

张 烁, 陆仲烟, 唐 琦, 等. 水稻叶面调理剂的降Cd效果及其对营养元素转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2507-2513.  
ZHANG Shuo, LU Zhong-yan, TANG Qi, et al. Effects of foliar modulators on cadmium accumulation and transport of nutrient elements in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2507-2513.

## 水稻叶面调理剂的降Cd效果及其对营养元素转运的影响

张 烁<sup>1,2</sup>, 陆仲烟<sup>3</sup>, 唐 琦<sup>1,2</sup>, 李化欣<sup>1,2</sup>, 张长波<sup>1</sup>, 刘仲齐<sup>1,2\*</sup>

(1. 农业农村部环境保护科研监测所农业环境污染修复研究中心, 天津 300191; 2. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 3. 广西壮族自治区亚热带作物研究所, 南宁 530001)

**摘 要:**为了探讨叶面调理剂的降Cd机理,通过水稻开花期叶面喷施苹果酸(MA)和微量元素Mn及Zn,对它们的降Cd效果及对主要营养元素含量的影响进行了比较研究。结果表明:喷施10 mmol·L<sup>-1</sup> MnCl<sub>2</sub>、10 mmol·L<sup>-1</sup> ZnCl<sub>2</sub>、5 mmol·L<sup>-1</sup> 苹果酸均能显著降低Cd在稻米、穗轴、穗颈、旗叶中的积累,稻米中的Cd含量从0.63 mg·kg<sup>-1</sup>分别下降到0.47、0.28、0.26 mg·kg<sup>-1</sup>,降镉幅度分别为23.84%、55.44%、58.86%。喷施苹果酸显著提高了Mg、Fe从旗叶向穗颈以及K、Mn、Zn从穗轴向籽粒的转移效率,却显著抑制了Cd从旗叶向穗颈的转移,使穗颈和穗轴中的Cd浓度分别下降59.84%和75.77%。喷施Zn显著提高了籽粒中的Ca、Fe含量。喷施Mn显著促进了K从穗轴向籽粒的转移。由此可见,喷施苹果酸和Mn、Zn能有效促进K、Mn、Zn等必需元素向籽粒的转运,致使稻米中的Cd含量显著下降。

**关键词:**水稻;镉;苹果酸;营养元素;叶面喷施

**中图分类号:**S156.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2018)11-2507-07 **doi:**10.11654/jaes.2018-0864

### Effects of foliar modulators on cadmium accumulation and transport of nutrient elements in rice

ZHANG Shuo<sup>1,2</sup>, LU Zhong-yan<sup>3</sup>, TANG Qi<sup>1,2</sup>, LI Hua-xin<sup>1,2</sup>, ZHANG Chang-bo<sup>1</sup>, LIU Zhong-qi<sup>1,2\*</sup>

(1. Research Center of Agro-Environmental Remediation, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 3. Guangxi Subtropical Crops Research Institute, Nanning 530001, China)

**Abstract:** To explore the mechanism of foliar regulators in decreasing the uptake of cadmium (Cd), the effects of foliar application with malic acid, manganese, and zinc, at the anthesis stage, on cadmium accumulation in grains and other organs of rice plants were studied. The results showed that Cd concentrations in the grains, rachises, uppermost internodes, and flag leaves of rice plants decreased. The Cd concentration in grains decreased from 0.63 mg·kg<sup>-1</sup> to 0.47, 0.28, and 0.26 mg·kg<sup>-1</sup> after spraying 10 mmol·L<sup>-1</sup> MnCl<sub>2</sub>, 10 mmol·L<sup>-1</sup> ZnCl<sub>2</sub>, and 5 mmol·L<sup>-1</sup> malic acid, respectively, and the corresponding percentages of Cd decrease were 23.84%, 55.44%, and 58.86%. Spraying malic acid promoted the transfer of Mg and Fe from flag leaves to the uppermost internodes, and of K, Mn, and Zn from rachises to grains, but significantly inhibited the transfer of Cd from flag leaves to the uppermost internodes. Furthermore, the application of malic acid decreased the concentration of Cd in the uppermost internodes by 59.84%, and in rachises by 75.77%. Spraying Zn significantly increased the content of Ca and Fe in grains. Spraying Mn significantly promoted the transport of K from rachises to grains. These results indicate that spraying malic acid, Mn, and Zn can significantly decrease the Cd content in rice grains by promoting the influx of essential elements (i.e., K, Mn, and Zn) into them.

