



倪才英, 刘星星, 梁以豪, 等. 氨基酸肥料对水稻 Cd 含量及农产品品质的影响[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(4): 819–829.

NI C Y, LIU X X, LIANG Y H, et al. Effects of amino acid fertilizer on rice cd content and quality of agricultural products[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(4): 819–829.

氨基酸肥料对水稻 Cd 含量 及农产品品质的影响

倪才英¹, 刘星星¹, 梁以豪¹, 黎衍亮¹, 肖罗长¹, 刘鑫¹, 简敏菲², 丁蕾^{3*}

(1. 江西师范大学 地理与环境学院, 江西 南昌 330022; 2. 江西师范大学 生命科学学院, 江西 南昌 330022; 3. 江西省农业技术推广中心, 江西 南昌 330046)

摘要:【目的】探究稻蟹共作模式下不同氨基酸肥料对水稻 Cd 吸收累积和农产品品质的影响。【方法】选择鹰潭市余江区稻蟹共作田块进行大田试验, 设计氨基酸水溶肥①(AAO)、氨基酸水溶肥②(AAT)、氨基酸叶面肥(半胱氨酸(Cys))、钙镁磷肥(GMP)(常规肥料做比较用)及钙镁磷肥与氨基酸水溶肥复配(GA)和不添加肥料(CK)的 6 个处理, 研究 Cd 在各处理水稻植株中的富集和转运情况以及对糙米 Cd、蛋白质、氨基酸含量和甲鱼肌肉 Cd 含量的影响。【结果】水稻植株 Cd 含量由高到低依次为根、茎、叶、糙米。与 CK 相比, 对水稻根茎叶 Cd 含量降低效果最好的是 AAT 处理, 分别降低了 40.50%、65.74% 和 58.10%; Cys 处理显著降低了水稻糙米 Cd 含量, 降幅为 32.98%。糙米和甲鱼肌肉 Cd 含量均未超过国家标准限值。与 CK 相比, 施用氨基酸类肥料均降低了糙米蛋白质和 16 种氨基酸总量, 其中 Cys 处理的降低效果最显著, 分别降低了 29.37% 和 35.71%。根据通径分析, 土壤-糙米富集系数对糙米 Cd 含量的富集起直接作用, 而酸提取态 Cd、可氧化态 Cd、茎-叶片转运系数则是通过影响土壤-糙米富集系数来间接影响糙米对 Cd 的积累。【结论】氨基酸水溶肥能较好地降低水稻根茎叶 Cd 含量, 氨基酸叶面肥(半胱氨酸)降低糙米中 Cd 含量效果最好, 且两者均降低了糙米蛋白质和 16 种氨基酸总量, 改善了稻米食味品质, 以叶面喷施半胱氨酸的处理效果最好。

关键词: 稻蟹共作; 水稻; 镉; 农产品品质

中图分类号: S511; S506.2 文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2286(2023)04-0819-11



Effects of Amino Acid Fertilizer on Rice Cd Content and Quality of Agricultural Products

NI Caiying¹, LIU Xingxing¹, LIANG Yihao¹, LI Yanliang¹,
XIAO Luochang¹, LIU Xin¹, JIAN Minfei², DING Lei^{3*}

收稿日期: 2023-05-06 修回日期: 2023-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(42167006)和江西省现代农业产业技术体系建设专项(JXARS-12-质量安全与环境保护控制)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (42167006) and Project of Jiangxi Province Modern Agricultural Industrial Technology System Construction (JXARS-12- Quality Safety and Environmental Control)

作者简介: 倪才英, 教授, 博士, orcid.org/0000-0003-2495-4354, ncy1919@126.com; *通信作者: 丁蕾, 推广研究员, 主要从事土壤监测及饲料肥料中重金属风险评估研究, orcid.org/0009-0009-5922-1418, 379690106@qq.com。

