

粒肥施用时间对双季稻乳熟期亚细胞镉分布的影响

张玉盛, 张小毅, 肖欢, 敖和军, 向焱赞, 田伟, 肖峰

引用本文:

张玉盛, 张小毅, 肖欢, 等. 粒肥施用时间对双季稻乳熟期亚细胞镉分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1402–1410.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1443>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氮肥对双季稻根表铁膜形成及双季稻镉积累的影响

张玉盛, 周亮, 肖欢, 匡瑜, 敖和军, 田伟, 肖峰, 向焱赞, 张小毅

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 260–268 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0873>

辽宁省种不同基因型水稻对镉吸收差异的研究

张儒德, 李军, 秦利, 韩颖, 孟博, 黄元财

农业环境科学学报. 2016, 35(5): 842–849 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.05.004>

磷对水稻镉的亚细胞分布及化学形态的影响

李桃, 李军, 韩颖, 耿杰, 薛飞, 陈凯

农业环境科学学报. 2017, 36(9): 1712–1718 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0267>

硅对镉胁迫条件下两个水稻品种镉亚细胞分布、非蛋白巯基物质含量的影响

李江遐, 张军, 马友华, 蔡慢弟, 高飞

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1066–1071 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0928>

锌对粳稻幼苗镉吸收转运特性的影响

尹洁, 赵艳玲, 徐薇, 高子平, 崔冠男, 王景安, 刘仲齐

农业环境科学学报. 2016, 35(5): 834–841 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.05.003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张玉盛, 张小毅, 肖欢, 等. 粒肥施用时间对双季稻乳熟期亚细胞镉分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1402–1410.
ZHANG Y S, ZHANG X Y, XIAO H, et al. Effect of the application period of granular fertilizer on the subcellular cadmium distribution of double-season rice at the milky stage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(7): 1402–1410.



开放科学 OSID

粒肥施用时间对双季稻乳熟期亚细胞镉分布的影响

张玉盛^{1,2}, 张小毅^{1,2}, 肖欢^{1,2}, 敖和军^{1,2*}, 向焱赞^{1,2}, 田伟^{1,2}, 肖峰^{1,2}

(1. 湖南农业大学农学院, 长沙 410128; 2. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128)

摘要:为探究水稻生育后期施氮对双季稻乳熟期植株亚细胞镉分布及成熟期糙米镉积累的影响,开展大田试验,选取早稻株两优819(低镉积累品种)、陆两优996(高镉积累品种)和晚稻湘晚粳12号(低镉积累品种)、玉针香(高镉积累品种)为试验材料,设置3个后期施氮时期处理,分别为始穗期施氮、齐穗期施氮、灌浆期施氮,并以后期不施氮为对照。试验结果表明,后期不施氮情况下,水稻根、叶细胞镉分布表现为细胞壁>细胞液>细胞器,后期施氮处理下不同稻季根、叶亚细胞各组分镉分配比例存在较大差异,早稻品种根、叶乳熟期细胞壁和细胞液镉分配比例降低,细胞器分配比例提高,低镉积累品种株两优819根细胞壁和细胞液镉含量显著高于高镉积累品种陆两优996;晚稻品种乳熟期根、叶细胞壁和细胞液镉分配比例提高,细胞器镉分配比例降低。根细胞壁中镉分配比例与细胞器和细胞液中镉分配比例极显著负相关($P<0.01$),根细胞壁镉分配比例与镉的转运系数极显著负相关($P<0.01$),根细胞器中镉分配比例与镉的转运系数极显著正相关($P<0.01$)。始穗期施氮,株两优819糙米镉含量显著降低28.57%;齐穗期施氮,陆两优996、玉针香糙米镉含量分别显著降低38.46%、48.15%,湘晚粳12号糙米镉含量降低10.00%;灌浆期施氮会提高糙米镉含量。水稻生育后期是籽粒镉积累的关键时期,水稻齐穗期施氮可显著降低高镉积累品种糙米镉含量。

关键词: 双季稻; 镉; 氮肥; 生育后期; 亚细胞

中图分类号: S511.42; X503.231 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)07-1402-09 doi:10.11654/jaes.2020-1443

Effect of the application period of granular fertilizer on the subcellular cadmium distribution of double-season rice at the milky stage

ZHANG Yusheng^{1,2}, ZHANG Xiaoyi^{1,2}, XIAO Huan^{1,2}, AO Hejun^{1,2*}, XIANG Yanyun^{1,2}, TIAN Wei^{1,2}, XIAO Feng^{1,2}

(1. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. South Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil in China, Changsha 410128, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effect of nitrogen application during the late growth period of rice on subcellular cadmium (Cd) distribution in double-season rice plants at the milky stage and Cd accumulation in brown rice at the maturity stage. A field experiment was conducted to select early rice plants Zhuliangyou 819 (low Cd accumulation) and Luliangyou 996 (high Cd accumulation), and late rice Xiangwanxian 12 hao (low Cd accumulation) and Yuzhenxiang (high Cd accumulation) as the test materials. Three nitrogen application periods during the late period were established at the initial heading stage, full heading stage, and filling stage. A treatment without nitrogen application was used as the control. The results showed that Cd distribution in the roots and leaf cells of the rice in the control treatment was cell wall > cytosol > organelle, and the Cd distribution in the root and leaf subcellular fractions of the different rice seasons differed greatly with nitrogen application. For early rice varieties, the Cd distribution ratio in the roots and leaf cell wall and cytosol at the leaf milky stage decreased and the distribution ratio of organelles increased. Cd content in the root cell wall and cytosol of the low Cd accumulating variety Zhuliangyou 819 was significantly higher than that of the high Cd accumulating variety Luliangyou 996. The Cd

收稿日期: 2020-12-15 录用日期: 2021-03-24

作者简介: 张玉盛(1992—),男,福建龙岩人,博士研究生,从事农艺措施治理水稻重金属污染研究。E-mail: zhangys9210@163.com

*通信作者: 敖和军 E-mail: aohejun@126.com

基金项目: 国家水稻产业技术体系栽培与土肥岗位专家项目(CARS-01)

Project supported: The China Agriculture Research System(CARS-01)

distribution ratio in the roots and leaf cell wall and cytosol of the late rice varieties at the milky stage increased and the Cd distribution ratio in the organelles decreased. The Cd distribution ratio in the root cell wall was negatively correlated with the Cd distribution ratio in the organelles and cytosol ($P<0.01$), and the Cd distribution ratio in the root cell wall was negatively correlated with the transport coefficient of Cd ($P<0.01$), whereas the Cd distribution ratio in the root organelle was positively correlated with the transport coefficient of Cd ($P<0.01$). The Cd content of brown rice was significantly decreased by 28.57% with the application of nitrogen at the initial heading stage in Zhuliangyou 819, significantly decreased by 38.46% and 48.15% with the application of nitrogen at the full heading stage in Luliangyou 996 and Yuzhenxiang, respectively, and decreased by 10.00% in Xiangwanxian 12 hao. The Cd content of brown rice was increased with the application of nitrogen at the filling stage. The late growth period of rice is a critical period for grain Cd accumulation, and nitrogen application during the full heading stage of rice can significantly decrease the Cd content of brown rice in high Cd accumulating varieties.

