

叶面喷施氯化氨基乙酸对水稻镉转运特性的影响

刘双月, 付琳, 张长波, 邓嘉伟, 薛卫杰, 刘仲齐, 王常荣, 邓芸

引用本文:

刘双月, 付琳, 张长波, 邓嘉伟, 薛卫杰, 刘仲齐, 王常荣, 邓芸. 叶面喷施氯化氨基乙酸对水稻镉转运特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 500–510.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1229>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

叶面喷施苹果酸对水稻Cd积累特性的影响

王惠君, 薛卫杰, 张昕, 张长波, 黄永春, 任兴华, 刘仲齐

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 269–278 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0823>

叶施谷胱甘肽对水稻镉和矿质元素含量的影响

刘雅萍, 王常荣, 任兴华, 刘月敏, 黄永春, 刘仲齐, 张长波

农业环境科学学报. 2022, 41(9): 1864–1874 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0118>

叶面喷施二巯基丁二酸对晚稻籽粒镉及矿质元素含量的影响

杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 王常荣, 张长波

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1802–1808 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0588>

叶面喷施锌离子对水稻各器官镉积累特性的影响

韩潇潇, 任兴华, 王培培, 黄永春, 张长波, 刘仲齐

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1809–1817 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1528>

叶面喷施S-烯丙基-L-半胱氨酸对晚稻籽粒中铅含量的影响

程六龙, 黄永春, 周桂华, 刘仲齐, 张长波, 王常荣, 王晓丽

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2134–2142 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0900>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘双月, 付琳, 张长波, 等. 叶面喷施氯化氨基乙酸对水稻镉转运特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 500–510.

LIU S Y, FU L, ZHANG C B, et al. Effects of foliar application of chlorinated amino acetic acid on cadmium transport and accumulation characteristics in rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(3): 500–510.

叶面喷施氯化氨基乙酸对水稻镉转运特性的影响

刘双月¹, 付琳¹, 张长波^{1*}, 邓嘉伟¹, 薛卫杰¹, 刘仲齐¹, 王常荣¹, 邓芸²

(1. 农业农村部产地环境污染防治重点实验室, 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 江南大学环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:为了探究水稻开花期喷施氯化氨基乙酸对水稻中Cd转运特性的影响,以湘早籼24号(X24)水稻为研究对象开展盆栽试验,对水稻籽粒及各器官中的Cd含量、水稻必需元素(K、Mg、Ca、Fe、Mn、Zn)及水稻体内氨基酸含量的变化进行分析。结果表明:水稻开花期叶面喷施0.8 mmol·L⁻¹氯化氨基乙酸显著降低了稻米和穗轴中的Cd含量,稻米中的Cd含量从0.28 mg·kg⁻¹下降至0.17 mg·kg⁻¹,降幅为39.29%。通过对水稻体内各器官间Cd转移系数的分析发现,开花期水稻叶面喷施氯化氨基乙酸可以显著降低Cd离子从穗轴向籽粒、穗节向穗颈、倒二节间向倒一节间的转移系数,即倒二节间向上的转移效率降低导致了稻米中Cd含量显著下降。同时,叶面喷施氯化氨基乙酸降低了水稻籽粒和穗轴中Ca的含量,促进了K、Mg和Zn从倒一节向穗轴的转移。氨基酸分析结果显示,叶面喷施0.8 mmol·L⁻¹氯化氨基乙酸后,稻米中天冬氨酸和谷氨酸的含量分别增加了28.54%和22.96%,甘氨酸含量减少了51.92%。由此可见,水稻开花期叶面喷施氯化氨基乙酸有利于稻米中天冬氨酸和谷氨酸的合成,能促进K、Mg和Zn的转运,并通过抑制Cd由营养器官向籽粒的转运过程显著降低稻米中的Cd含量,该方法在我国南方Cd污染农田水稻生产过程中具有良好的应用前景。

关键词:水稻; 镉; 叶面调理剂; 氨基酸; 氯化氨基乙酸; 氧化损伤

中图分类号: S511; X53; X173 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2023)03-0500-11 doi:10.11654/jaes.2022-1229

Effects of foliar application of chlorinated amino acetic acid on cadmium transport and accumulation characteristics in rice

LIU Shuangyue¹, FU Lin¹, ZHANG Changbo^{1*}, DENG Jiawei¹, XUE Weijie¹, LIU Zhongqi¹, WANG Changrong¹, DENG Yun²

(1. Key Laboratory of Original Agro-Environmental Pollution Prevention and Control, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: To explore the effects of foliar application of chlorinated amino acetic acid on the transport characteristics of Cd in rice during the flowering stage, a pot experiment was conducted using Xiangzaoxian24 rice. The changes of Cd content in rice grains and various organ species, and essential elements (K, Mg, Ca, Fe, Mn, Zn) and amino acid contents in rice were analyzed. The results show that the application of 0.8 mmol·L⁻¹ chlorinated amino acetic acid at the flowering stage of rice significantly reduced the Cd content in rice and rachis at the mature stage; the Cd content in rice decreased from 0.28 mg·kg⁻¹ to 0.17 mg·kg⁻¹, reducing by 39.29%. Through the analysis

收稿日期: 2022-11-30 录用日期: 2023-02-01

作者简介: 刘双月(1999—), 女, 湖北孝感人, 硕士研究生, 从事环境污染修复研究。E-mail: lszysl@163.com

付琳与刘双月同等贡献

*通信作者: 张长波 E-mail: zhangchangbo@caas.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1700103); 国家科技部外国专家计划项目(G2022051018L); 国家自然科学基金项目(42207039, U20A20108); 农业农村部环境保护科研监测所基础性前沿任务

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2022YFD1700103); Foreign Experts Program of the Ministry of Science and Technology of China (G2022051018L); The National Natural Science Foundation of China (42207039, U20A20108); Basic Frontier Task of Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs

of the cadmium transfer factor between various organs in rice, we found that the application of chlorinated amino acetic acid significantly decreased the transport factor of Cd ions from the rachis to grain, panicle node to panicle neck, and from the second inverted node to the first inverted. Cd decreased significantly due to the decrease in the transport efficiency of the inverted second internode. Additionally, the application of chlorinated amino acetic acid increased the content of Ca in grain and cob, and promoted the transfer of K, Mg and Zn from the inverted node to the rachis. The amino acid analysis results show that the application of $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ chlorinated amino acetic acid increased the content of aspartic acid and glutamic acid by 28.54% and 22.96%, respectively, and decreased the glycine content by 51.92%. Therefore, the application of chlorinated amino acetic acid during the flowering period of rice is conducive to the synthesis of aspartic acid and glutamic acid in rice, which promotes the transport of K, Mg and Zn, and significantly reduces Cd content by inhibiting the transportation of Cd from vegetative organs to grain. This method may be applied in the production process of Cd-polluted farmland in southern China.