**Keywords:** rice; cadmium; malic acid; nutrient elements; foliar application

收稿日期:2018-07-06 录用日期:2018-09-05

作者简介:张 烁(1994—),女,辽宁葫芦岛人,硕士研究生,主要从事植物营养生理研究。E-mail:164519744@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)

镉(Cd)是我国污染土壤中最常见的重金属元素。Cd在植物体内积累到一定程度后,会对光合作用、呼吸作用、营养元素吸收和水分平衡等生理过程产生负面影响,不仅抑制植物的生长发育,甚至导致植物死亡<sup>[1-2]</sup>。水稻是Cd积累能力最强的大宗谷类作物,Cd既可以通过根系的吸收和转运到达地上部的叶片和稻米中,也可以通过叶面污染进入叶肉细胞,在籽粒灌浆期转运到稻米中<sup>[3-4]</sup>。水稻积累的Cd能通过食物链迁移到动物和人体内,严重危害动物和人体健康<sup>[5]</sup>。

随着水稻产量的不断提高,其对微量元素的需求量也在增加。叶面喷施微量元素肥料能有效提高水稻产量和品质<sup>[6]</sup>。锰(Mn)和锌(Zn)是水稻生长发育所必需的微量元素。Mn在维持叶绿体稳定中发挥着重要作用,能刺激生长素合成,并且可作为酶的催化剂来调节酶活性<sup>[7]</sup>。在Cd污染环境中,增施Mn能显著降低水稻根系和地上部的Cd含量,并能提升水稻细胞壁中Cd的分配比率和降低胞液中Cd的分配比率,显著缓解Cd对水稻生长发育的抑制作用<sup>[8-9]</sup>。增施Zn也能缓解Cd对水稻的毒害作用,促进根系发育、提高地上部生长量<sup>[10]</sup>。叶面喷施Zn可以降低稻米对Cd的积累<sup>[11-12]</sup>,提高产量和稻米Zn营养品质,进而改善人类Zn营养状况<sup>[13-14]</sup>。

苹果酸(MA)是将植物不同细胞器的多种代谢联系起来的小分子有机酸,在植物生长调节、气孔孔径、营养元素平衡和有毒金属耐性等方面起着重要作用<sup>[15-16]</sup>。植物受到Cd胁迫时,细胞中的苹果酸积累量会显著增加<sup>[17]</sup>,外源添加苹果酸能显著提高植物生长量、增加净光合速率、减少H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的积累、增强根系活性等,进而减轻Cd的毒害作用<sup>[15-16, 18-19]</sup>。

水培试验和盆栽试验结果证明:Mn和Zn对水稻幼苗Cd吸收转运特性有显著影响<sup>[8-10]</sup>;苹果酸和柠檬酸等对向日葵、早熟禾、高狐草的Cd含量有显著影响<sup>[15-16]</sup>。但在田间自然条件下,这些小分子化合物对水稻生殖生长阶段的Cd积累特性有何影响,尚未见相关研究报道。本研究以植物体内最常见的小分子酸苹果酸和微量元素Mn、Zn为试剂,采用水稻开花末期叶面喷施的方法,对它们调控水稻生殖器官Cd积累特性的效果和机理进行了探讨,旨在为降Cd叶面调理剂的筛选和研发提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与地点

以早稻品种Y两优143为材料,在广西壮族自治区

河池市选择土壤和稻米Cd含量超标的水稻田进行试验。试验田为水稻土,其基本理化性质为:pH 6.53,有机质34.38 g·kg<sup>-1</sup>,全氮0.164%,全磷0.024%,全钾1.20%,速效钾84.96 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷17.1 mg·kg<sup>-1</sup>,阳离子交换量7.82 cmol·kg<sup>-1</sup>,Cd含量0.69 mg·kg<sup>-1</sup>,Mn含量1 157.0 mg·kg<sup>-1</sup>,Zn含量114.1 mg·kg<sup>-1</sup>。以分析纯ZnCl<sub>2</sub>、MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O、L-苹果酸为原料配制叶面调理剂。

### 1.2 试验方法

每种叶面调理剂的田间喷施面积为10.0 m<sup>2</sup>(长4.0 m,宽2.5 m)。试验共分1个对照组(CK)和3个处理组,通过前期试验确定处理液浓度,水稻齐穗开花期向叶面均匀喷施处理液1次,为保证喷施条件一致,每个小区喷施2 L处理液,处理液均由田间灌溉水配制。其中,对照组喷施2 L灌溉水,处理1组喷施10 mmol·L<sup>-1</sup> MnCl<sub>2</sub>,处理2组喷施10 mmol·L<sup>-1</sup> ZnCl<sub>2</sub>,处理3组喷施5 mmol·L<sup>-1</sup> 苹果酸,每组设3次重复。水稻采用早育秧方式,于2016年5月10日移栽。施肥方法依照水稻测土配方施肥技术,每公顷施用的氮、磷、钾总量分别为:尿素405 kg、普钙600 kg、氯化钾225 kg,其中基肥占总量的64%,分蘖肥占总量的25%,穗粒肥占总量的11%。整个生育期各处理无明显病虫害发生。

### 1.3 样品采集与处理

水稻成熟期,选取各小区中心长3.0 m、宽1.5 m处喷施较均匀的水稻,收获稻穗及穗下节部分装入网袋,自然风干后,将籽粒磨粉,用剪刀把穗轴、穗颈和旗叶剪碎混匀,分别收集于自封袋中,以备消解。