Keywords: double season rice; cadmium; nitrogen fertilizer; late growth stage; subcellular

重金属镉(Cadmium, Cd)具有高毒性和迁移性,易被水稻吸收积累,通过食物链途径进入人体,危害人体健康。开展水稻镉低积累调控技术研究,对镉污染稻田水稻安全生产具有十分重要的意义。近几十年来,科研工作者就如何减少水稻镉积累开展了大量研究,并取得了可喜的成果。研究发现,营养调控^[1-2]、土壤镉钝化^[3]、生物修复^[4]、品种筛选^[5]等措施可降低水稻镉吸收和积累。其中,营养调控被认为是最经济、有效的降低作物镉积累的方法^[6-7]。氮肥是农业生产中使用最多的肥料,氮在植物生长和发育过程中起着重要的作用,是植物主要营养物质和限制作物生长的最常见因子。氮肥调控作物镉的吸收、转运和积累,表现为:影响土壤理化性质,进而影响重金属迁移性和生物有效性;氮进入作物体内后,从分子、生化、细胞和整株(生物量和产量)等水平机制来平衡重金属毒性^[8-9]。氮素营养对作物镉吸收表现为促进还是抑制作用与氮肥形态和剂量有关^[10-11]。赵晶等^[10]研究发现,施用氮肥较无肥处理均增加小麦对镉的吸收,不同氮肥处理之间存在显著差异,其中 NH_4Cl 对小麦吸收镉的促进作用最强,其次是 NH_4NO_3 和高量尿素处理,低量尿素处理和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 处理小麦吸收镉最少。甲卡拉铁等^[11]研究发现,不同氮肥对水稻增产效应呈现为尿素 $>(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4>\text{NH}_4\text{Cl}>\text{NH}_4\text{NO}_3$,相比于尿素、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 , NH_4Cl 能显著增加水稻镉含量,并促进镉由秸秆向籽粒中转移;适量的尿素能显著降低籽粒镉含量,而不施尿素和高量尿素显著提高籽粒镉含量。杨锚^[12]研究发现, NH_4Cl 处理、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 处理相比尿素处理显著增加水稻单株镉积累量,而 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 处理降低水稻单株镉积累量,但与尿素处理间差异不显著。

水稻生育后期(抽穗以后)是籽粒镉积累的关键时期^[13]。前期贮存在茎、叶等器官中的镉,在籽粒灌

浆-成熟阶段通过“搭便车”的方式被输送至籽粒中,此外,后期根系吸收土壤中的镉也可被快速运输至籽粒^[13-14]。有学者认为,在水稻镉积累关键时期采用适当的农艺措施降低土壤有效态镉含量及根系向上运输总量,即可有效降低糙米镉含量^[13,15-16]。依据水稻生育后期对镉的吸收和转运特性,并结合前期研究结果,发现通过后期适量施氮可降低水稻镉积累^[17]。本研究在此基础上进一步开展生育后期施氮控制水稻镉积累研究,试图建立通过后期施氮来调控水稻镉积累的农艺栽培技术。

1 材料与方法

1.1 试验品种与试验设计

试验于2018年在湖南省浏阳市岩溪镇花园村进行,土壤类型为第四纪红壤发育的红黄泥水稻土、壤土,理化性状为:pH 5.48,有机质 $20.11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全镉含量 $1.62\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效镉含量 $0.80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。分别选用早稻株两优819和陆两优996、晚稻湘晚粳12号和玉针香为供试材料,经湖南杂交水稻研究中心筛选验证^[5],株两优819、湘晚粳12号为低镉积累品种,陆两优996、玉针香为高镉积累品种。

根据前期大田试验结果^[17],双季稻全生育期施氮量 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,以后期施氮量为总氮量的20%,设3个后期施氮时期处理和后期不施氮对照处理。处理1(F1)、处理2(F2)和处理3(F3)分别在始穗期、齐穗期(始穗后9 d)和灌浆期(齐穗后9 d)施氮,基肥:穗肥:粒肥均为6:2:2;对照(CK)为后期不施氮处理,基肥:穗肥:粒肥为8:2:0,每个处理3次重复。水稻移栽前翻耕后反复多次耙平、耙匀,以减小试验小区间土壤镉含量的差异。小区随机排列,面积为 $8\text{ m}\times 8\text{ m}=64\text{ m}^2$,各小区间田埂覆膜以防肥水串灌。每个小区单独排灌。早稻收获后,在原有小区内用小型打田机

翻耕均匀后种植晚稻,早稻于3月22日播种,4月23日移栽,7月15日收获,株行距为16.6 cm×16.6 cm,晚稻于6月22日播种,7月18日移栽,10月30日收获,株行距为16.6 cm×20.0 cm。采用常规水肥管理,试验期间水稻施用氮肥180 kg·hm⁻²(尿素,N 46.4%)、磷肥90 kg·hm⁻²(过磷酸钙,P₂O₅ 12%)、钾肥144 kg·hm⁻²(氯化钾,K₂O 60%)。氮肥按试验基追肥比例在不同时期施用,磷肥一次性基施,钾肥于移栽前1~2 d和幼穗分化始期各施50%,早稻试验期间保持浅水层淹水灌溉(2~3 cm水层),不晒田,晚稻收割前7 d停止灌水,其余时期与早稻保持一致,其他栽培管理措施与当地习惯保持一致。

1.2 测定方法

1.2.1 亚细胞组分镉含量测定

采集乳熟期水稻植株鲜样用蒸馏水和超纯水洗净后用滤纸吸干表面水分,称取4 g根系、茎、叶,剪成1~2 mm²,按料液比1:10加入配制预冷的250 mmol·L⁻¹蔗糖、50 mmol·L⁻¹ Tris-HCl、1 mmol·L⁻¹ DTT共20 mL冰浴研磨至匀浆,再加20 mL冲洗研钵,匀浆与冲洗液同置于50 mL离心管中。采用差速离心,4℃、3 000 r·min离心15 min得到沉淀部分为细胞壁组分;将上清液以4℃、12 000 r·min离心15 min得到沉淀部分为细胞器组分;上清液为细胞液。混酸湿法(V_{HNO₃}:V_{HClO₄}=4:1)消解后采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 7700x, USA)测定各组分镉含量^[1]。