Keywords: rice; cadmium; foliar conditioner; amino acid; chlorinated amino acetic acid; oxidative damage

重金属Cd是我国土壤中一种有害的重金属元素,其点位超标率为7%^[1],是威胁我国粮食安全生产的主要污染物之一,具有易被水稻吸收、难降解、毒性强的特点^[2-4]。Cd被水稻根系吸收后,会通过水稻灌浆过程被转运至籽粒,从而导致稻米中Cd含量超标,Cd还可以经食物链进入人体,并在肝、肾等器官富集,从而严重危害人体健康,因此稻米中Cd的含量超标问题已引起广泛关注^[4-6]。水稻叶面阻控技术是目前一种降低稻米中重金属Cd含量的有效农艺措施^[7-9],该技术是通过在水稻生育期进行叶面喷施重金属抑制剂,阻控水稻灌浆期Cd向籽粒转运来降低稻米中的Cd含量。与物理修复、化学修复、生物修复等常规重金属修复方法相比^[10-12],水稻叶面阻控技术具有成本低和易推广的优点^[13]。无人机喷施技术在水稻生产中的广泛应用,对叶面阻控剂在水中的溶解度提出了更高的要求,因此水稻降Cd叶面阻控剂的筛选成为目前的一个研究热点。

水稻的根、茎、叶组织具有识别必需元素和有害元素的功能^[14-16],对水稻体内重金属Cd的跨膜运输和在组织间的转运有明显的拦截作用。进入水稻根系的Cd,优先被根系、茎叶等营养器官所固定,少量的Cd在开花灌浆期转运到发育籽粒中^[17]。水稻细胞通过将Cd固定在营养体的细胞壁中或封存在液泡中来抑制Cd向籽粒的转运,其中Cd含量最高的水稻营养器官是根系和节。叶面喷施降Cd阻控剂可以影响水稻体内的氨基酸代谢过程,提高水稻营养器官对Cd的拦截潜力和过滤功能,阻控Cd由营养器官向籽粒中的转运,通过降低Cd的转移效率来减少稻米中Cd的积累,从而降低稻米中的Cd含量^[2]。水稻开花期叶面喷施柠檬酸和苹果酸等小分子酸,可通过促进水稻体内氨基酸代谢过程来缓解重金属Cd毒性^[18-19],如水稻开花期喷施苹果酸能显著降低水稻籽粒、穗轴、穗

颈、旗叶中的Cd含量^[20],使水稻籽粒中的Cd含量从 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,同时对氨基酸的合成具有明显的促进作用,使稻米中的甘氨酸和缬氨酸含量分别增加46.45%和34.56%^[21]。因此,以能促进水稻体内氨基酸代谢过程来缓解重金属Cd毒性的降Cd阻控剂引起了科研人员的关注。

离子液体(Ionic liquids)是一种由有机阳离子与阴离子组成的盐,具有良好的水溶性,其在农业秸秆木质纤维素预处理和农田土壤重金属淋洗修复方面的研究已有报道,如氨基酸类离子液体对土壤中重金属Cd具有良好的淋洗作用,Cd去除率最高可达55.4%^[22-23]。叶面喷施甘氨酸调控水稻离子通道活性及Cd转运特性的研究目前未见报道。氨基乙酸又名甘氨酸(Glycine),可以直接用于嘌呤的生物合成,为嘌呤环提供两个碳原子和一个氮原子,也是细胞内抗氧化剂谷胱甘肽的组成因子,在神经信号传递、维持细胞氧化还原平衡、调控离子通道活性和细胞应激反应的灵敏性等方面发挥着重要的基础作用^[24-25]。本研究以水溶性更强的离子液体氯化氨基乙酸作为叶面调理剂,通过水稻盆栽试验,研究氯化氨基乙酸对水稻各器官重金属Cd以及必需元素含量的影响,并对其降Cd效果和作用机理进行分析,旨在为新型降Cd叶面肥的研发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 植物材料和试验设计

盆栽试验在农业农村部环境保护科研监测所人工智能温室($39^{\circ}05' \text{N}$, $117^{\circ}09' \text{E}$)内进行。供试土壤为湖南省重金属污染农田0~20 cm的表层土,具体理化性质见表1。试验水稻品种为湘早籼24号(X24),供试种子用5%双氧水浸泡30 min后用去离子水清洗干净,均匀铺至育苗盘内,在30℃避光条件下发

表1 土壤基本理化性质

Table 1 The basic physicochemical properties of soil

pH	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	阳离子交换量 CEC/(cmol·kg ⁻¹)	K/(g·kg ⁻¹)	Mg/(g·kg ⁻¹)	Ca/(g·kg ⁻¹)	Fe/(g·kg ⁻¹)	Mn/(mg·kg ⁻¹)	Zn/(mg·kg ⁻¹)	Cd/(mg·kg ⁻¹)
5.31±0.06	39.25±0.13	21.83±0.35	0.88±0.04	0.31±0.01	0.13±0.01	6.87±0.20	39.96±3.49	45.95±1.59	2.04±0.24

芽2 d,将发芽的种子用 Hoagland 溶液在蛭石中培养 28 d。待水稻幼苗长至两叶一心时,将水稻幼苗移至人工智能温室塑料盆中。

盆栽试验共包括 6 个处理,分别为在水稻开花期叶面喷施 0(对照)、0.1、0.2、0.3、0.5、0.8 mmol·L⁻¹ 的氯化氨基乙酸水溶液,共喷施两次,两次之间间隔 1 d,每个处理重复 3 次。在水稻成熟期收取水稻植株和根系周围表层土壤,将根与表土分离。将根系样品用去离子水洗涤 3 次后,在 70 ℃ 下干燥 72 h 待测。收获的植株样品分为 12 个部分:籽粒、穗轴、倒一节(穗节)、倒二节、倒一节间(穗颈)、倒二节间、倒一叶(旗叶)、倒二叶、倒一叶鞘、倒二叶鞘、茎基部和根。

1.2 Cd、K、Ca、Mg、Fe、Mn 和 Zn 浓度的测定

准确称取水稻籽粒样品 0.50 g 或其他部位的样品 0.25 g 倒入聚四氟消煮管中,再加入 7.0 mL MOS 级硝酸后静置 5 h,利用 ED54 电热消解仪在 110 ℃ 条件下消解 2.5 h 后冷却,再加入 1.0 mL 优级纯双氧水,继续保持 110 ℃ 消解 1.5 h 后升温至 170 ℃ 赶酸。赶酸结束后,将消煮液转入 25 mL 容量瓶并定容,定容后消解液转入 25 mL 方瓶中保存待测。采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS, Agilent 7500a, 美国)测定消解液中不同植物样品的 Cd、K、Ca、Mg、Fe、Mn 和 Zn 含量。

1.3 总氨基酸的测定

准确称取稻米粉末 0.25 g 置于玻璃试管内,在该试管中加入 15.0 mL 浓度为 6 mol·L⁻¹ 的盐酸溶液,先将该试管在冰浴条件下冷却 5 min,然后在试管中充入过量高纯氮气后迅速拧紧盖子,再将试管放入恒温鼓风干燥箱中在 110 ℃ 下加热消解 22 h,消解结束后将试管取出将消解液冷却至室温并过滤,最后将消解液定容至 50.0 mL。取定容后的消解液 1.0 mL 于液谱进样瓶中并在 50 ℃ 水浴条件下用氮气吹干,在进样瓶中再加入 1.0 mL 去离子水重复氮吹一次。最后,在进样瓶中加入 2.0 mL (pH=2.2) 的柠檬酸钠缓冲液,经 0.22 μm 滤膜过滤。取 20.0 μL 过滤后的消解液与 50.0 μL 0.4 mol·L⁻¹ 硼酸盐缓冲液(pH=10.2)充分混合均匀进行衍生化反应至 1 min,再加入 10.0 μL OPA

试剂,充分混合至 3 min,得到的衍生物利用高效液相色谱仪(Agilent Technologies, 1200 series, 美国)进行水稻样品总氨基酸的测定。