### 1.4 Cd及6种水稻矿质元素测定方法

参照Liu等的方法<sup>[9]</sup>,分别称取0.5 g籽粒、穗轴、穗颈、旗叶样品于消解管中,加入7 mL HNO<sub>3</sub>摇匀,室温下静置12 h。将消解管放入电热消解仪ED54上进行消解,温度110 ℃,加热2.5 h后,冷却至室温,再在消煮管内加入1 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>摇匀,110 ℃继续加热1.5 h。将消解管内的液体于170 ℃下赶酸至1 mL以内。再将消解液稀释并转移至25 mL容量瓶定容,用ICP-MS测定样品中Cd、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn含量。

### 1.5 数据统计及分析

采用Microsoft Excel进行相关数据的计算、统计与处理。用SPSS 17.0进行统计分析,新复极差法(Duncan's)作多重比较、差异显著性检验,并用Origin 8.6作图。

转移因子为相邻器官间Cd含量的比值<sup>[20]</sup>:

转移因子( $TF_{a/b}$ )=a器官Cd含量/b器官Cd含量

## 2 结果与分析

### 2.1 苹果酸和微量元素对稻米Cd积累特性及分配比例的影响

我国的安全标准(GB 2762—2012)和FAO/WHO规定的稻米Cd最大限量标准分别为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在土壤pH 6.53、Cd含量 $0.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的轻度污染农田中,早稻品种Y两优143稻米中的Cd含量高达 $0.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,比国家限量标准高2.15倍。水稻开花期喷施苹果酸、 $\text{MnCl}_2$ 和 $\text{ZnCl}_2$ 对水稻籽粒中的Cd含量均有显著抑制效果,且不同处理间存在差异,降Cd效果依次为苹果酸> $\text{ZnCl}_2$ > $\text{MnCl}_2$ (图1)。在苹果酸的作用下,旗叶、穗颈、穗轴和籽粒中的Cd含量大幅度下降;而Mn和Zn主要是抑制了籽粒中的Cd含量。和CK相比, $\text{MnCl}_2$ 、 $\text{ZnCl}_2$ 和苹果酸处理分别使籽粒Cd含量降低了23.84%、55.44%、58.86%,穗轴Cd含量分别下降19.52%、34.86%、75.77%,穗颈Cd含量分别下降20.90%、24.20%、59.84%,旗叶Cd含量分别下降29.53%、48.11%、50.71%。

### 2.2 叶面喷施苹果酸和微量元素对水稻各器官营养元素含量的影响

Mg、K、Ca、Mn、Fe和Zn等营养元素在水稻籽粒、穗轴、穗颈和旗叶中的含量差异非常明显。Mg含量分布高低依次为旗叶最高,籽粒次之,穗轴和穗颈最

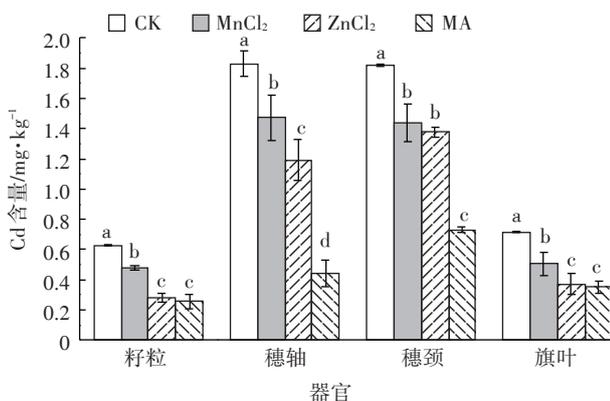
低(图2A)。K含量分布高低依次为穗颈最高,旗叶和穗轴次之,籽粒最低(图2B)。Ca、Mn、Fe含量分布高低依次为旗叶最高,穗轴和穗颈次之,籽粒最低(图2C至图2E)。Zn含量在器官间的差异较小。喷施苹果酸、 $\text{MnCl}_2$ 和 $\text{ZnCl}_2$ 对籽粒中的Mg、K、Zn含量没有显著影响,喷施 $\text{MnCl}_2$ 对籽粒中微量元素的含量无显著影响,喷施苹果酸使籽粒中Ca、Mn含量显著降低,喷施 $\text{ZnCl}_2$ 使籽粒中Ca、Fe含量显著升高。