1.2.2 植株镉含量测定

在水稻乳熟期、成熟期共进行2次取样,避开小区边3行,采集田间长势一致的植株5穴,用自来水洗净根部与地上部,蒸馏水和超纯水润洗,晾干表面水分后,乳熟期植株分成根、茎、叶、穗四部分,成熟期分成根、茎叶、谷粒三部分,分别装入信封中,然后放入烘箱110℃杀青30 min,80℃烘干至恒质量,谷粒去糙,所有样品粉碎后过筛密封保存。混酸湿法(V_{HNO₃}:V_{HClO₄}=4:1)消解后,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 7700x, USA)测定镉含量。

1.3 数据处理

水稻成熟期根系、茎叶向籽粒转移镉的能力用转运系数(TF)表示。

$TF_{根-茎叶} = \frac{\text{茎叶镉含量}}{\text{根镉含量}} \times 100\%$, $TF_{茎叶-糙米} = \frac{\text{糙米镉含量}}{\text{茎叶镉含量}} \times 100\%$, $TF_{根-糙米} = \frac{\text{糙米镉含量}}{\text{根镉含量}} \times 100\%$ ^[15]。

采用Excel 2016和SPSS 25.0进行数据整理统计分析和相关性分析,多重比较采用Duncan法,相关性

分析采用Pearson法。采用Excel 2016作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻各时期不同部位镉含量及成熟期镉转移系数和产量的影响

2.1.1 早稻

除成熟期根和茎叶镉含量外,处理对乳熟期和成熟期各部位镉含量、镉转运系数和产量影响显著,而镉转运系数受品种、处理和品种互作影响不显著(表1)。由表1可知,株两优819乳熟期根、茎在不同处理下均有所提高,其中F2处理乳熟期根、茎镉显著高于其他处理,穗镉含量最低,F1和F3处理则表现为叶镉含量显著降低,穗镉含量提高。至成熟期,糙米镉含量在F1处理下显著降低28.57%,F3处理下提高14.29%。结合成熟期镉转运系数,说明施用粒肥可促进株两优819根系对镉的吸收并向地上部转运,F1处理糙米镉含量显著降低,可能是因其产量显著提高,而“稀释”了糙米中镉含量。

不同时期施用粒肥对陆两优996乳熟期根镉含量都没有显著影响,从陆两优996地上部镉含量来看,茎镉含量在F1处理下最高,显著高于F2、F3处理,叶和穗镉含量在F3处理下显著高于其他处理。成熟期根、糙米镉含量在F3处理下显著高于其他处理,茎叶镉含量显著高于CK、F2处理,其中F3处理糙米显著较CK提高92.31%,在F1和F2处理下则分别降低23.08%、38.46%。其可能原因为,相比于F1和F2处理,F3处理产量无显著变化,但其根系和茎叶中镉向籽粒的转运系数提高,致使其糙米镉含量显著提高。

2.1.2 晚稻

对晚稻而言,处理对乳熟期叶镉含量、产量影响不显著,品种对乳熟期根、茎和成熟期茎叶镉含量影响不显著,处理和品种互作对乳熟期根、叶镉含量及成熟期TF_{根-糙米}影响不显著(表2)。不同时期施用粒肥可降低湘晚籼12号乳熟期各部位镉含量,且随粒肥施用时间的推移呈逐渐降低的趋势,尤其是叶和穗,两者镉含量较CK显著降低(表2)。湘晚籼12号糙米镉含量表现为F1>F3>CK>F2,F1处理显著较CK提高30.00%,F2处理较CK降低10.00%。究其原因,F1处理在乳熟期穗中已积累较高量的镉,在成熟期阶段,镉转运作用大于灌浆充实对籽粒镉的“稀释效应”,而F3处理产量显著提高,“稀释效应”增强,另外,其根和茎叶中镉向糙米中转运也低于CK。

玉针香乳熟期根、茎镉含量在粒肥处理下显著降低,分别降低39.57%~58.30%和48.78%~64.22%,且随粒肥施用时间推移,其降镉效应减弱。与湘晚粳12号不同之处在于,粒肥处理显著提高了叶中镉含量77.78%~88.89%,即将更多的镉暂时“贮存”于叶当中,而后随叶衰老而重新分配转运至籽粒中。糙米镉含量在F2处理下较CK显著降低48.15%,F3处理较F1、F2处理显著提高47.62%~121.43%,较CK提高14.84%。从产量角度来看,F1和F2处理产量与CK相比差异未达到显著水平,但根和茎叶中积累的镉低于CK,糙米中分配得到的镉随之减少,而F3则反之,这

可能是处理间糙米镉含量存在较大差异的原因。

2.2 后期施氮对双季稻乳熟期亚细胞各组分镉含量的影响

2.2.1 早稻

由表3可知,早稻乳熟期根和叶细胞壁和细胞器镉含量受处理影响显著,品种对根细胞壁和细胞液镉含量及叶细胞器镉含量影响显著,处理和品种互作仅对根细胞液镉含量无显著影响,对根亚细胞其他组分和叶细胞各组分镉含量影响显著。镉在根亚细胞的分布整体上表现为细胞壁>细胞液>细胞器,且各分组的镉含量大于地上部分对应组分。株两优819根

表1 早稻不同时期各部位镉含量及成熟期镉转运系数和产量

Table 1 Cd content of early rice of different parts in different stages and Cd transfer coefficient and yield in maturity stage