仪器与试剂:高效液相色谱仪 HPLC(Agilent, 1200 Series), 色谱柱为 AdvanceBio AAA (100 mm×4.6 mm, 2.7 μm, 美国 Agilent) 氨基酸分析柱; Milli-Q 超纯水制备系统(美国 Millipore 公司); MTN-2800W 氮吹仪(天津奥特赛恩斯仪器有限公司)。甲醇、乙腈、Na₂HPO₄、Na₂B₄O₇、HCl(色谱纯)、NaN₃[色谱纯,赛默飞世尔科技(中国)有限公司]; 混合氨基酸标准品(分析纯,中国计量科学研究院); 硼酸缓冲液(pH=10.2, 分析纯)、OPA 衍生化试剂(含 OPA、3-巯基丙酸和 0.4 mol·L⁻¹ 硼酸缓冲液)(美国安捷伦科技有限公司); 柠檬酸钠缓冲液(pH=2.2, 分析纯,上海麦克林生化科技有限公司)。液谱进样量为 20.0 μL, 柱温箱温度设为 30 ℃, 流动相配比采用乙腈: 甲醇: 水=4.5:4.5:1, 流速为 1.0 mL·min⁻¹, 根据标准样品的峰序列保留时间和峰面积分析样品中氨基酸进行定量分析。

1.4 氧化损伤的测定

H₂DCFDA 是一种通用的氧化应激指示剂,具细胞膜渗透性,可与细胞内多种活性氧物质包括过氧化氢(H₂O₂)、过氧基(ROO·)和过氧亚硝基阴离子(ONOO⁻)等发生反应,用以表征细胞氧化还原程度。

在水稻开花期喷施氯化氨基乙酸溶液后第 7 天,收取水稻新鲜的旗叶和根系样品,将样品浸泡于 10 μmol·L⁻¹ 的 H₂DCFDA 溶液中,在 25 ℃ 室温条件下避光孵育 2 h,取出样品用灭菌水清洗 3 次。再将样品放入 20% 甘油中保存,待观察检测。将样品固定于载玻片中,使用倒置生物显微镜(测维光电 LWD300-38LT)于 488 nm 处观察样品绿色荧光强弱以表征重金属胁迫条件下 H₂O₂ 的产生量。

1.5 数据统计及分析

转移系数(TF_{ab})为 a 器官 Cd 含量与 b 器官 Cd 含量之比。

试验数据均为 3 次重复的平均值,所有数据均以平均值±标准差的形式表示。数据分析采用单因素

方差分析(ANOVA)和Duncan检验多重比较, $P<0.05$ 表示处理间差异显著。数据采用 Origin 2018 和 Excel 2021 进行处理并完成绘图,采用 SPSS 26 软件进行显著性统计分析。

2 结果与分析

2.1 对水稻产量及各器官Cd含量的影响

叶面喷施氯化氨基乙酸可以增加稻谷的产量(表2)。与对照处理相比,水稻开花期喷施 $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯化氨基乙酸时,水稻结实率最高,增加 1.19%。水稻不同器官间Cd含量存在较大差异,地上部各器官中的Cd含量远低于地下部Cd含量。根中Cd含量较高,为 $2.23\sim 3.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。地上部倒一节Cd含量最高。籽粒中Cd含量明显低于穗轴,叶中Cd含量普遍低于叶鞘(图1)。水稻各器官中Cd含量的大小顺序为根>节>茎基部>叶鞘>节间>叶>穗轴>籽粒。

总体而言,水稻各器官Cd含量随氯化氨基乙酸喷施浓度的增加而降低。叶面喷施 $0.1\sim 0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氯化氨基乙酸可有效降低籽粒和穗轴中的Cd含量,其中 $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯化氨基乙酸对Cd在籽粒中的抑制效率高于 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯化氨基乙酸(图1A),籽粒中的Cd含量从 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $0.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,降幅为 39.29%。喷施 $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯化氨基乙酸显著降低穗轴、倒一叶、倒二叶、倒二叶鞘、倒一节和倒二节Cd含量,降幅分别为 33.68%、62.91%、58.20%、69.26%、25.92% 和 56.28%(图1)。

Cd胁迫下水稻会产生活性氧物质(ROS),而叶面喷施氯化氨基乙酸溶液可以缓解Cd对水稻的氧化胁迫。图2为荧光显微镜观察到的叶面喷施不同浓度氯化氨基乙酸对缓解Cd对水稻旗叶和根系造成的

氧化损伤。在Cd污染土壤中,水稻叶片和根部ROS的积累对细胞造成了氧化损伤,绿色荧光部分代表 H_2O_2 的存在(图2)。通过对水稻根和旗叶进行 H_2DCFDA 染色可见,未喷施氯化氨基乙酸时,在叶片和根尖中显示强绿色荧光(图2A1和图2B1),随氯化氨基乙酸浓度的增加,水稻叶细胞和根细胞中绿色荧光积累明显减弱,表明 H_2O_2 的含量逐渐降低。喷施 $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯化氨基乙酸后,叶片和根尖细胞显示非常微弱或没有绿色荧光,表明该浓度氯化氨基乙酸有效缓解了Cd胁迫对水稻叶片和根系造成的氧化损伤(图2A6和图2B6)。

2.2 对Cd转移系数的影响

叶面喷施氯化氨基乙酸有效降低了各器官中Cd含量,进而也影响了Cd在相邻器官间的转移效率。Cd由穗轴到籽粒、穗节到倒一节间、茎基部到倒二节间的转移系数远低于由倒二节间到倒一节间和由根到茎基部的转移系数(图3)。

氯化氨基乙酸减少了Cd在水稻籽粒、穗轴和倒一节间的积累,显著降低了Cd由倒二节间向上的转移效率。与对照相比,喷施 $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯化氨基乙酸减少了Cd由穗轴向籽粒、穗节向穗颈、倒二节间向倒一节间、茎基部向倒二节间、根向茎基部的转移,降幅分别为 7.49%、26.40%、20.16%、38.95% 和 28.42%。

2.3 对水稻必需元素和Cd含量的影响

水稻籽粒和穗轴中K、Mg、Ca、Fe、Mn、Zn和Cd的含量结果(表3)表明,喷施氯化氨基乙酸对水稻籽粒和穗轴中必需元素含量影响较小,但对籽粒和穗轴中Cd含量影响较大。K是水稻籽粒和穗轴中含量最高的阳离子,籽粒和穗轴中K含量范围分别为 $3.31\sim 3.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $21.40\sim 22.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Mg含量在籽粒中