(1.School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2.College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 3. Jiangxi Agricultural Technology Extension Center, Nanchang 330046, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the effects of different amino acid fertilizer on rice Cd absorption and accumulation well as agricultural product quality under the rice and turtle co-cropping mode. [Method] Rice and turtle co-cropping rice plots in Yujiang District of Yingtan City were selected for field experiment. Six treatments including amino acid water soluble fertilizer (AAO), amino acid water soluble fertilizer (AAT), amino acid foliar fertilizer (Cysteine (Cys)), calcium magnesium phosphate fertilizer (GMP) combination of calcium magnesium phosphate fertilizer and amino acid water soluble fertilizer (GA) and no fertilizer (CK) were designed. The enrichment and transport of Cd in rice plants and its effect on the contents of Cd and protein and amino acid in rice and the content of Cd in muscle of turtle were analyzed. [Result] The results showed that the Cd content of rice plants was ranking in the order of root > stem > leaf > brown rice. Compared with the CK, the best effect on the reduction of Cd content in the roots, stems and leaves of rice was the AAT treatment, which decreased Cd content by 40.50%, 65.74% and 58.10%, respectively. Cysteine foliar control agent (Cys) treatment significantly reduced the Cd content in brown rice by 32.98%. The content of Cd in brown rice and muscle of turtle did not exceed the limit of national standard. Compared with the CK, the application of amino acid fertilizer reduced the protein and 16 amino acids of brown rice, among which the Cys treatment had the most significant reduction effect, the protein and the amino acids were reduced by 29.37% and 35.71%, respectively. According to path analysis, the soil-brown rice enrichment coefficient played a direct role in the enrichment of Cd content in brown rice. However, acid-extracted Cd, oxidizable Cd and stem-leaf transport coefficient indirectly affected the absorption and enrichment of Cd by brown rice by affecting the soil-brown rice enrichment coefficient. [Conclusion] Amino acid water soluble fertilizer 2 (AAT) had the best effect on the reduction of Cd content in rice roots, stems and leaves, Cys had the best reduce effect on Cd content in brown rice, both of them reduced the rice protein and the total amount of 16 amino acids, and improved the taste quality of brown rice. The best effect was to spray cysteine on the leaf surface..

Keywords: rice and turtle co-cropping; rice; cadmium; agricultural product quality

【研究意义】稻渔综合种养作为现代生态循环农业发展的新技术模式^[1],产业规模不断扩大,种养面积与水产品产量逐年增加,生产的稻米与水产品得到广大消费者的青睐,具有广阔的发展前景。目前,我国稻渔综合种养已经形成了稻虾、稻鱼、稻蟹三大种养主产区,此外还有稻鳅、稻鳖、稻蛙、稻螺等4种主要模式^[2]。【前人研究进展】根据2014年《全国土壤污染调查公报》显示,Cd是耕地土壤重金属污染的首要元素,其污染点位超标率最高达7%。Cd元素具有毒性持久、活性强、移动性大的特点^[3],是稻田重金属污染的主要元素之一,水稻与其他旱作作物相比,能从土壤中吸收更多的Cd元素,更容易造成水稻稻米Cd含量超标^[4]。随着生活水平的提高,稻米Cd含量以及稻米品质特别是食味品质日益成为人们的关注重点,稻米的蛋白质和氨基酸含量是衡量稻米食味品质的一个重要指标^[5]。目前,向农田土壤重金属污染区添加肥料是土壤重金属污染修复常用的修复方法之一。添加土壤肥料不仅可以降低土壤Cd含量还能在一定程度上改善农产品品质。例如,江棋^[6]研究发现在Cd污染土壤上施用土壤调理剂可降低土壤可提取态Cd和稻米Cd含量,提高稻米蛋白质含量。文典等^[7]研究发现土壤调理剂显著降低稻米Cd含量的同时又能提高稻米蛋白质含量,改善稻米营养品质。李仰锐等^[8]研究发现在水稻开花期施用有机酸和EDTA能降低镉污染水稻糙米镉含量,但在一定程度上也降低了水稻籽粒中的直链淀粉和粗脂肪含量。刘欣宇等^[9]研究发现与化肥和鸡粪堆肥处理相比,餐厨堆肥处理能够显著降低稻米Hg含量和垩白度,提高了稻米食味值,有利于改善稻米的安全和食味品质。Jiang等^[10]研究发现在Cd、As复合污染稻田中添加石灰石、铁粉、硅肥、钙镁磷肥均能降低糙米Cd和As浓度,增加糙米氨基酸、矿质元素和微量元素,提高糙米的品质。Teng等^[11]研究发现施氮肥225 kg/hm²的处理稻米直链淀粉含量和胶稠度下降,使