品种 Cultivars	处理 Treatments	镉含量Cd content/(mg·kg ⁻¹)							镉转运系数Cd transfer coefficient/%			产量 Yield/ (t·hm ⁻²)
		乳熟期Milky stage				成熟期Maturity stage			TF _{根-茎叶}	TF _{茎叶-糙米}	TF _{根-糙米}	
		根Root	茎Shoot	叶Leaf	穗Panicle	根Root	茎叶Shoot	糙米Brown rice	TF _{根-Shoot}	TF _{Shoot-Brown rice}	TF _{Root-Brown rice}	
株两优819 Zhuliangyou 819	CK	1.25±0.18b	0.22±0.02b	0.14±0.00a	0.09±0.01bc	2.81±0.12a	0.24±0.02ab	0.07±0.01a	8.62±1.19a	29.61±2.46ab	2.54±0.30b	6.03±0.07b
	F1	1.58±0.07b	0.30±0.05b	0.10±0.01b	0.15±0.01ab	1.89±0.30bc	0.25±0.03ab	0.05±0.01b	13.87±3.05a	19.99±4.22b	2.74±0.81b	6.87±0.13a
	F2	2.31±0.33a	0.69±0.11a	0.15±0.02a	0.06±0.01c	2.42±0.41ab	0.28±0.02a	0.07±0.01a	12.05±2.90a	25.11±2.72b	3.10±1.10ab	5.98±0.32b
	F3	1.39±0.13b	0.22±0.03b	0.10±0.00b	0.20±0.06a	1.68±0.17c	0.20±0.03b	0.08±0.01a	11.81±0.60a	40.43±8.33a	4.73±0.79a	5.93±0.38b
陆两优996 Luliangyou 996	CK	2.71±0.13a	0.25±0.03ab	0.14±0.03b	0.13±0.01b	1.35±0.03bc	0.28±0.04b	0.13±0.02b	21.03±2.32b	47.30±4.03ab	9.98±1.56ab	7.91±0.19a
	F1	2.67±0.42a	0.33±0.03a	0.15±0.03b	0.14±0.01b	1.37±0.15b	0.34±0.01ab	0.10±0.01bc	25.40±3.25ab	29.97±3.03bc	7.65±1.53b	7.02±0.56ab
	F2	3.17±0.49a	0.19±0.04b	0.11±0.02b	0.15±0.02b	1.02±0.10c	0.31±0.00b	0.08±0.01c	30.60±3.22a	26.46±2.24c	8.14±1.35ab	6.61±0.51b
	F3	3.65±0.84a	0.21±0.04b	0.37±0.06a	0.24±0.03a	2.01±0.30a	0.41±0.06a	0.25±0.03a	20.57±0.09b	62.74±15.79a	12.92±3.31a	6.87±0.51ab
	处理T	**	**	**	**	—	—	**	**	**	**	*
	品种C	**	**	**	—	**	**	**	—	—	—	**
	处理×品种T×C	**	**	**	**	**	**	**	—	—	—	*

注:同列中不同小写字母表示同一品种、同一器官、不同处理间差异显著($P<0.05$),*和**分别代表在0.05和0.01水平上显著相关。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different treatments in the same cultivar and organ ($P<0.05$), * and ** indicate significant correlations at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same below.

表2 晚稻不同时期各部位镉含量及成熟期镉转运系数和产量

Table 2 Cd content of late rice of different parts in different stages and Cd transfer coefficient and yield in maturity stage

品种 Cultivars	处理 Treatments	镉含量Cd content/(mg·kg ⁻¹)							镉转运系数Cd transfer coefficient/%			产量 Yield/ (t·hm ⁻²)
		乳熟期Milky stage				成熟期Maturity stage			TF _{根-茎叶}	TF _{茎叶-糙米}	TF _{根-糙米}	
		根Root	茎Shoot	叶Leaf	穗Panicle	根Root	茎叶Shoot	糙米Brown rice	TF _{根-Shoot}	TF _{Shoot-Brown rice}	TF _{Root-Brown rice}	
湘晚粳12号 Xiangwanxian 12hao	CK	5.68±0.15a	0.77±0.04a	0.12±0.02a	0.15±0.01a	5.65±1.17c	0.57±0.07c	0.10±0.00b	11.84±1.70b	18.11±2.40b	2.12±0.23a	6.22±0.48b
	F1	4.90±0.26ab	0.74±0.15a	0.07±0.02b	0.14±0.01b	7.57±0.84b	0.52±0.03c	0.13±0.02a	6.85±0.38c	25.83±2.39a	1.76±0.07b	6.56±0.31ab
	F2	3.80±0.41b	0.69±0.15a	0.05±0.01c	0.07±0.02c	4.79±0.15c	0.78±0.11b	0.09±0.00b	16.39±1.48a	12.31±1.64c	1.99±0.08ab	6.26±0.27b
	F3	4.02±1.38ab	0.27±0.02b	0.04±0.00c	0.07±0.01c	10.11±1.24a	0.96±0.06a	0.11±0.01ab	9.60±0.77bc	11.02±1.03c	1.05±0.02c	7.25±0.18a
玉针香 Yuzhenxiang	CK	9.40±1.59a	1.23±0.14a	0.18±0.02b	0.01±0.00b	7.72±0.69b	0.81±0.01a	0.27±0.05ab	10.52±0.70a	33.92±6.30b	3.53±0.42a	7.60±0.24a
	F1	3.92±0.47b	0.44±0.10b	0.32±0.04a	0.01±0.00b	7.18±1.31b	0.59±0.06b	0.21±0.02bc	8.36±0.74b	36.32±7.12ab	3.09±0.87ab	7.04±0.34ab
	F2	4.52±1.01b	0.56±0.02b	0.34±0.05a	0.02±0.00a	6.46±0.87b	0.72±0.02a	0.14±0.00c	11.29±1.19a	24.93±0.80b	2.82±0.36ab	7.08±0.43ab
	F3	5.68±3.13b	0.63±0.27b	0.32±0.21a	0.01±0.00b	17.73±2.72a	0.60±0.07b	0.31±0.05a	3.44±0.40c	53.27±12.1a	1.85±0.57b	6.69±0.34b
	处理T	*	**	—	**	**	**	*	**	**	**	—
	品种C	—	—	**	**	**	—	**	**	**	**	**
	处理×品种T×C	—	**	—	**	**	**	**	**	**	—	**

细胞壁镉含量在F1~F3处理下较CK降低11.72%~62.50%,且F1<F2<F3;细胞器组分仅在F1处理下降低41.40%,F2、F3处理下显著增加50%~54.17%,而改变粒肥施用时间对细胞液组分镉含量无明显影响。陆两优996根细胞器和细胞液组分镉含量在粒肥处理下明显增加,受根细胞壁对镉固持能力的限制,致使镉向细胞器和细胞液组分转移。其中细胞器组分在F2、F3处理下与CK差异显著,细胞液组分在F1、F3处理下与CK差异显著。

叶亚细胞各组分镉含量在CK条件下表现为细胞壁>细胞液>细胞器,在粒肥处理下各组分镉含量变化较大。除细胞器F3处理下降低25.00%外,株两优819叶亚细胞各组分镉含量在粒肥处理下均有所提高。其中,叶细胞壁组分提高20.00%~280.00%,在F3处理下显著高于其他处理;细胞器组分在F1、F2处理下显著增加237.50%~262.50%;细胞液组分增加

33.33%~66.66%,F2处理与CK差异显著。施用粒肥提高了陆两优996叶细胞壁、细胞器组分镉含量,降低了细胞液镉含量,细胞壁、细胞器镉含量分别在F2、F1处理下显著高于其他处理,各处理下细胞液镉含量无显著差异。

2.2.2 晚稻

由表4可知,晚稻乳熟期根和叶亚细胞各组分镉含量受处理影响显著,品种仅对叶乳熟期细胞器镉含量影响显著,而处理和品种互作对根、叶细胞壁镉含量无显著影响,对其他两组分镉含量有显著影响。晚稻根和叶亚细胞各组分中的镉含量表现为细胞壁>细胞液>细胞器(表4)。湘晚籼12号和玉针香根亚细胞组分镉含量在粒肥处理下的变化趋势分别与株两优819和陆两优996基本保持一致,说明施用粒肥对不同稻季同一积累型水稻根亚细胞镉分布影响一致。湘晚籼12号根亚细胞各组分在F1处理下最低,细胞