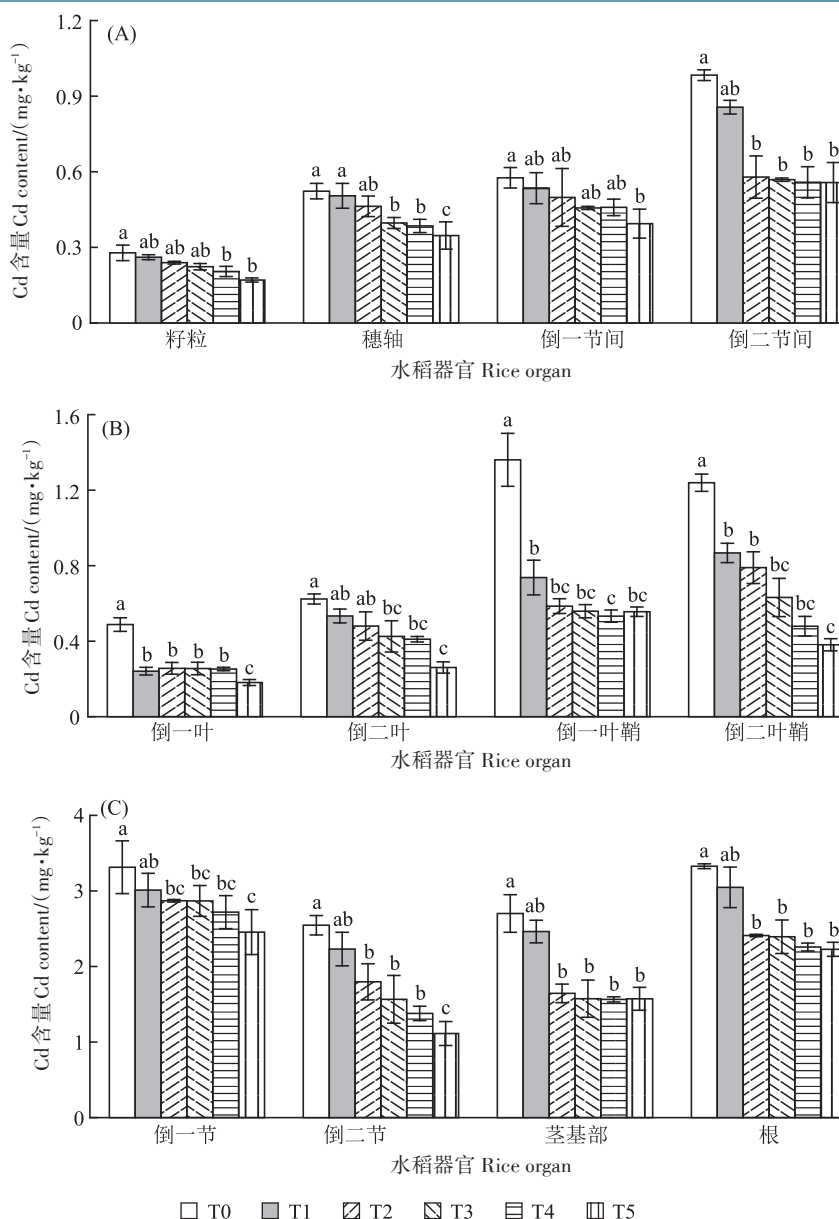
表2 不同处理水稻产量及其构成因素

Table 2 Rice yields and their constituent factors in different treatments

处理 Treatment	穗数/(穗·盆 ⁻¹) Panicle number/(panicle·pot ⁻¹)	每穗粒数 Number of grains per spike	结实率 Fructification percentage/%	千粒质量 Thousand grain mass/g	产量/(g·盆 ⁻¹) Yield/(g·pot ⁻¹)
T0	14.67±0.58a	41.33±1.53c	74.69±2.03a	17.03±0.65ab	10.32±0.53a
T1	14.83±1.04a	41.67±0.71c	74.98±1.13a	17.19±0.31a	10.62±0.75a
T2	14.50±0.50a	42.33±0.58c	75.22±2.46a	16.94±0.48ab	10.40±0.55a
T3	14.83±0.29a	42.67±0.58bc	75.31±1.12a	16.79±0.13abc	10.63±0.17a
T4	15.00±1.00a	44.00±1.00ab	75.47±1.54a	16.31±0.45bc	10.76±0.76a
T5	14.90±0.17a	44.33±0.58a	75.58±1.74a	16.06±0.28c	10.61±0.24a

注:T0、T1、T2、T3、T4和T5分别代表开花期叶面施用0、0.1、0.2、0.3、0.5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氯化氨基乙酸处理。不同小写字母表示处理间差异达到5%显著水平。下同。

Note: T0, T1, T2, T3, T4 and T5 represent chlorinated amino acetic acid treatments at the foliar level of 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. Different lowercase letters indicate significant difference among different genotypes at 5% level. The same below.



T0、T1、T2、T3、T4和T5分别代表开花期叶面施用0、0.1、0.2、0.3、0.5 mmol·L⁻¹和0.8 mmol·L⁻¹的氯化氨基乙酸处理,不同小写字母表示处理间差异达到5%显著水平。下同。

T0, T1, T2, T3, T4 and T5 represent chlorinated amino acetic acid treatments at the foliar level of 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 mmol·L⁻¹ and 0.8 mmol·L⁻¹, respectively. Different lowercase letters indicate significant difference among different genotypes at 5% level. The same below.

图1 氯化氨基乙酸对水稻各器官Cd含量的影响

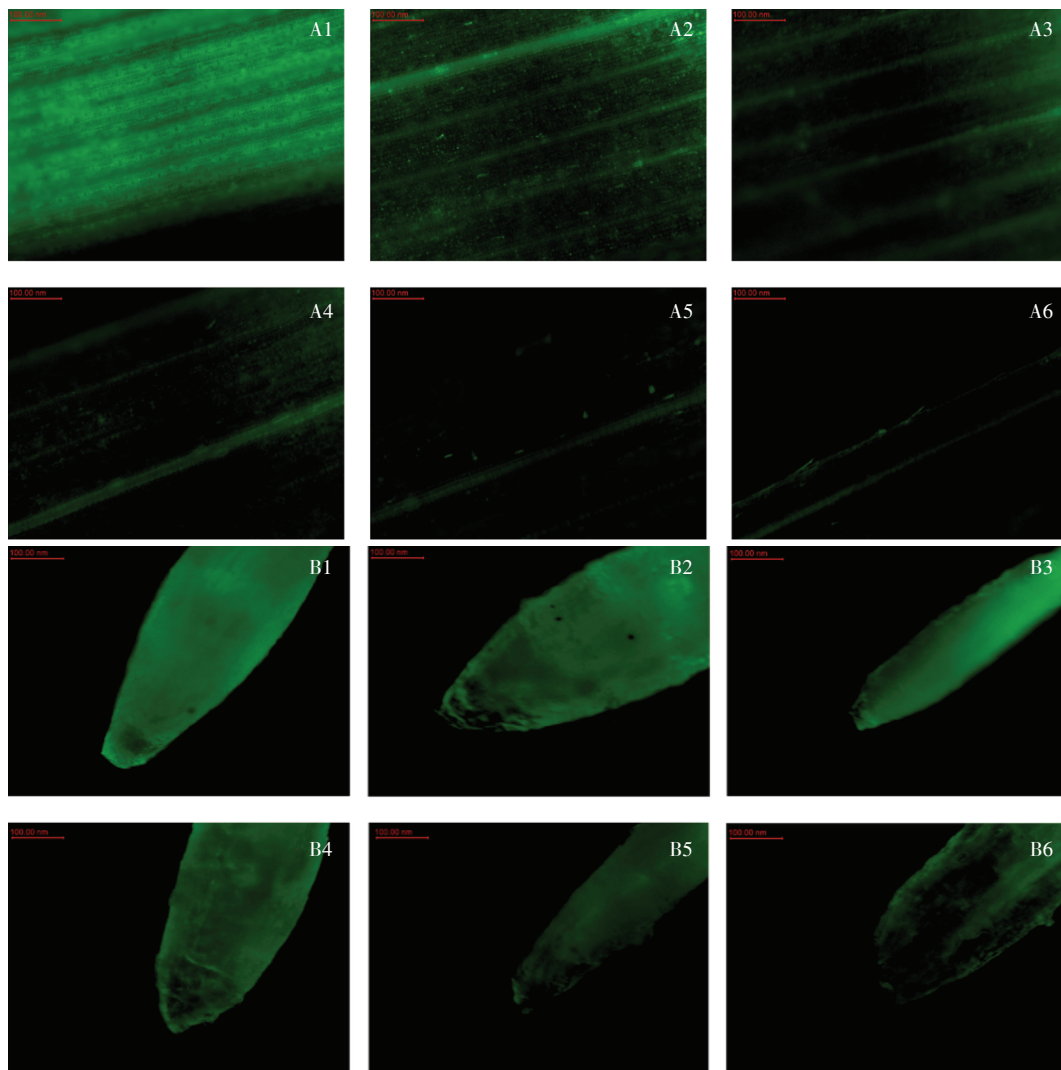
Figure 1 Effects of chlorinated amino acetic acid on Cd content in various organs of rice