稻米的蒸煮食味品质下降,同时也引起了籽粒对As和Cd的吸收,降低了卫生品质。【本研究切入点】根据前人研究,添加土壤调理剂或肥料来减少重金属污染和改善农产品品质的研究多集中在单一种植水稻的传统稻田模式上,在稻渔综合种养模式上的研究较少;且用氨基酸肥进行研究的比较少。【拟解决的关键问题】本试验选择能够满足多元化的消费需求,具有较高的经济效益和较强的市场潜力的稻鳖共作模式为研究对象^[12],鉴于稻渔综合种养田间工程不能破坏土壤耕作层以及尽量少干扰农户生产过程、减少劳动成本的特殊性^[13-14],将肥料与土壤混匀的修复方法不考虑用于稻渔综合种养土壤重金属污染修复。因此论文选择施用时可不翻动土壤的氨基酸水溶肥、氨基酸叶面喷施肥半胱氨酸、常规肥料钙镁磷肥作为供试材料,研究稻鳖共作模式下施用氨基酸类肥料,水稻对Cd的吸收富集和转运特征以及对农产品品质的影响,以期为稻渔综合种养土壤重金属污染修复、农产品品质改善、保障粮食生产安全提供技术支撑和数据参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江西省鹰潭市余江区锦江镇灌田村,地处赣东北。地貌以丘陵、山地、盆地和平原为主,地势由南北逐渐向中部倾斜;四季分明,温暖湿润,年均温为17.6℃,年均降水量1788.8mm,属于典型的亚热带湿润季风气候^[15]。试验地土壤基本化学性质如下:pH4.04;有机质31.95g/kg;速效钾20.09mg/kg;碱解氮196.58mg/kg;有效磷10.45mg/kg;土壤Cd含量0.35mg/kg。

1.2 供试材料与试验设计

供试水稻品种:野香优海丝。供试材料:复合肥料为三聚合($N_2+P_2O_5+K_2O \geq 40.0\%$ 、Cd含量0.066mg/kg)购于德州市元和农业科技开发有限责任公司,氨基酸水溶肥(17种氨基酸总量为19.041%、Cd含量0.092mg/kg)购于武汉高肽生物科技有限公司,钙镁磷肥($Ca \geq 20.0\%$ 、 $Mg \geq 4.0\%$ 、 $P_2O_5 \geq 12.0\%$ 、 $SiO_2 \geq 20.0\%$ 、Cd含量0.074mg/kg)购于广东大众农业科技股份有限公司,半胱氨酸($\geq 98.5\%$)购于国药集团化学试剂有限公司。

选择典型的稻鳖共作田块进行大田试验,试验田于2021年5月投放甲鱼苗1500只/hm²,5—9月投喂饲料,投喂量为甲鱼重量的2%,7月2日进行机械插秧,7月18日所有处理(包括CK)根据农户常规用法追肥525kg/hm²复合肥料,其他处理(不包括CK)根据表1于8月3日施用氨基酸水溶肥、钙镁磷肥和半胱氨酸,9月2日再次施用半胱氨酸,所有处理(包括CK)不使用基肥和氮磷钾肥,其他田间管理同当地管理措施一致。各试验田块间修筑隔离带,避免田块间相互影响。本试验共设计6个处理(表1):处理1为对照(CK),处理2为施用氨基酸水溶肥75kg/hm²(AAO),处理3为施用氨基酸水溶肥45kg/hm²,处理4为施用钙镁磷肥1125kg/hm²(GMP),处理5为喷施半胱氨酸1.295kg/hm²(Cys),处理6为施用钙镁磷肥450kg/hm²和氨基酸水溶肥37.5kg/hm²(GA),下文各处理均用编号代替。

表1 田间试验各肥料用法用量

Tab.1 The usage and dosage of fertilizer were tested in the field kg/hm²

处理 Treatment	处理方式 Treatment mode	用法 Usage	用量/(kg·hm ⁻²) Dosage	处理面积/hm ² Treatment area
CK	对照			0.7
AAO	氨基酸水溶肥①	分蘖期随灌溉水施用	75	0.85
AAT	氨基酸水溶肥②	分蘖期随灌溉水施用	45	0.3
GMP	钙镁磷肥	均匀撒施	1125	0.25
Cys	半胱氨酸	喷施两次,第一次在分蘖期,第二次在孕穗期,喷施时间选在清晨,喷施效果为叶面沾满滴雾为宜	1.295(兑水30kg)	0.26
GA	2/5钙镁磷肥+ 1/2氨基酸水溶肥①	分蘖期钙镁磷肥均匀撒施,氨基酸水溶肥随灌溉水施用	钙镁磷肥450,氨基酸水溶肥37.5	0.55