表3 早稻乳熟期根、叶亚细胞镉含量(mg·kg⁻¹)
Table 3 Subcellular Cd content of early rice root and leaf at milky stage(mg·kg⁻¹)

品种 Cultivars	处理 Treatments	根 Root			叶 Leaf		
		细胞壁 Cell wall	细胞器 Organelle	细胞液 Cytosol	细胞壁 Cell wall	细胞器 Organelle	细胞液 Cytosol
株两优 819 Zhuliangyou 819	CK	1.28±0.00a	0.24±0.04b	0.33±0.07a	0.10±0.01b	0.08±0.01b	0.03±0.00b
	F1	0.48±0.10b	0.14±0.02b	0.44±0.07a	0.12±0.02b	0.29±0.06a	0.04±0.01ab
	F2	0.76±0.16b	0.37±0.07a	0.45±0.10a	0.12±0.00b	0.27±0.05a	0.05±0.01a
	F3	1.13±0.22a	0.36±0.00a	0.29±0.05a	0.38±0.05a	0.06±0.00b	0.05±0.01ab
陆两优 996 Luliangyou996	CK	0.46±0.11a	0.09±0.00c	0.16±0.01b	0.07±0.01b	0.03±0.00b	0.05±0.01a
	F1	0.53±0.09a	0.21±0.00bc	0.28±0.06a	0.09±0.02b	1.26±0.18a	0.04±0.00ab
	F2	0.56±0.01a	0.73±0.19a	0.19±0.02b	0.27±0.02a	0.05±0.01b	0.04±0.00ab
	F3	0.40±0.06a	0.38±0.02b	0.28±0.04a	0.09±0.01b	0.12±0.02b	0.04±0.00b
	处理T	**	**	—	**	**	—
	品种C	**	—	**	—	**	—
	处理×品种T×C	**	**	—	**	**	**

表4 晚稻乳熟期根、叶亚细胞镉含量(mg·kg⁻¹)
Table 4 Subcellular Cd content of late rice root and leaf at milky stage(mg·kg⁻¹)

品种 Cultivars	处理 Treatments	根 Root			叶 Leaf		
		细胞壁 Cell wall	细胞器 Organelle	细胞液 Cytosol	细胞壁 Cell wall	细胞器 Organelle	细胞液 Cytosol
湘晚籼 12 号 Xiangwanxian 12hao	CK	4.38±1.15a	0.45±0.10ab	2.21±0.06ab	0.09±0.01ab	0.03±0.01a	0.03±0.01b
	F1	2.49±0.47b	0.27±0.05b	1.11±0.31c	0.05±0.01b	0.02±0.00ab	0.04±0.01b
	F2	3.68±0.55ab	0.59±0.02a	2.63±0.58a	0.06±0.00b	0.01±0.00b	0.03±0.01b
	F3	4.04±0.33ab	0.58±0.09a	1.65±0.34bc	0.12±0.02a	0.01±0.00b	0.31±0.08a
玉针香 Yuzhenxiang	CK	6.31±0.96ab	0.18±0.04c	0.84±0.08b	0.07±0.01a	0.03±0.00b	0.03±0.00c
	F1	3.41±0.82bc	0.34±0.04bc	1.20±0.29b	0.06±0.01a	0.02±0.00b	0.05±0.01c
	F2	6.46±1.46a	0.82±0.21a	0.79±0.02b	0.08±0.02a	0.04±0.00a	0.20±0.01a
	F3	2.44±0.23c	0.54±0.04ab	3.80±0.46a	0.07±0.01a	0.02±0.00b	0.13±0.03b
	处理T	*	**	**	*	*	**
	品种C	—	—	—	—	**	—
	处理×品种T×C	—	*	**	—	**	**

器和细胞液组分镉含量较CK分别显著降低40.00%和49.77%,相比CK,F2、F3处理对根细胞各组分镉含量无明显影响。玉针香根细胞壁组分镉含量表现为F2>CK>F1>F3,F2较F1、F3处理显著增加,细胞器组分在F2处理下显著高于CK和F1,细胞液组分在F3处理下显著高于其他处理。

湘晚粳12号叶细胞壁、细胞液组分镉含量在F1、F2处理下较CK无明显变化,在F3处理下达到最高,其中F3细胞液组分较CK显著增加,这点与株两优819一致,说明灌浆期施用粒肥可提高低镉积累品种细胞壁和细胞液组分对镉的固持作用;细胞器组分在F2、F3处理下显著降低。施用粒肥对玉针香叶细胞壁组分镉含量无明显影响,细胞器镉含量在F2处理下显著增加33.33%,细胞液镉含量在F2、F3处理下亦显著增加。

2.3 后期施氮对双季稻乳熟期亚细胞各组分镉分配比例的影响

后期不施氮情况下,镉在水稻根和叶中的分配比例为细胞壁>细胞液>细胞器(株两优819叶除外),后期施氮明显改变了镉在水稻乳熟期体内亚细胞中的分配比例(图1)。株两优819、陆两优996根细胞壁中镉分配比例在粒肥处理下降低,株两优819细胞壁镉占比随氮施入时间推移呈增加趋势,陆两优则996相反。株两优819、陆两优996细胞器中镉的分配比例

分别增加0.32~7.58、8.38~37.51个百分点,其中陆两优996细胞器中镉的分配比例在F2处理时明显高于其他处理。株两优819细胞液中的镉分配比例以F1最高,F2次之,均高于CK;陆两优996细胞液中镉分配比例在F1、F3处理下高于CK。粒肥处理对镉在湘晚粳12号根系中的分配比例影响较小,镉在细胞壁中的分配比例为53.33%~64.53%,细胞液中为26.27%~31.35%,细胞器中仅有6.36%~9.20%。在CK条件下,玉针香根亚细胞各组分镉分配比例分别为86.10%、2.41%和11.48%,在F1、F3处理下细胞壁中镉占比分别降低17.11、50.09个百分点,细胞器中镉分配比例在后期施氮处理下增加4.44~7.72个百分点,细胞液中镉占比在F1、F3处理下分别增加12.68、44.57个百分点。

株两优819叶细胞壁组分镉占比在F1、F2处理下降低19.94、19.61个百分点,细胞器中镉分配比例在F1、F2处理下增加27.49、22.92个百分点;F3处理下,细胞壁组分镉占比高达77.73%,而细胞器和细胞液中镉占比则明显降低。陆两优996叶细胞壁中镉分配比例在F1、F2处理下明显提高,细胞器中镉占比在F3处理下增加30.19个百分点,细胞液镉占比在F3处理下降低17.67个百分点。湘晚粳12号、玉针香叶细胞壁、细胞器中镉分配比例在后期施氮处理下降低,细胞液中镉占比增加,湘晚粳12号、玉针香叶细