居第二,为0.95~1.26 g·kg⁻¹。穗轴中Ca和Mg含量相近,仅次于K含量。水稻籽粒中Fe、Mn、Zn的含量在23.75~89.00 mg·kg⁻¹之间,远低于K和Mg的含量。

K、Mg、Ca、Fe、Mn、Zn、Cd在水稻各器官间分布差异显著。Cd在水稻根系中含量最高,为2.23~3.33 mg·kg⁻¹。除Cd外,K、Mg、Mn、Zn这4种元素均在植株节中积累量高,在籽粒和根系中积累量低;而Fe在植株根部中积累量最高,其次为茎基部。Ca在倒一

叶和倒二叶中积累量高,籽粒中积累量最低。K在倒二节间含量最高,倒一节含量仅次于倒二节间。Mg在倒一节含量最高,而茎基部含量最低。Mn在倒一叶、倒二叶和倒二节中含量显著高于其他器官。Zn在倒二节中含量为237.35~451.22 mg·kg⁻¹,而在籽粒中含量为24.12~27.23 mg·kg⁻¹(图4)。

叶面喷施不同浓度氯化氨基乙酸对K、Mg、Mn、Zn、Ca在籽粒、穗轴、倒一节和根系中分布的影响有



A1、B1、A2、B2、A3、B3、A4、B4、A5、B5、A6、B6 分别代表开花期叶面施用量为 0、0.1、0.2、0.3、0.5 mmol·L⁻¹ 和 0.8 mmol·L⁻¹ 的氯化氨基乙酸处理。A1、B1; A2、B2; A3、B3; A4、B4; A5、B5 和 A6、B6 represent chlorinated amino acetic acid treatments at the foliar level of 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 mmol·L⁻¹ and 0.8 mmol·L⁻¹, respectively.

图2 水稻叶片(A)和水稻根系(B)的H₂O₂分布情况

Figure 2 H₂O₂ distribution of rice leaves(A) and rice roots(B)

所不同。叶面喷施 0.8 mmol·L⁻¹ 氯化氨基乙酸时,水稻籽粒 Cd 含量受到显著抑制, Ca 含量下降, K、Mn、Zn 在籽粒中积累量无显著变化。Mg 和 Mn 在根系中积累量明显提升, 增幅分别为 35.50% 和 26.01%。倒一节 Mn 和 Zn 含量显著下降, 降幅分别为 15.08% 和 43.47%。

2.4 对水稻籽粒总氨基酸含量的影响

叶面喷施氯化氨基乙酸可以增加水稻籽粒中多种氨基酸含量。其中, 天冬氨酸、谷氨酸、丝氨酸、组氨酸、甘氨酸、苏氨酸、精氨酸、丙氨酸、酪氨酸和胱氨酸属于非必需氨基酸(图 5A), 缬氨酸、甲硫氨酸、苯丙氨酸、异亮氨酸、亮氨酸和赖氨酸属于必需氨基酸(图

5B)。喷施氯化氨基乙酸后, 谷氨酸是水稻籽粒中含量最高的氨基酸, 含量可达 17.40 g·kg⁻¹。其次是胱氨酸和天冬氨酸, 甘氨酸在籽粒中含量最低。必需氨基酸中缬氨酸含量最高, 在 5.58~8.11 g·kg⁻¹ 之间。

在 16 种氨基酸中, 谷氨酸和天冬氨酸对 Cd 胁迫的敏感性高于其他氨基酸, 并且其含量随着水稻籽粒中 Cd 含量的减少呈现出显著上升的趋势。叶面喷施 0.8 mmol·L⁻¹ 氯化氨基乙酸时, 水稻籽粒多种氨基酸含量增幅较大, 天冬氨酸、谷氨酸、胱氨酸、缬氨酸和苯丙氨酸含量分别增加 28.54%、22.96%、40.77%、45.24% 和 49.22%; 但甘氨酸含量减少, 降幅为 51.92%。施加不同浓度氯化氨基乙酸时, 与对照处

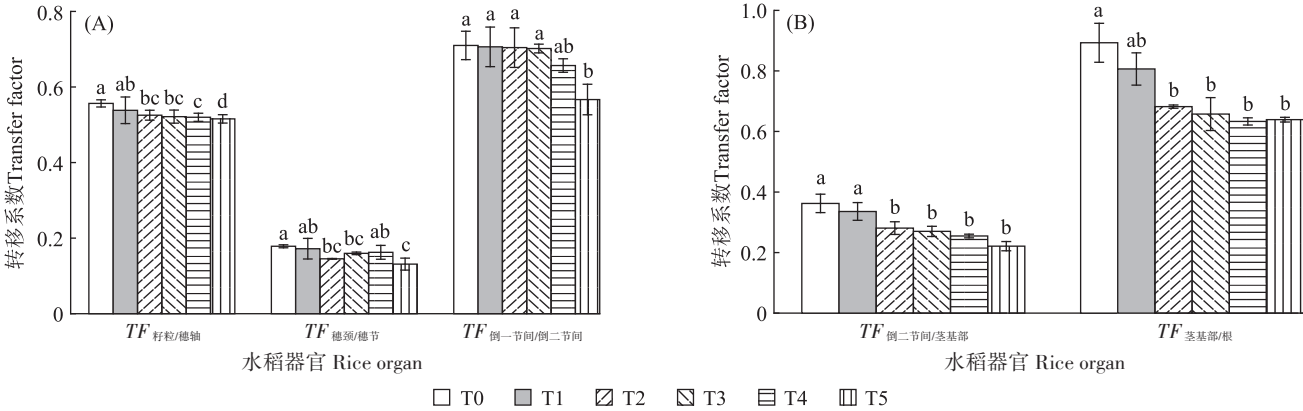


图3 氯化氨基乙酸对水稻相邻器官Cd转移系数的影响

Figure 3 Effects of chlorinated amino acetic acid on Cd transfer factor in adjacent organs of rice

表3 氯化氨基乙酸对籽粒和穗轴必需元素的影响

Table 3 Effects of chlorinated amino acetic acid on essential elements in grain and rachis

处理 Treatment		K/(g·kg ⁻¹)	Mg/(g·kg ⁻¹)	Ca/(g·kg ⁻¹)	Fe/(g·kg ⁻¹)	Mn/(mg·kg ⁻¹)	Zn/(mg·kg ⁻¹)	Cd/(mg·kg ⁻¹)
籽粒 Grain	T0	3.73±0.14a	1.11±0.02b	0.49±0.05a	0.089±0.005a	37.21±1.44ab	27.23±2.82a	0.278±0.031a
	T1	3.71±0.05a	1.17±0.01ab	0.41±0.04a	0.058±0.002a	34.38±3.35b	23.75±2.60a	0.261±0.010ab
	T2	3.62±0.8ab	0.95±0.06c	0.42±0.28a	0.080±0.011a	35.25±2.92b	24.12±2.87a	0.239±0.005ab
	T3	3.31±0.03b	1.20±0.09ab	0.45±0.03a	0.072±0.004a	43.15±2.51a	24.32±1.54a	0.223±0.013ab
	T4	3.90±0.24a	1.23±0.03ab	0.51±0.03a	0.069±0.006a	33.47±2.64b	26.12±1.71a	0.204±0.020b
	T5	3.57±0.06ab	1.26±0.03a	0.47±0.03a	0.085±0.012a	37.55±4.73ab	26.55±1.30a	0.170±0.008b
穗轴 Rachis	T0	21.40±0.64a	2.21±0.14a	2.41±0.23a	0.326±0.001a	155.41±0.02a	44.61±3.56ab	0.523±0.031a
	T1	21.54±0.56a	2.18±0.10a	1.86±0.11b	0.181±0.013b	90.89±1.85b	40.21±1.40abc	0.505±0.049a
	T2	22.65±2.02a	2.23±0.15a	2.14±0.15ab	0.354±0.035a	107.14±3.08b	36.44±3.70bc	0.463±0.041ab
	T3	21.77±1.26a	2.39±0.15a	2.40±0.24a	0.220±0.016ab	159.26±2.05a	33.59±0.99c	0.397±0.022b
	T4	22.38±0.98a	2.17±0.12a	2.21±0.17ab	0.297±0.013ab	99.39±1.87b	46.64±4.73a	0.385±0.026b
	T5	21.62±0.16a	2.14±0.19a	2.28±0.20ab	0.293±0.026ab	97.81±7.13b	38.60±3.22abc	0.347±0.054c