喷施苹果酸使各器官中的Mn含量均显著下降(图2D),穗轴、穗颈的Mg含量显著升高,籽粒、穗轴、旗叶的Ca含量显著降低,穗颈Fe含量显著升高,穗轴Zn含量显著降低。喷施 $\text{MnCl}_2$ 和 $\text{ZnCl}_2$ 对籽粒、穗轴、穗颈和旗叶中的微量元素含量的影响总体上不大,少数微量元素含量影响达到5%的显著水平。喷施 $\text{MnCl}_2$ 使穗颈Mg、K含量显著升高,穗轴Ca、Mn含量显著升高,穗轴K含量显著降低。喷施 $\text{ZnCl}_2$ 使籽粒中Ca、Fe含量显著升高,旗叶Mn含量显著降低。喷施 $\text{ZnCl}_2$ 显著提高了各器官中的Zn含量,但喷施 $\text{MnCl}_2$ 和苹果酸对各器官中的Zn含量没有显著影响(图2F)。

### 2.3 叶面喷施苹果酸和微量元素对水稻各器官营养元素转移因子的影响

喷施苹果酸、 $\text{MnCl}_2$ 和 $\text{ZnCl}_2$ 不仅影响各器官中必需营养元素的含量,也影响营养元素在相邻器官间的转移(表1)。苹果酸处理下Cd的 $TF_{\text{籽粒/穗轴}}$ 是CK的1.7倍, $TF_{\text{穗轴/穗颈}}$ 较CK显著降低。 $\text{ZnCl}_2$ 处理Cd的 $TF_{\text{穗颈/旗叶}}$ 较CK显著提高。 $\text{MnCl}_2$ 对Cd的转移因子无显著影响。苹果酸对Cd的转移因子影响较大。

叶面喷施苹果酸能促进Mg、K、Ca、Mn、Fe、Zn从旗叶向穗颈中转移,其中Mg和Fe的 $TF_{\text{穗颈/旗叶}}$ 与CK差异达到显著水平,分别为CK的1.8倍和2.1倍;抑制了K、Ca、Mn、Fe、Zn从穗颈向穗轴的转移,但对转移因子的影响差异不显著;促进了K、Ca、Mn、Fe、Zn从穗轴向籽粒中转移,其中K、Mn、Zn的 $TF_{\text{籽粒/穗轴}}$ 显著提高。叶面喷施 $\text{MnCl}_2$ 能促进Mg、K、Mn、Fe、Zn从旗叶向穗颈中转移,其中Mg和K的 $TF_{\text{穗颈/旗叶}}$ 与CK差异达到显著水平,分别为CK的1.6倍和1.5倍;同时促进了Ca、Mn、Zn从穗颈向穗轴的转移,其中Ca从穗颈向穗轴的转移因子显著增加;显著抑制K从穗颈向穗轴的转移,显著促进K从穗轴向籽粒中的转移。叶面喷施 $\text{ZnCl}_2$ 能促进Mg、K、Mn、Fe从旗叶向穗颈中转移,Mg的 $TF_{\text{穗颈/旗叶}}$ 显著提高,Zn的 $TF_{\text{穗颈/旗叶}}$ 显著降低;同时抑制了Mg、K、Fe在穗轴和穗颈间的转移,显著促进Zn



不同小写字母表示处理间差异达到5%显著水平( $n=4$ )。下同  
Different letters indicate significant difference between different treatments at 5% level ( $n=4$ ). The same below

图1 水稻开花期叶面喷施苹果酸、 $\text{MnCl}_2$ 、 $\text{ZnCl}_2$ 对水稻各器官Cd含量的影响

Figure 1 Effects of foliar application with malic acid, manganese and zinc at anthesis stage on Cd content in grains and other organs of rice plants