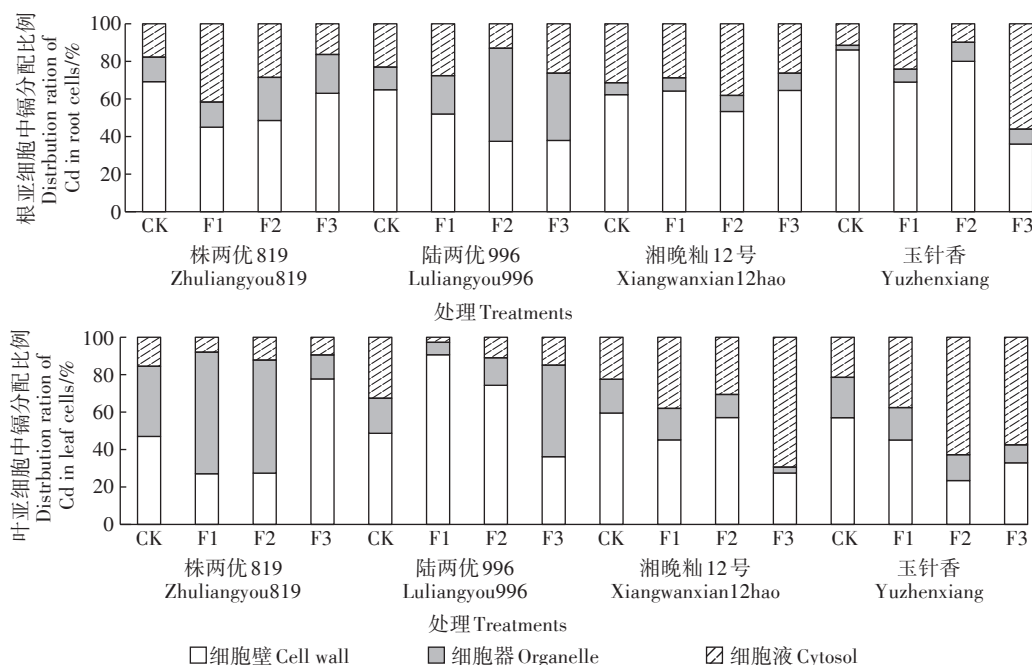


图1 水稻乳熟期根、叶细胞镉分配比例

Figure 1 Cd distribution in rice root and leaf subcellular at the milky stage

液组分镉分配比例分别在F3、F2时达到最高。

2.4 相关性分析

水稻亚细胞镉分配比例与镉转运系数和糙米镉含量之间相关分析见表5。根、叶亚细胞各组分中镉分配比例与糙米镉含量没有相关性,但与根、叶亚细胞各组分中镉分配比例之间及镉转运系数存在较好的相关性。其中,根细胞壁与根细胞器、根细胞液、叶细胞器、镉转运系数显著负相关,根细胞器与叶细胞液显著负相关,根细胞器与镉转运系数显著正相关。叶细胞壁与叶细胞器极显著负相关,叶细胞器和叶细胞液极显著负相关,叶细胞器和TF_{根-茎叶}显著正相关,叶细胞液和TF_{根-茎叶}显著负相关。TF_{根-茎叶}、TF_{茎叶-糙米}两者与TF_{根-糙米}极显著正相关,TF_{茎叶-糙米}与糙米镉含量极显著正相关。由此可知,降低根细胞器中镉分配比例有利于减少水稻植株中镉向籽粒中转移,而糙米镉含量主要取决于茎叶中镉向籽粒中转运。

3 讨论

水稻籽粒灌浆所需的光合同化产物来自于花后光合作用和开花前储存在茎和其他器官的非结构性碳水化合物,后者对籽粒产量的贡献约占1/6~1/3,其量的多寡取决于生长条件和氮素供应水平,此外,花前储存物质还是启动灌浆的重要物质基础,其转运速率和转运量对灌浆初期籽粒库的活性起重要作用^[18-19]。水稻齐穗后,生长环境中有效镉含量较低时,籽粒镉来源于前期储存在根系和茎秆中的镉和根系吸收与直接运输;生长环境中有效镉含量较丰富条

件下,籽粒镉主要来源于生长介质,少部分来自各器官的转移^[13]。灌浆时水稻物质运输、转运及合成较快,水稻根系在此阶段吸收的镉可被快速运输至籽粒中^[13]。本研究发现,不同时期施用粒肥对不同稻季低镉积累品种糙米镉含量影响存在差异,早稻低镉积累品种株两优819在始穗期施氮处理下糙米镉含量显著降低,晚稻低镉积累品种湘晚粳12号则显著提高,齐穗期和灌浆期施氮对两者糙米镉含量没有明显影响。不同稻季高镉积累品种糙米镉含量均在齐穗期施氮处理下显著降低,灌浆期施氮处理下显著提高。说明在齐穗期施氮对低镉品种糙米镉含量影响较小,但可显著降低高镉品种的糙米镉含量,在灌浆期施氮则促进稻米镉积累。

尿素施入土壤后,经土壤微生物作用生成的脲酶水解生成氨和含氮氧化物,可在短期内提高土壤pH,而后发生硝化反应,酸化土壤,使土壤中镉的活性提高^[8,20]。杨锚等^[21]研究发现,在淹水条件下,施入尿素可显著提高土壤pH值,显著降低土壤水溶态镉含量和有效态镉含量,随培养时间延长,水溶态镉含量降低幅度和土壤pH值提升幅度减弱。另有报道指出,施入适量尿素5 d后,土壤pH显著提高,而后缓慢回落趋于中性,在60 d时显著降低,土壤有效镉含量与土壤pH值呈线性负相关,籽粒镉含量显著降低^[11,22]。本研究中,F1、F2处理相比于F3处理,施氮时间前移,在尿素施入土壤后,土壤pH经历“先升后降”的变化趋势,可致使水稻在此期间镉积累量减少,进而使籽粒在灌浆至成熟阶段分配、转运得到的镉总量降低,

表5 水稻亚细胞镉分配比例与镉转运系数和糙米镉含量之间相关性分析

Table 5 Correlation analysis of distribution ration of Cd in subcellular and Cd content of brown rice and Cd transfer coefficient