理相比,酪氨酸、亮氨酸含量无显著差异。0.8 mmol·L⁻¹氯化氨基乙酸比0.1 mmol·L⁻¹氯化氨基乙酸对水稻籽粒中氨基酸的影响更大。

3 讨论

根系是水稻第一个接触不同根际环境的器官,也是吸收养分和重金属的最重要的器官之一^[26]。根中的重金属主要通过木质部运输,而这些重金属在水稻籽粒中的积累主要通过韧皮部进行^[27]。本试验结果表明,根和节是X24吸收和运输Cd的最关键器官,其Cd含量最高。各器官中Cd平均含量为根>节>茎基部>叶鞘>节间>叶。水稻生殖器官中Cd平均含量为穗轴>籽粒,其中籽粒Cd含量与穗轴、节、叶鞘和叶Cd含量呈正相关。Cd从营养器官向籽粒中的再迁移过程是水稻籽粒中Cd的重要来源^[28]。叶和叶鞘向籽

粒韧皮部转运Cd的过程是影响籽粒Cd含量最重要的因素,茎节对Cd从根部向籽粒的转运过程也起了关键拦截作用^[29]。水稻从孕穗期到成熟期,从叶片输送到籽粒中的Cd占籽粒总Cd含量的22.5%~30.0%^[30]。因此,水稻开花期叶面喷施氯化氨基乙酸可以通过固定水稻叶片和茎节中的Cd来缓解Cd毒性,从而显著降低水稻籽粒中的Cd含量。

大量和微量营养元素的叶面施用已被证明对植物发育有益。水稻不同器官中必需元素的含量存在显著差异,这是由元素在水稻吸收和水稻内的转运差异引起的。在植物的吸收和转运过程中,必需元素与Cd之间存在拮抗作用。Fe可以通过吸附或共沉淀将Cd螯合在根表面,从而影响根际中Cd的生物利用度,减少水稻对Cd的吸收^[31]。Mn可以影响水稻中一些具有相似离子半径和与配体结合强度的必需元素

	K/(g·kg ⁻¹)						Mg/(g·kg ⁻¹)						Ca/(g·kg ⁻¹)					
	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T0	T1	T2	T3	T4	T5
籽粒	3.73	3.70	3.62	3.31	3.90	3.57	1.112	1.167	0.946	1.201	1.231	1.256	0.492	0.405	0.421	0.454	0.506	0.470
穗轴	21.40	21.54	22.65	21.77	22.38	21.62	2.213	2.180	2.234	2.389	2.170	2.136	2.405	1.855	2.138	2.395	2.213	2.275
倒一节	53.43	53.25	58.87	45.43	58.07	49.03	3.301	2.321	2.676	3.013	2.341	3.188	2.077	2.268	2.038	2.223	2.139	2.019
倒二节	51.67	27.03	54.28	21.43	39.92	35.48	1.886	1.958	1.682	2.098	2.157	2.020	1.032	0.953	1.089	1.027	1.483	1.010
倒一节间	32.80	34.36	33.96	35.48	37.07	35.19	2.280	2.244	2.122	2.590	2.207	2.441	1.018	1.105	0.891	0.977	0.979	0.951
倒二节间	57.77	53.87	56.54	60.55	56.60	53.72	1.169	1.310	1.185	1.214	1.236	1.536	1.224	1.247	1.329	1.347	1.322	1.306
倒一叶	9.16	8.63	9.64	9.19	9.06	9.06	2.058	1.968	2.242	2.012	1.983	2.087	6.193	5.678	5.843	5.557	6.672	6.395
倒二叶	10.06	8.38	9.08	6.52	8.97	9.59	2.196	2.095	2.254	2.057	2.121	2.280	5.941	4.141	5.690	5.456	5.813	6.283
倒一叶鞘	16.78	13.74	12.16	14.06	10.82	14.13	2.133	2.148	2.242	2.318	2.068	2.247	4.557	3.631	3.878	3.764	3.342	4.004
倒二叶鞘	17.73	16.83	15.63	16.69	14.41	14.17	2.309	2.274	2.164	2.148	2.201	2.270	2.979	2.681	2.709	2.442	2.729	2.612
茎基部	3.15	2.48	1.66	2.59	1.24	2.26	1.058	0.986	0.869	1.153	1.038	1.014	2.543	2.322	2.188	2.250	2.796	2.780
根	1.78	1.39	1.76	2.35	1.81	1.87	1.518	1.322	2.078	1.938	2.391	2.057	3.314	2.848	3.587	3.466	3.557	3.123

	Fe/(g·kg ⁻¹)						Mn/(mg·kg ⁻¹)						Zn/(mg·kg ⁻¹)					
	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T0	T1	T2	T3	T4	T5
籽粒	0.089	0.058	0.080	0.072	0.069	0.085	37.22	34.38	35.25	43.15	33.47	37.55	27.23	23.75	24.12	24.32	26.12	26.55
穗轴	0.326	0.181	0.354	0.220	0.297	0.293	155.41	90.88	107.14	159.26	99.39	97.81	44.61	40.21	36.44	33.59	46.64	38.60
倒一节	0.990	0.745	0.788	0.570	0.750	0.791	296.94	297.71	279.01	339.15	240.53	252.14	218.64	193.89	185.29	190.72	149.89	123.59
倒二节	1.200	0.893	0.885	0.954	1.174	1.198	552.16	548.63	512.82	695.10	501.90	528.81	317.63	371.48	237.35	451.22	314.42	319.11
倒一节间	0.234	0.229	0.306	0.286	0.271	0.225	140.33	142.03	153.63	183.88	137.43	125.08	50.09	62.62	47.72	60.35	56.06	53.82
倒二节间	0.181	0.231	0.187	0.189	0.270	0.340	131.82	162.26	153.77	154.60	130.13	125.34	58.88	61.08	77.02	84.21	77.46	76.32
倒一叶	0.311	0.225	0.284	0.253	0.357	0.263	775.23	619.79	711.34	714.65	662.65	746.37	41.80	32.67	48.63	37.13	54.56	40.67
倒二叶	0.380	0.308	0.368	0.341	0.374	0.313	676.10	386.95	530.48	487.82	570.64	641.93	34.09	32.73	43.12	32.12	60.06	34.36
倒一叶鞘	0.385	0.219	0.339	0.280	0.203	0.360	316.72	313.67	244.59	409.74	226.29	345.14	39.03	46.61	46.73	46.40	45.50	36.42
倒二叶鞘	0.586	0.389	0.419	0.449	0.476	0.473	361.20	365.51	365.63	469.81	307.10	356.32	42.37	52.69	49.32	59.04	59.36	45.35
茎基部	36.197	34.181	33.278	24.644	23.378	20.477	267.90	196.75	264.52	184.57	209.21	264.19	130.45	121.77	132.24	137.73	134.94	155.78
根	37.534	38.638	37.804	41.796	41.879	37.583	264.02	367.99	311.02	259.18	338.14	332.68	64.57	50.72	44.33	66.02	51.54	50.03