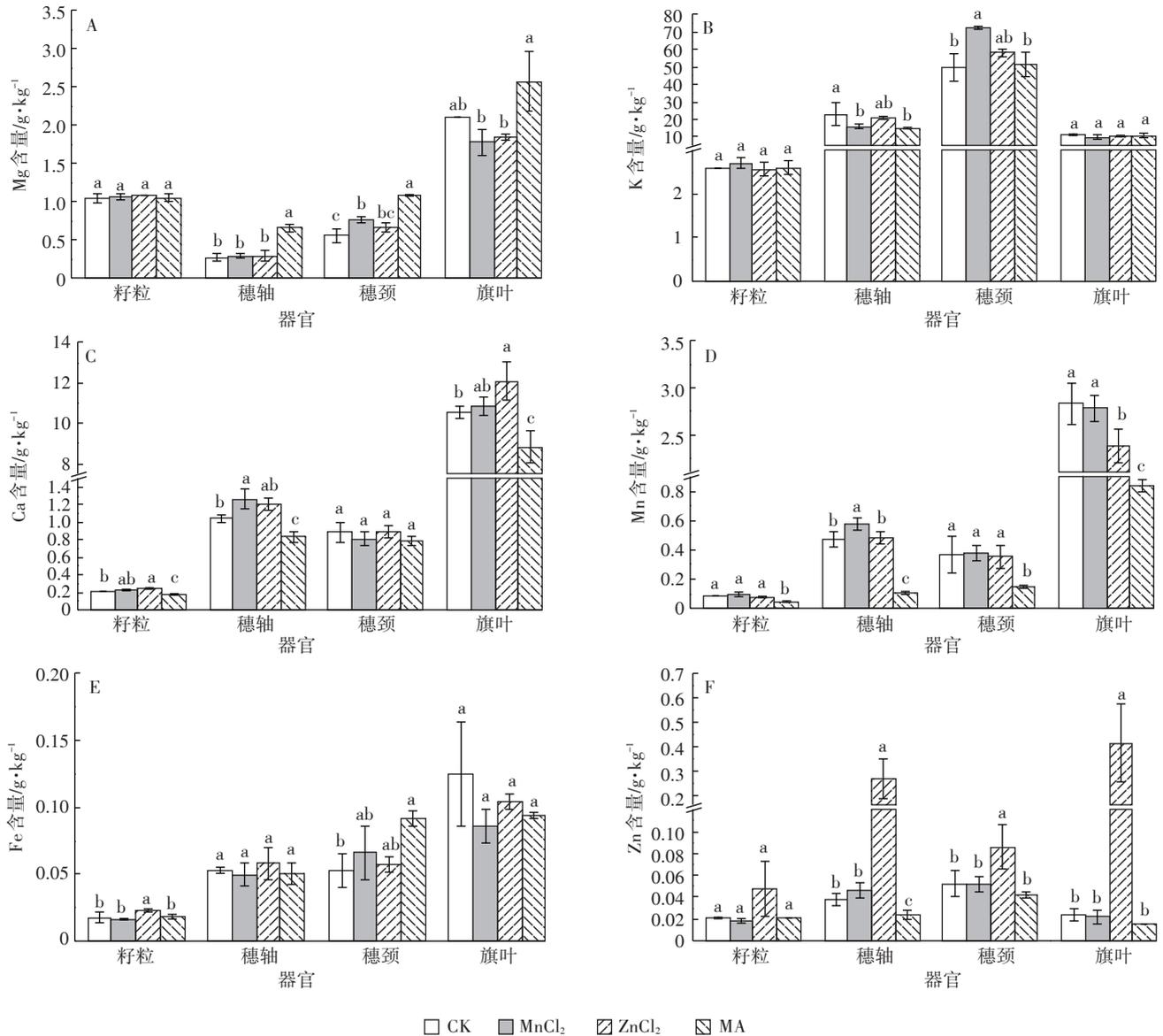


图2 水稻开花期叶面喷施苹果酸、 $MnCl_2$ 、 $ZnCl_2$ 对水稻籽粒、穗轴、穗颈、旗叶营养元素含量的影响

Figure 2 Effects of foliar application with malic acid, manganese and zinc at anthesis stage on accumulation of nutrient element in rice grains, rachises, uppermost internodes and flag leaves

在穗轴和穗颈间的转移, Zn的 $TF_{\text{穗轴/穗颈}}$ 为CK的4.3倍;抑制Ca、Mn、Zn从穗轴向籽粒中的转移,其中Zn的 $TF_{\text{籽粒/穗轴}}$ 显著降低。

苹果酸对Cd的转移因子影响较大,表现为显著促进Cd从穗轴向籽粒转移,显著抑制Cd从穗颈向穗轴的转移, $ZnCl_2$ 处理下只显著促进Cd从旗叶向穗颈的转移,而 $MnCl_2$ 对水稻相邻器官间的转移因子无显著影响。

### 3 讨论

水稻收获期稻穗中60%~90%的总碳来自开花后的光合作用,其他许多储存在营养体中的营养元素和

重金属Cd也会在籽粒发育过程中转运到籽粒中<sup>[21-22]</sup>。高Cd积累品种开花后叶片中的Cd输出率和穗轴中的Cd浓度显著高于低Cd积累品种<sup>[4,23]</sup>。因此,通过喷施叶面调理剂来抑制茎叶中Cd向籽粒转运的过程,就有可能提高旗叶、穗颈、穗轴对Cd的阻控作用,在不影响籽粒正常发育的前提下,降低稻米中的Cd含量。本研究发现,水稻开花期喷施 $ZnCl_2$ 和苹果酸能使稻谷中Cd含量从 $0.63\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降到 $0.26\sim 0.28\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,达到国际食品安全标准。喷施 $MnCl_2$ 也能降低稻米中的Cd含量,但降Cd效果不如 $ZnCl_2$ 和苹果酸。不同叶面调理剂降Cd效果的差异可能与各自独