	根细胞壁 Root cell wall	根细胞器 Root organelle	根细胞液 Root cytosol	叶细胞壁 Leaf cell wall	叶细胞器 Leaf organelle	叶细胞液 Leaf cytosol	TF _{根-茎叶} TF _{Root-Shoot}	TF _{茎叶-糙米} TF _{Shoot-Brown rice}	TF _{根-糙米} TF _{Root-Brown rice}	糙米镉含量 Cd content of brown rice
根细胞壁 Root cell wall	1									
根细胞器 Root organelle	-0.688**	1								
根细胞液 Root cytosol	-0.552**	-0.225	1							
叶细胞壁 Leaf cell wall	0.219	0.011	-0.288	1						
叶细胞器 Leaf organelle	-0.451*	0.286	0.235	-0.724**	1					
叶细胞液 Leaf cytosol	0.402	-0.430*	-0.009	-0.106	-0.609**	1				
TF _{根-茎叶} TF _{Root-Shoot}	-0.447**	0.693**	-0.213	-0.137	0.425*	-0.443*	1			
TF _{茎叶-糙米} TF _{Shoot-Brown rice}	-0.330*	0.426*	-0.088	0.145	-0.024	-0.117	0.054	1		
TF _{根-糙米} TF _{Root-Brown rice}	-0.473**	0.740**	-0.242	-0.032	0.266	-0.330	0.734**	0.657**	1	
糙米镉含量 Cd content of brown rice	-0.022	-0.034	0.060	0.052	-0.242	0.294	-0.276	0.652**	0.170	1

注:n=48,*和**分别表示在0.05和0.01水平上显著相关。

Note:n=48,* and ** indicate significant correlations at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

这可能是灌浆期施氮(F3)处理下,株两优819、陆两优996糙米镉含量高于始穗期(F1)和齐穗期施氮(F2)的原因之一;此外,F3处理促进了根和茎叶中的镉向籽粒转移($TF_{\text{茎叶-糙米}}$ 和 $TF_{\text{根-糙米}}$ 显著提高,表1)。对湘晚粳12号、玉针香而言,其根和茎叶中的镉向籽粒转运虽降低(表2),但因其前期积累在根、茎叶中的镉显著高于其他处理,致使籽粒在后期分配得到的镉增加。

植物对重金属的耐受性与植物对重金属的吸收运输、重金属在植物细胞各部位的分布及与体内物质的结合形态密切相关,细胞壁固持和液泡区隔化在提高植物对重金属的耐性和富集能力方面起着主要作用。养分输入对水稻细胞各组分中镉的分布影响显著^[23-27]。适量施用尿素,一方面可以在短期内降低土壤有效镉含量,降低水稻在这期间的镉积累量,另一方面,细胞壁中富含果胶、纤维素等多糖分子及羟基、羧基、醛基和磷酸基等亲金属离子的配位基团^[28],施氮可增加根细胞壁中果胶和半纤维素含量,增加金属硫蛋白、植物螯合蛋白合成酶和磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶,促进细胞壁和液泡对镉的固定、区隔化,减少镉向细胞器运输^[9]。本研究发现,在CK条件下,4个品种乳熟期根和叶细胞中镉含量和分配比例均表现为细胞壁>细胞液>细胞器,这与前人研究结果一致^[24]。在早稻季中,低镉积累品种株两优819根细胞壁、细胞液镉含量显著高于高镉积累品种陆两优996(表3),这与唐杰等^[29]研究结果一致,而晚稻季不同积累型品种根细胞各组分镉含量并无明显差异。水稻根系直接与外界环境接触,是水稻从外界环境中吸收所需养分最关键的部位,土壤中的镉可通过占用锌、铁、锰等特异度较低的阳离子通道进入植株体内,镉离子还可以通过锌、钙转运通道与锌转运蛋白和钙转运蛋白结合,以共质体途径进入根表皮细胞^[30]。进入细胞内的镉可对原生质体产生毒害作用,例如破坏叶绿体膜、破坏线粒体膜、损伤细胞核仁、抑制核糖核酸酶活性、改变RNA合成等^[31]。根系细胞壁是水稻防御镉毒害的第一道屏障,细胞器是主要生理场所,提高根细胞壁中镉分配比例,有利于减少镉向地上部的转运。本研究发现,根细胞器组分中镉分配比例与镉转运系数显著正相关(表5),始穗期施氮(F1)处理下双季稻4个品种乳熟期根细胞器组分镉含量最低;理论上讲,F1处理下糙米镉含量理应最低,而事实上,仅株两优819糙米镉含量在F1处理下相符,其原因可能为株两优819产量在F1处理下显著提高,对糙米中镉起“稀释”作用。因此,在大田生产中,可考虑从提

高水稻细胞耐镉性和产量出发,在抽穗至灌浆期间适量施氮来调控水稻籽粒镉含量。

4 结论

(1)始穗期施氮可显著降低低镉积累品种株两优819糙米镉含量,齐穗期施氮可显著降低高镉积累品种陆两优996和玉针香糙米镉含量,灌浆期施氮提高糙米镉含量。

(2)始穗期至灌浆期阶段施氮可提高水稻乳熟期根细胞器中的镉分配比例;根细胞壁中镉的分配比例与镉的转运系数显著负相关,根细胞器中镉的分配比例与镉的转运系数显著正相关。

参考文献:

- [1] 吴勇俊, 张玉盛, 杨小粉, 等. 蘖肥运筹对水稻镉吸收的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(4): 21-27. WU Y J, ZHANG Y S, YANG X F, et al. Effect of tillering fertilizer management on cadmium uptake in rice[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2019, 48(4): 21-27.
- [2] 张玉盛, 肖欢, 吴勇俊, 等. 粒肥施用时期对水稻镉积累的影响初探[J]. 华北农学报, 2020, 35(2): 144-151. ZHANG Y S, XIAO H, WU Y J, et al. Effect of application period of granular fertilizer on cadmium accumulation in rice[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(2): 144-151.
- [3] 李超, 艾绍英, 唐明灯, 等. 矿物调理剂对稻田土壤镉形态和水稻镉吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2143-2154. LI C, AI S Y, TANG M D, et al. Effects of a mineral conditioner on the forms of Cd in paddy soil and Cd uptake by rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11): 2143-2154.
- [4] 郑陶, 李廷轩, 张锡洲, 等. 水稻镉高积累品种对镉的富集特性[J]. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1492-1500. ZHENG T, LI T X, ZHANG X Z, et al. Accumulation characteristics of cadmium-accumulated rice cultivars with high cadmium accumulation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(7): 1492-1500.
- [5] 张玉烛, 方宝华, 滕振宁, 等. 应急性镉低积累水稻品种筛选与验证[J]. 湖南农业科学, 2017, 387(12): 19-25. ZHANG Y Z, FANG B H, TENG Z N, et al. Screening and verification of rice varieties with low cadmium accumulation[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017, 387(12): 19-25.
- [6] SARWAR N, SAIFULLAH U, MALHI S S, et al. Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(6): 925-937.
- [7] YANG Y J, XIONG J, CHEN R J, et al. Excessive nitrate enhances cadmium (Cd) uptake by up-regulating the expression of *OsIRT1* in rice (*Oryza sativa*) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, 122: 141-149.
- [8] 颜昌宙, 郭建华. 氮肥管理对植物镉吸收的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(7): 1466-1474. YANG C Z, GUO J H. Effects of nitrogen fertilizer management on cadmium uptake in plants[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(7): 1466-1474.
- [9] YANG Y J, XIONG J, TAO L X, et al. Regulatory mechanisms of nitro-