图4 氯化氨基乙酸对水稻不同器官中必需元素分布的影响

Figure 4 Effects of chlorinated amino acetic acid on the distribution of essential elements in different organs of rice

的吸收,如Ca、Mg、Fe^[32]。调节Ca、Mn比可能是一种缓解Cd对水稻毒性的特殊方法^[17]。大多数阳离子通过非选择性阳离子通道进入植物体内的过程属于被动吸收,这些阳离子之间存在相互竞争的关系^[33-34]。本研究发现Cd含量的降低通常伴随着水稻穗轴中Ca和Mn的减少,氯化氨基乙酸对K和Mg在根系中积累的增强作用大于在籽粒中的增强作用。

氨基酸能够为植物和土壤生物的发育和生长提供必要的能量和分子构件,参与植物发育过程中生物和非生物胁迫反应^[35-36]。植物中的总氨基酸和游离氨基酸对于缓解重金属对水稻的毒性至关重要^[4]。

谷氨酸和甘氨酸作为谷胱甘肽和植物螯合素的前体,分别参与了水稻抗氧化过程和缓解重金属毒性的过程^[37-39]。本研究发现叶面喷施氯化氨基乙酸后,水稻籽粒中天冬氨酸、谷氨酸、苯丙氨酸和亮氨酸的含量增加。谷氨酸可以提高水稻对Cd的耐受性,减少Cd在水稻中的积累,体现为可以减少Cd从根向地上部转移和Cd的转运,改善水稻叶绿素生物合成^[40]。甘氨酸参与植物氮代谢的调节,在Cd胁迫下,甘氨酸能提高植物幼苗的抗氧化能力和硝酸还原酶活性,从而提高幼苗对Cd胁迫的耐受性^[41]。谷氨酸和天冬氨酸能与Cd形成稳定的螯合物,是缓解Cd毒性最有效的

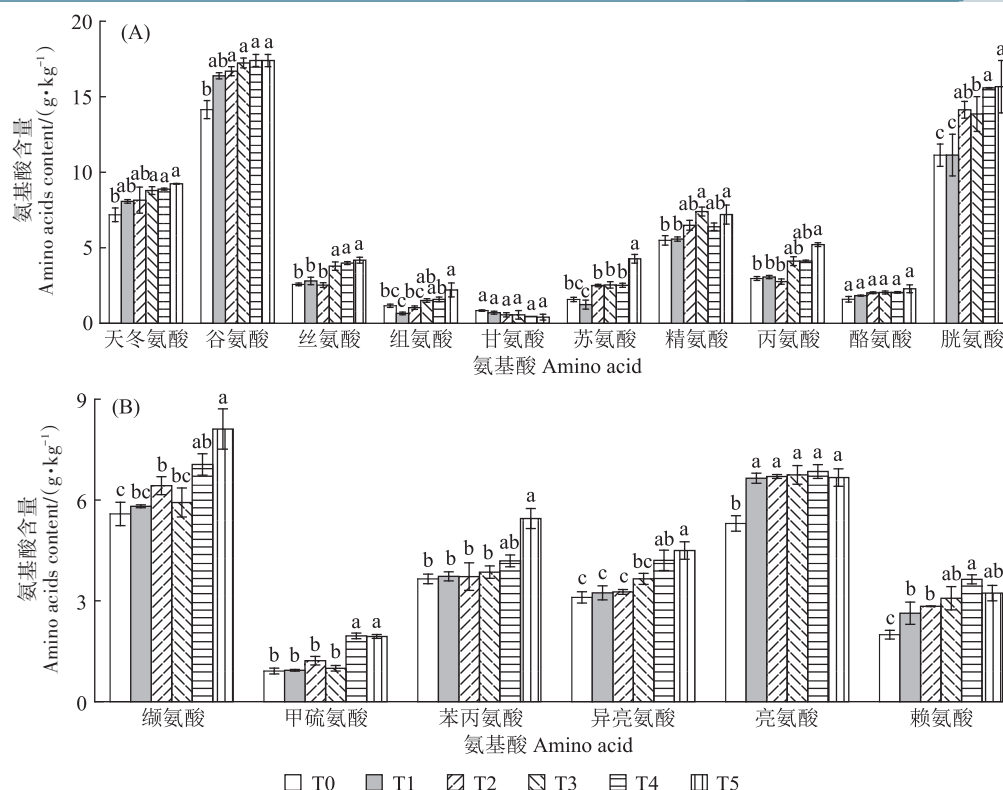


图5 氯化氨基乙酸对水稻籽粒非必需氨基酸(A)和必需氨基酸(B)含量的影响

Figure 5 Effects of chlorinated amino acetic acid on the content of non-essential amino acids(A) and essential amino acids(B) in rice grains

氨基酸分子,它们与Cd的协同作用可以有效消除Cd对稻谷正常代谢的威胁^[42]。

4 结论

(1)在水稻开花期喷施一定浓度氯化氨基乙酸水溶液能显著抑制重金属Cd在水稻体内的转运过程,减少Cd在营养器官中的积累,从而减少稻米Cd含量。即喷施氯化氨基乙酸可以促进水稻根系和茎节等营养器官对Cd的拦截,使籽粒中Cd含量从 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $0.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(2)水稻叶面喷施氯化氨基乙酸会对水稻各器官中K、Mg、Ca、Fe、Mn、Zn的含量产生影响,尤其是氯化氨基乙酸显著促进了K、Mg和Zn等元素从水稻倒一节向穗轴的转移过程,显著提升了稻米品质。

(3)水稻叶面喷施氯化氨基乙酸促进了籽粒中天冬氨酸和谷氨酸的合成,降低了甘氨酸含量;缓解了Cd对水稻的氧化损伤,降低了Cd在水稻体内的活性。

参考文献:

[1] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等.《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689-1692. CHEN N C,

ZHENG Y J, HE X F, et al. Analysis of the Report on the national general survey of soil contamination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1689-1692.

[2] 刘仲齐,张长波,黄永春. 水稻各器官镉阻控功能的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 721-727. LIU Z Q, ZHANG C B, HUANG Y C. Research advance on the functions of rice organs in cadmium inhibition: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 721-727.

[3] 黄永春,张长波,任兴华,等. 土壤和茎基部镉含量对稻米镉污染风险的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 989-999. HUANG Y C, ZHANG C B, REN X H, et al. Effects of cadmium content in soil and stem base on cadmium pollution risk of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 989-999.

[4] JIANG M, JIANG J, LI S, et al. Glutamate alleviates cadmium toxicity in rice via suppressing cadmium uptake and translocation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 384: 121319.

[5] ÅKESSON A, INSTITUTET K, SWEDEN S. Cadmium exposure in the environment: Renal effects and the benchmark dose[J]. *Encyclopedia of Environmental Health*, 2011, 1: 465-473.

[6] 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.