表1 苹果酸、Mn、Zn对水稻Cd和营养元素转移因子的影响

Table 1 Cd and nutrient elements transfer factors of rice under malic acid, manganese and zinc treatment

| 元素 | 转移因子     | CK          | MnCl <sub>2</sub> | ZnCl <sub>2</sub> | 苹果酸         |
|----|----------|-------------|-------------------|-------------------|-------------|
| Cd | TF 籽粒/穗轴 | 0.34±0.02b  | 0.31±0.01b        | 0.22±0.01b        | 0.58±0.01a  |
|    | TF 穗轴/穗颈 | 1.01±0.04ab | 1.07±0.03a        | 0.86±0.08bc       | 0.60±0.10c  |
|    | TF 穗颈/旗叶 | 2.54±0.01b  | 2.91±0.81ab       | 4.13±0.25a        | 2.07±0.86b  |
| Mg | TF 籽粒/穗轴 | 3.95±0.99a  | 3.67±0.33a        | 3.97±1.23a        | 1.61±0.06b  |
|    | TF 穗轴/穗颈 | 0.50±0.18ab | 0.39±0.06b        | 0.43±0.09ab       | 0.63±0.04a  |
|    | TF 穗颈/旗叶 | 0.26±0.04c  | 0.42±0.02ab       | 0.36±0.03b        | 0.47±0.06a  |
| K  | TF 籽粒/穗轴 | 0.12±0.03b  | 0.17±0.01a        | 0.13±0.01b        | 0.17±0.01a  |
|    | TF 穗轴/穗颈 | 0.48±0.20a  | 0.22±0.01b        | 0.35±0.01ab       | 0.33±0.06ab |
|    | TF 穗颈/旗叶 | 4.51±0.79b  | 6.99±0.89a        | 5.47±0.21b        | 4.74±0.52b  |
| Ca | TF 籽粒/穗轴 | 0.20±0.01ab | 0.18±0.02b        | 0.20±0.02ab       | 0.22±0.01a  |
|    | TF 穗轴/穗颈 | 1.20±0.21b  | 1.57±0.17a        | 1.35±0.13ab       | 1.02±0.11b  |
|    | TF 穗颈/旗叶 | 0.08±0.01a  | 0.07±0.01a        | 0.07±0.01a        | 0.09±0.01a  |
| Mn | TF 籽粒/穗轴 | 0.18±0.02b  | 0.16±0.03b        | 0.16±0.01b        | 0.40±0.06a  |
|    | TF 穗轴/穗颈 | 1.38±0.62a  | 1.56±0.32a        | 1.41±0.28a        | 0.72±0.03a  |
|    | TF 穗颈/旗叶 | 0.13±0.05a  | 0.14±0.02a        | 0.15±0.03a        | 0.18±0.02a  |
| Fe | TF 籽粒/穗轴 | 0.34±0.06a  | 0.31±0.06a        | 0.46±0.01a        | 0.38±0.01a  |
|    | TF 穗轴/穗颈 | 1.04±0.29a  | 0.77±0.21a        | 1.02±0.31a        | 0.54±0.05a  |
|    | TF 穗颈/旗叶 | 0.46±0.25b  | 0.66±0.09ab       | 0.61±0.01b        | 0.98±0.09a  |
| Zn | TF 籽粒/穗轴 | 0.56±0.10b  | 0.39±0.12bc       | 0.18±0.04c        | 0.89±0.13a  |
|    | TF 穗轴/穗颈 | 0.76±0.28a  | 0.91±0.06a        | 3.25±2.09a        | 0.55±0.05a  |
|    | TF 穗颈/旗叶 | 2.31±1.01a  | 2.71±0.89a        | 0.26±0.14b        | 2.67±0.21a  |

注:不同小写字母代表处理间差异达到5%显著水平。

Note: Different letters indicate significant difference between different treatments at 5% level.

特的调控机理有关。微量元素Mn和Zn可能主要通过拮抗作用来抑制Cd从营养器官向稻米中的转移<sup>[8,24]</sup>;而苹果酸可能与Cd发生螯合作用,使其转变成低毒或无毒的螯合态存贮在营养体中<sup>[25]</sup>。由于节、老叶和基部茎秆中的Cd含量显著高于旗叶<sup>[22-23]</sup>,喷施苹果酸可能促进了基部营养体对Cd的固定,抑制了Cd从基部营养体向穗颈和穗轴的转运,进而抑制了Cd向稻米的转运。

苹果酸是植物叶片和根系中最丰富的小分子酸,能通过呼吸作用对许多代谢过程产生调控作用<sup>[26]</sup>。本研究发现,叶面喷施苹果酸,不仅对水稻籽粒、穗轴、穗颈和旗叶中的Cd含量产生了显著抑制作用,而且显著降低了各器官中的Mn含量(图2D),但Mg和Fe从旗叶向穗颈的转移以及K、Mn、Zn从穗轴向籽粒的转移效率显著提高。这可能是因为苹果酸通过叶片进入植株后,与Cd在细胞内或胞间隙形成的高稳定Cd复合物不易解离,降低了水稻Cd的活度,从而抑制茎叶中的Cd向稻米的转运<sup>[27]</sup>。与此同时,苹果酸通过促进Mg、K、Fe等必需元素向水稻穗颈的转

