang X, Wang L. Synergistic effects between[Si-hemicellulose matrix] ligands and Zn ions in inhibiting Cd ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells[J]. *Planta*, 2017, 245(5):965.
- [39] Pinto E, Ferreira I M. Cation transporters/channels in plants: Tools for nutrient biofortification[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2015, 179:64–82.
- [40] Sarwar N, Saifullah, Malhi S S, et al. Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2010, 90(6):925–937.
- [41] 赵艳玲, 张长波, 刘仲齐. 植物根系细胞抑制镉转运过程的研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(3):209–213.
ZHAO Yan-ling, ZHANG Chang-bo, LIU Zhong-qi. Inhibiting cadmium transport process in root cells of plants: A review[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(3):209–213.
- [42] Anna B, Anna W, Katarzyna T, et al. Expression of HvHMA2 in tobacco modifies Zn-Fe-Cd homeostasis[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2013, 170(13):1176–1186.