[7] 尹晓辉,邹慧玲,方雅瑜,等. 施锰方式对水稻吸收积累镉的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(8): 8-12. YIN X H, ZOU H L,

- FANG Y Y, et al. Effects of manganese fertilizer on absorption and accumulation of Cd in rice[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(8):8-12.
- [8] 向焱赞, 伍湘, 张小毅, 等. 叶面阻控剂对水稻吸收和转运镉的影响研究进展[J]. 作物研究, 2020, 34(3):290-296. XIANG Y Y, WU X, ZHANG X Y, et al. Advances in the study of the influence of foliar control agent on absorption and transportation of cadmium in rice[J]. *Crop Research*, 2020, 34(3):290-296.
- [9] CHEN R, ZHANG C B, ZHAO Y L, 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, 25:2361-2368.
- [10] 于焕云, 崔江虎, 乔江海, 等. 稻田镉砷污染阻控原理与技术应用[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7):1418-1426. YU H Y, CUI J H, QIAO J T, et al. Principle and technique of arsenic and cadmium pollution control in paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7):1418-1426.
- [11] 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 等. 钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(3):1491-1497. YAN D M, GUO Z H, HUANG F L, et al. Effect of calcium magnesium phosphate on remediation paddy soil contaminated with cadmium using lime and sepiolite[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3):1491-1497.
- [12] 徐颖菲, 谢国雄, 章明奎. 改良剂配合水分管理减少水稻吸收土壤中镉的研究[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6):356-360. XU Y F, XIE G X, ZHANG M K. Study on reducing cadmium uptake by rice in soil by modifier combined with water management[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6):356-360.
- [13] YANG X R, WANG C R, HUANG Y C, et al. Foliar application of the sulfhydryl compound 2, 3-dimercaptosuccinic acid inhibits cadmium, lead, and arsenic accumulation in rice grains by promoting heavy metal immobilization in flag leaves[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 285:117355.
- [14] 张昕, 张长波, 黄永春, 等. 水稻营养器官镉积累特性对稻米镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4):707-715. ZHANG X, ZHANG C B, HUANG Y C, et al. Effects of characteristics of cadmium accumulation in vegetative organs on cadmium content in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(4):707-715.
- [15] 刘雅萍, 王常荣, 任兴华, 等. 叶施谷胱甘肽对水稻镉和矿质元素含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9):1864-1874. LIU Y P, WANG C R, REN X H, et al. Effects of glutathione foliar application on Cd and mineral elements in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(9):1864-1874.
- [16] 张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 等. 叶施L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(8):4045-4051. ZHANG Y H, WANG C R, LIU Y M, et al. Foliar application of L-cysteine: Effects on the concentration of Cd and mineral elements in rice[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(8):4045-4052.
- [17] XUE W J, ZHANG C B, WANG P P, et al. Rice vegetative organs alleviate cadmium toxicity by altering the chemical forms of cadmium and increasing the ratio of calcium to manganese[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 184:109640.
- [18] YUAN K, WANG C R, ZHANG C B, et al. Rice grains alleviate cadmium toxicity by expending glutamate and increasing manganese in the cadmium contaminated farmland[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 262:114236.
- [19] ZHAO Y L, ZHANG C B, WANG C R, et al. Increasing phosphate inhibits cadmium uptake in plants and promotes synthesis of amino acids in grains of rice[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 257:113496.
- [20] 王惠君, 薛卫杰, 张昕, 等. 叶面喷施苹果酸对水稻Cd积累特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2):269-278. WANG H J, XUE W J, ZHANG X, et al. Effects of foliar application with malic acid on the accumulation of cadmium in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2):269-278.
- [21] 张烁, 陆仲烟, 唐琦, 等. 水稻叶面调理剂的降镉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 S, LU Z Y, TANG Q, 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.
- [22] 季蒙蒙, 王星星, 马欢欢, 等. 磷酸氨基酸盐对镉污染土壤的淋洗效果[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2):329-337. JI M M, WANG X X, MA H H, et al. Removal of Cd from contaminated soil using amino acid salt[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2):329-337.
- [23] MA H H, BEADHAM I, RUAN W Q, et al. Enhancing rice straw compost with an amino acid-derived ionic liquid as additive[J]. *Biore-source Technology*, 2022, 345:126387.
- [24] ZEILHOFER H U, ACUNA M A, GINGRAS J, et al. Glycine receptors and glycine transporters: Targets for novel analgesics[J]. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2018, 75:447-465.
- [25] AMELIO I, CUTRUZZOLA F, ANTONOV A, et al. Serine and glycine metabolism in cancer[J]. *Trends in Biochemical Sciences*, 2014, 39(4):191-198.
- [26] LI T, YANG X, LU L, et al. Effects of zinc and cadmium interactions on root morphology and metal translocation in a hyperaccumulating species under hydroponic conditions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 169(1/2/3):734-741.
- [27] SATORU I, YASUHIRO I, MASATO I, et al. Ion-beam irradiation, gene identification, and marker-assisted breeding in the development of low-cadmium rice[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(47):19166-19171.
- [28] RODDA M S, LI G, REID R J. The timing of grain Cd accumulation in rice plants: The relative importance of remobilisation within the plant and root Cd uptake post-flowering[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347(1/2):105-114.
- [29] LUO Q H, BAI B, XIE Y H, et al. Effects of Cd uptake, translocation and redistribution in different hybrid rice varieties on grain Cd concentration[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 240:113683.
- [30] ZHOU H, ZHU W, YANG W T, et al. Cadmium uptake, accumulation, and remobilization in iron plaque and rice tissues at different growth stages[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 152:

- 91–97.
- [31] WANG X, YAO H, WONG M H, et al. Dynamic changes in radial oxygen loss and iron plaque formation and their effects on Cd and as accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Geochemistry and Health Volume*, 2013, 35: 779–788.
- [32] MILLALEO R, REYES-DIAZ M, ALBERDI M, et al. Excess manganese differentially inhibits photosystem I versus II in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(1): 343–354.
- [33] DEMIDEHIK V, MAATHUIS F J. Physiological roles of nonselective cation channels in plants: From salt stress to signalling and development [J]. *New Phytologist*, 2010, 175(3): 387–404.
- [34] HAN X X, ZHANG C B, WANG C R, et al. Gadolinium inhibits cadmium transport by blocking non-selective cation channels in rice seedlings [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 179: 160–166.
- [35] ZHAO L, HUANG Y, PAGLIA K, et al. Metabolomics reveals the molecular mechanisms of copper induced cucumber leaf (*Cucumis sativus*) senescence [J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 52(12): 7092–7100.
- [36] GALILI G, AMIR R R, FERNIE A R. The regulation of essential amino acid synthesis and accumulation in plants [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2016, 67(1): 153–157.
- [37] ZHANG Y, HE S, ZHANG Z, et al. Glycine transformation induces repartition of cadmium and lead in soil constituents [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 251: 930–937.
- [38] YANG Y, WANG W, HUANG T, et al. Transgenesis of Tol2-mediated seamlessly constructed BAC mammary gland expression vectors in *Mus musculus* [J]. *Journal of Biotechnology*, 2016, 218(3): 66–72.
- [39] LEE H, LEE J, WI S, et al. Exogenously applied glutamic acid confers improved yield through increased photosynthesis efficiency and antioxidant defense system under chilling stress condition in *Solanum lycopersicum* L. cv. Dotaerang Dia [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 277: 109817.
- [40] 孙弘, 刘合刚, 崔谨谨, 等. 外源甘氨酸对镉胁迫下苜蓿幼苗生长和氧化损伤的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(5): 1022–1025. SUN H, LIU H G, CUI J J, et al. Effect of exogenous Gly on the growth and oxidative damage of alfalfa seedling under Cd stress [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(5): 1022–1025.
- [41] XUE W J, ZHANG C B, HUANG Y C, et al. Rice organs concentrate cadmium by chelation of amino acids containing dicarboxyl groups and enhance risks to human and environmental health in Cd-contaminated areas [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 426: 128130.
- [42] GUO J K, ZHOU R, REN X H, et al. Effects of salicylic acid, epibrassinolide and calcium on stress alleviation and Cd accumulation in tomato plants [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 157: 491–496.

(责任编辑:朱晓昱)