运,降低了Cd<sup>2+</sup>和Mn<sup>2+</sup>与相关离子通道和载体蛋白结合的机率<sup>[8,28]</sup>,于是显著降低了稻穗各部位以及稻米中的Cd含量。

水稻开花期叶面喷施ZnCl<sub>2</sub>,不仅对水稻籽粒、穗轴、穗颈、旗叶中的Cd含量产生了显著抑制作用,而且籽粒中的Cd含量分配比例从12.55%降至8.66%,提高了各器官中的Zn含量。这可能是因为Cd与Zn为同族元素,具有相似的化学性质,当Cd<sup>2+</sup>与Zn<sup>2+</sup>竞争相同的转运蛋白时,膜蛋白优先结合水稻生长发育必需的Zn<sup>2+</sup>,从而抑制了Cd<sup>2+</sup>从旗叶向籽粒的转运。Cd从穗颈向穗轴转移的过程中,大部分的Cd被拦截在穗颈中,导致Cd的TF<sub>穗轴/穗颈</sub>显著下降。喷施ZnCl<sub>2</sub>促进了Mg、K、Mn从旗叶向穗颈的转移,必需营养元素中的阳离子与Cd<sup>2+</sup>争夺离子通道,从而降低了Cd在水稻中的转运,降低了籽粒的Cd含量。叶面喷施ZnCl<sub>2</sub>后,籽粒、穗轴、穗颈中Fe含量均有所增加,与索炎炎等<sup>[29]</sup>的研究相似。植物从土壤中主要吸收氧化态的铁,通常为Fe<sup>3+</sup>,经NAD(P)H还原后转变为Fe<sup>2+</sup>再进入细胞内。Cd<sup>2+</sup>能和Fe<sup>2+</sup>竞争相同的膜转运蛋

白,因此喷施  $ZnCl_2$  来提高植株中  $Fe^{2+}$ , 间接减少了 Cd 在水稻中的转运<sup>[30]</sup>。因此,叶面喷施  $ZnCl_2$ , 可以通过增加  $Zn^{2+}$  浓度,与  $Cd^{2+}$  竞争通道,直接影响 Cd 的吸收和转运,也可以通过影响其他必需元素的含量,间接抑制 Cd 的吸收和转运。

大量的研究表明,  $Mn^{2+}$  与  $Cd^{2+}$  对相关离子通道和载体蛋白的结合存在竞争关系,  $Mn^{2+}$  能优先结合细胞膜上的载体蛋白和通道蛋白,与  $Cd^{2+}$  产生拮抗作用<sup>[8,28,31]</sup>。本研究发现,叶面喷施  $MnCl_2$ , 不仅对水稻籽粒、穗轴、穗颈、旗叶中的 Cd 含量产生了显著抑制作用,而且对 K 在相邻器官间的转移有很大影响。 $MnCl_2$  显著促进 K 从穗轴向籽粒中的转移,同时还促进了 Mg、K、Mn、Fe、Zn 从旗叶向穗颈、Ca 从穗颈向穗轴的转移。这些必需元素在穗颈和穗轴中的富集,大幅度降低了 Cd 与转运蛋白结合的机会,通过拮抗作用有效抑制了 Cd 进入水稻籽粒的过程。

#### 4 结论

(1) 水稻开花期喷施苹果酸、 $MnCl_2$  和  $ZnCl_2$  能显著降低成熟期籽粒、穗轴、穗颈和旗叶中的 Cd 含量,喷施苹果酸的降 Cd 效果高达 58.86%, 其次是  $ZnCl_2$ , 喷施  $MnCl_2$  仅使稻米中的 Cd 含量下降了 23.84%。

(2) 叶面喷施苹果酸、 $MnCl_2$  和  $ZnCl_2$  对水稻籽粒、穗轴、穗颈、旗叶中矿质元素的含量均有不同程度的影响。苹果酸能显著降低各器官中的 Mn 含量;苹果酸、 $MnCl_2$  和  $ZnCl_2$  都能促进 Mg、K、Mn、Fe 从旗叶向穗颈中的转移。

(3) 与  $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ MnCl}_2$ 、 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ ZnCl}_2$  相比,喷施  $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  苹果酸能显著抑制 Cd 从旗叶向穗颈的转移,使穗颈和穗轴中的 Cd 浓度大幅度下降。