- gen(N) on cadmium(Cd) uptake and accumulation in plants: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 708:135186.
- [10] 赵晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同氮肥对小麦生长和吸收镉的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(1):58-62. ZHAO J, FENG W Q, QIN Y S, et al. Effects of different nitrogen fertilizers on wheat growth and cadmium uptake[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2010, 16(1):58-62.
- [11] 甲卡拉铁, 喻华, 冯文强, 等. 氮肥品种和用量对水稻产量和镉吸收的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2):281-285. JI-AKA L T, YU H, FENG W Q, et al. Effect of nitrogen fertilizer type and application rate on cadmium uptake and grain yield of paddy rice [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(2):281-285.
- [12] 杨锚. 不同氮钾肥对铅镉污染土壤铅镉有效性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2004. YANG M. Effect of several nitrogenous and potassium fertilizers on availabilities of plumbum and cadmium in plumbum or cadmium polluted soil[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2004.
- [13] 喻华, 上官宇先, 涂仕华, 等. 水稻籽粒中镉的来源[J]. 中国农业科学, 2018, 51(10):1940-1947. YU H, SHANGGUAN Y X, TU S H, et al. Sources of cadmium accumulated in rice grain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(10):1940-1947.
- [14] SHU F, 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.
- [15] 张振兴, 纪雄辉, 谢运河, 等. 水稻不同生育期施用生石灰对稻米镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10):1867-1872. ZHANG Z X, JI X H, XIE Y H, et al. Effects of quicklime application at different rice growing stage on the cadmium contents in rice grain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(10):1867-1872.
- [16] 叶长城, 陈喆, 彭鸥, 等. 不同生育期Cd胁迫对水稻生长及镉累积的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8):3201-3206. YE C C, CHEN Z, PENG O, et al. Effects of cadmium stress on growth and cadmium accumulation in rice at different growth stages[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(8):3201-3206.
- [17] 张玉盛, 肖欢, 敖和军. 齐穗期施肥对水稻镉积累的影响[J]. 中国稻米, 2019, 25(3):49-52. ZHANG Y S, XIAO H, AO H J. Effects of fertilization at full heading stage on Cd accumulation in rice[J]. *China Rice*, 2019, 25(3):49-52.
- [18] MASAKI O, YUMIKO A S, HIROE Y, et al. Characterization of high-yielding rice cultivars with different grain-filling properties to clarify limiting factors for improving grain yield[J]. *Field Crops Research*, 2018(219):139-147.
- [19] 杨建昌, 张建华. 促进稻麦同化物转运和籽粒灌浆的途径与机制[J]. 科学通报, 2018, 63(Z2):2932-2943. YANG J C, ZHANG J H. Approach and mechanism in enhancing the remobilization of assimilates and grain-filling in rice and wheat[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(Z2):2932-2943.
- [20] 李旭军, 赵鲁, 史胜红, 等. 氮肥对镉污染土壤镉氮含量变化的影响研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(6):163-168. LI X J, ZHAO L, SHI S H, et al. Effect of nitrogen fertilizer on content of Cd and N in cadmium contaminated soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(6):163-168.
- [21] 杨锚, 王火焰, 周健民, 等. 不同水分条件下几种氮肥对水稻土中外源镉转化的动态影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5):1202-1207. YANG M, WANG H Y, ZHOU J M, et al. Effects of applying nitrogen fertilizers on transformation of external cadmium in the paddy soil with different soil moisture[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5):1202-1207.
- [22] 甲卡拉铁, 喻华, 冯文强, 等. 淹水条件下不同氮磷钾肥对土壤pH和镉有效性的影响研究[J]. 环境科学, 2009, 30(11):3414-3421. JI-AKA L T, YU H, FENG W Q, et al. Effect of different N P and K fertilizers on soil pH and available Cd under water logged conditions[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(11):3414-3421.
- [23] 李桃, 李军, 韩颖, 等. 磷对水稻镉的亚细胞分布及化学形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9):1712-1718. LI T, LI J, HAN Y, et al. Effects of phosphorus on subcellular distribution and chemical speciation of cadmium in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9):1712-1718.
- [24] 潘瑶, 尹洁, 高子平, 等. 硫对水稻幼苗镉积累特性及亚细胞分布特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(3):275-281. PAN Y, YIN J, GAO Z P, et al. Effects of sulfur on the accumulation and subcellular distribution of cadmium in rice seedlings[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(3):275-281.
- [25] 李江遐, 张军, 马友华, 等. 硅对镉胁迫条件下两个水稻品种镉亚细胞分布、非蛋白巯基物质含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6):1066-1071. LI J X, ZHANG J, MA Y H, et al. Effects of silicon on cadmium accumulation and non-protein thiol content in the seedlings of two rice varieties under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6):1066-1071.
- [26] 潘智立, 李军. 硫、硅对水稻体内NPT含量及镉亚细胞分布的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(5):1253-1258. PAN Z L, LI J. The response of non-protein thiols and subcellular distribution of cadmium in rice to the sulfur and silicon[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(5):1253-1258.
- [27] 黄秋婵, 黎晓峰, 沈方科, 等. 硅对水稻幼苗镉的解毒作用及其机制研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 152(4):1307-1311. HUANG Q C, LI X F, SHEN F K, et al. Cadmium resistance improved by silicon and corresponding mechanisms in *Oryza sativa* L. seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 152(4):1307-1311.
- [28] 李芹, 张曼, 张锡洲, 等. 水稻镉安全材料分蘖期根部镉积累分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(3):443-452. LI Q, ZHANG M, ZHANG X Z, et al. Accumulation and distribution characteristics of Cd in roots of cadmium-safe rice line at tillering stage[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(3):443-452.
- [29] 唐杰, 徐强, 罗成, 等. 灌浆期镉胁迫下水稻Cd在组织细胞中的特征研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(增刊1):49-55. TANG J, XU Q, LUO C, et al. Filling stage of rice under cadmium stress Cd characteristics research in tissue cells[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(Suppl 1):49-55.
- [30] NATHALIE V, CHRISTIAN H, HENK S. Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2009, 12:364-372.
- [31] MEI J H, LEI Z H, QIU Z Z, et al. Progresses of plants response to cadmium[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 12(21):2126-2130.