#### 参考文献:

- [1] Asgher M, Khan M I R, Anjum N A, et al. Minimising toxicity of cadmium in plants: Role of plant growth regulators[J]. *Protoplasma*, 2015, 252(2):399-413.
- [2] Gallego S M, Pena L B, Barcia R A, et al. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanisms[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 83:33-46.
- [3] 温娜, 王景安, 刘仲齐. 利用 AMMI 模型分析稻米镉含量的基因型与环境互作效应[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5):817-823. WEN Na, WANG Jing-an, LIU Zhong-qi. Analysis of genotypic and environmental effects on cadmium content in rice by AMMI model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5):817-823.
- [4] 文志琦, 赵艳玲, 崔冠男, 等. 水稻营养器官镉积累特性对稻米镉含量的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(8):1280-1286. WEN Zhi-qi, ZHAO Yan-ling, CUI Guan-nan, et al. Effects of cadmium accumulation characteristics in vegetative organs on cadmium content in grains of rice[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(8):1280-1286.
- [5] Liu Y, Zhang C B, Zhao Y L, 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.
- [6] 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.
- [7] 饶玉春, 郑婷婷, 马伯军, 等. 微量元素铁/锰/铜对水稻生长的影响及缺素防治[J]. 中国稻米, 2012, 18(4):31-35. RAO Yu-chun, ZHENG Ting-ting, MA Bo-jun, et al. The effects of iron, manganese and copper on the growth of rice and the prevention and control of the deficiency of rice[J]. *China Rice*, 2012, 18(4):31-35.
- [8] 徐蓓, 杨益新, 李文华, 等. 锰离子浓度及其转运通道对水稻幼苗镉吸收转运特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8):1429-1435. XU You, YANG Yi-xin, LI Wen-hua, et al. Effects of manganese concentrations and transporters on uptake and translocation of cadmium in rice seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8):1429-1435.
- [9] 覃都, 陈铭学, 周蓉, 等. 锰-镉互作对水稻生长和植株镉/锰含量的影响[J]. 中国水稻科学, 2010, 24(2):189-195. QIN Du, CHEN Ming-xue, ZHOU Rong, et al. Effects of interaction between manganese and cadmium on plant growth and contents of cadmium and manganese in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2010, 24(2):189-195.
- [10] 尹洁, 赵艳玲, 徐蓓, 等. 锌对梗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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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 ap-

- plication 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.
- [14] Group I Z N C, Brown K H, Rivera J A, 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.
- [15] Wang S, Dong Q, Wang Z. Differential effects of citric acid on cadmium uptake and accumulation between tall fescue and Kentucky bluegrass[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2017, 145:200–206.
- [16] Hawrylak–Nowak B, Dresler S, Matraszek R. Exogenous malic and acetic acids reduce cadmium phytotoxicity and enhance cadmium accumulation in roots of sunflower plants[J]. *Plant Physiology & Biochemistry*, 2015, 94(21):225–234.
- [17] Kováčik J, Klejdus B, Babula P, et al. Ascorbic acid affects short-term response of *Scenedesmus quadricauda* to cadmium excess[J]. *Algal Research*, 2017, 24:354–359.
- [18] Mnasri M, Ghabriche R, Fourati E, et al. Cd and Ni transport and accumulation in the halophyte *Sesuvium portulacastrum*: Implication of organic acids in these processes[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6:156.
- [19] Tatar E, Mihucz V G, Varga A, et al. Effect of lead, nickel and vanadium contamination on organic acid transport in xylem sap of cucumber [J]. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 1999, 75(3):219–223.
- [20] Gao L S, Zhu S, Sheng N B, et al. The transportation and accumulation of arsenic, cadmium, and phosphorus in 12 wheat cultivars and their relationships with each other[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 299:94–102.
- [21] Bahrani 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.
- [22] Chen R, Zhang C, Zhao Y, et al. Foliar application with nano-silicon reduced cadmium accumulation in grains by inhibiting cadmium translocation in rice plants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(3):2361–2368.
- [23] 居学海, 张长波, 宋正国, 等. 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[J]. *植物生理学报*, 2014, 50(5):634–640.
- JU Xue-hai, ZHANG Chang-bo, SONG Zheng-guo, et al. Changes in cadmium accumulation in rice organs during grain development and their relationship with genotype and cadmium levels in soil[J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(5):634–640.
- [24] Pinto E, Ferreira I M. Cation transporters/channels in plants: Tools for nutrient biofortification[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2015, 179:64–82.
- [25] Kutrowska A, Szlag M. Low-molecular weight organic acids and peptides involved in the long-distance transport of trace metals[J]. *Acta Physiologica Plantarum*, 2014, 36(8):1957–1968.
- [26] Vecerova K, Vecera Z, Docekal B, et al. Changes of primary and secondary metabolites in barley plants exposed to CdO nanoparticles[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218:207–218.
- [27] 万亚男, 张敬锁, 余 垚, 等. 有机酸对苗期水稻吸收和运输镉的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(8):2188–2192.
- WAN Ya-nan, ZHANG Jing-suo, YU Yao, et al. Effects of organic acids on the uptake and translocation of cadmium by rice seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(8):2188–2192.
- [28] Sasaki A, Yamaji N, Ma J F. Overexpression of OsHMA3 enhances Cd tolerance and expression of Zn transporter genes in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(20):6013–6021.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Pittman J K. Managing the manganese: Molecular mechanisms of manganese transport and homeostasis[J]. *New Phytologist*, 2005, 167(3):733–742.