1.3 样品处理与测定

在水稻成熟期按照五点取样法采集水稻植株,用超纯水冲洗干净,晾干后放入烘箱于 105 ℃ 杀青 30 min,60 ℃ 烘干至恒重,用不锈钢剪刀将水稻根、茎、叶、稻谷分离,并将稻谷脱壳得到糙米,取适量根、茎、叶、糙米样品于粉碎机中粉碎,用自封袋保存备用。甲鱼在水稻收割时采集,于实验室-20 ℃ 冰箱保存。水稻根、茎、叶、糙米、甲鱼肌肉 Cd 含量采用微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定^[16]。采用 BCR 连续提取法^[17],提取酸提取态 Cd、可还原态 Cd、可氧化态 Cd、残渣态 Cd,提取液 Cd 含量采用 ICP-OES 725 电感耦合等离子体发射光谱仪测定。糙米蛋白质和氨基酸含量采用 GB 5009.5—2016 和 GB 5009.124—2016 方法测定。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据统计,使用 SPSS 进行单因素 ANOVA 检验、相关分析、通径分析,采用 Origin 2021 进行绘图。应用单因素方差分析法(one-way ANOVA)分析数据的差异显著性($P<0.05$),并应用最小显著差数法(LSD)进行多重比较。

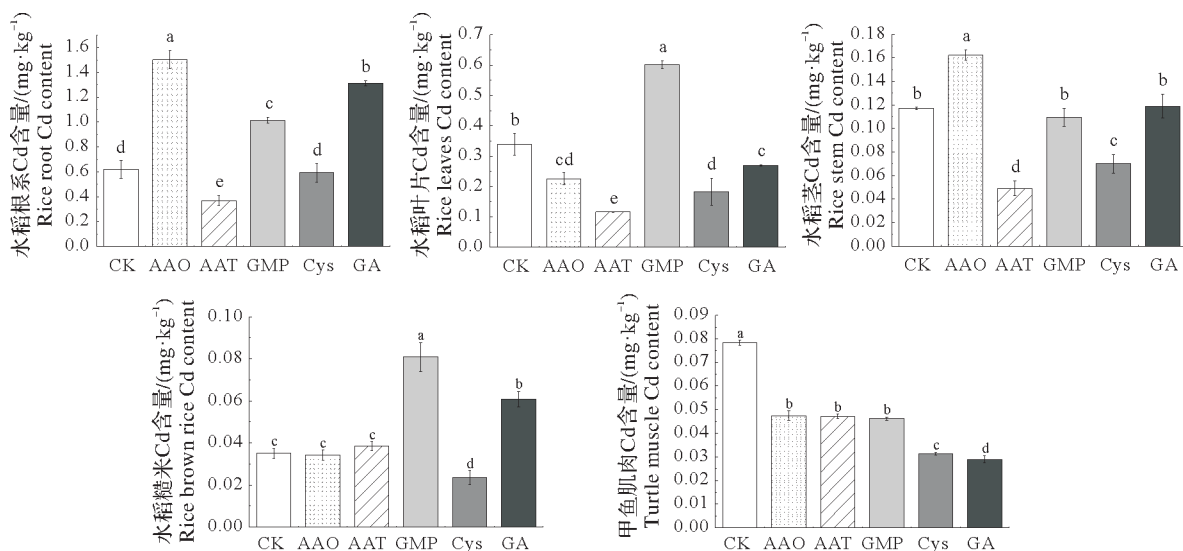
生物富集系数表示水稻植株各器官间 Cd 的富集能力和转运能力,富集系数(BCF)计算公式如下^[18-19]:

$$BCF = \frac{\text{根/茎/叶/糙米Cd}}{\text{土壤Cd}} \quad (1)$$

2 结果与分析

2.1 各肥料对稻鳖共作农产品 Cd 及水稻富集转运的影响

根据图 1,各处理水稻植株 Cd 含量由高到低依次为根、茎、叶、糙米。各处理根、茎、叶、糙米、甲鱼肌肉 Cd 含量与 CK 相比,AAT 处理根系 Cd 含量显著小于 CK,降幅为 40.50%;AAO、AAT、Cys、GA 处理茎 Cd 含量显著小于 CK,降幅为 20.54%~65.74%;AAT、Cys 处理水稻叶片 Cd 含量小于 CK,降幅为 58.10%、40.32%,AAT 处理降幅最大;AAO、Cys 处理水稻糙米 Cd 含量小于 CK,降幅为 2.35% 和 32.98%,Cys 处理降幅最大,说明叶面喷施半胱氨酸对降低糙米 Cd 含量有显著作用,AAO 处理未达到显著性水平;AAO、AAT、GMP、Cys、GA 处理甲鱼肌肉 Cd 含量显著小于 CK,降幅为 39.45%~63.06%,GA 处理降幅最大。各处理间比较,AAT 处理水稻根系、茎、叶片显著小于其他处理;Cys 处理水稻糙米 Cd 含量显著小于其他处理;GA 处理甲鱼肌肉 Cd 含量显著小于其他处理。各处理糙米 Cd 含量和甲鱼肌肉 Cd 含量均小于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)Cd 含量标准限值(稻米 0.2 mg/kg,甲鱼 0.5 mg/kg)。



不同小写字母表示水稻不同生育期各处理间差异显著($P<0.05$)

Different lowercase letters indicated significant differences among treatments at different growth stages of rice ($P<0.05$)

图 1 各肥料对农产品 Cd 含量的影响

Fig.1 Effects of each fertilizer on Cd concentration in agricultural products

富集系数能够反映水稻各部位对 Cd 的富集情况,富集系数越大说明对水稻 Cd 的富集能力越强。由表 2 可知,各处理土壤-根系、土壤-茎、土壤-叶片、土壤-糙米富集系数与 CK 相比,AAT 处理土壤-根系富集系数显著小于 CK,降幅为 37.05%;AAO、AAT、Cys 处理土壤-茎富集系数显著小于 CK,AAT 处理降幅最大,降幅为 63.76%;AAT、Cys 处理土壤-叶片富集系数显著小于 CK,AAT 处理降幅最大,降幅为 55.65%;Cys 处理土壤-糙米富集系数显著小于 CK,降幅为 17.52%。各处理间相比,AAT 处理土壤-根系、土壤-茎、土壤-叶片富集系数显著小于其他处理;Cys 处理土壤-糙米富集系数显著小于其他处理。土壤-米富集系数在一定程度上能够反映水稻稻米对 Cd 的吸收积累情况,本试验土壤-糙米富集系数范围为 0.16~0.60,所有处理土壤-糙米富集系数均小于 1,说明本试验水稻品种对 Cd 的吸收积累能力较弱,Cys 处理土壤-糙米富集系数显著低于其他处理,说明水稻叶面喷施半胱氨酸,对抑制糙米对 Cd 的富集效果最好。总的来说,AAT 处理抑制水稻根系、茎、叶片对 Cd 的富集效果最好,Cys 处理抑制糙米对 Cd 的富集效果最好。

表 2 各肥料对水稻植株 Cd 富集转运的影响
Tab.2 Effects of each fertilizer on Cd enrichment and transport in rice plants

处理 Treatment	CK	氨基酸水溶肥① AAO is 75 kg/hm ² amino acid water soluble fertilizer	氨基酸水溶肥② AAT is 45 kg/hm ² amino acid water soluble fertilizer	钙镁磷肥 GMP is 1 125 kg/hm ² calcium magnesium phosphate fertilizer	半胱氨酸 Cys is 1.295 kg/hm ² amino acid foliar fertilizer	2/5 钙镁磷肥+ 1/2 氨基酸水溶肥① GA is 450 kg/hm ² calcium magnesium phosphate fertilizer and 37.5 kg/hm ² amino acid water soluble fertilizer
土壤-根系 Soil-root	3.50±0.41 ^d	8.08±0.43 ^b	2.20±0.24 ^c	7.49±0.17 ^b	4.13±0.51 ^c	10.89±0.23 ^a
土壤-茎 Soil-stem	1.92±0.21 ^c	1.21±0.11 ^d	0.69±0.01 ^c	4.44±0.09 ^a	1.28±0.35 ^d	2.24±0.02 ^b
土壤-叶片 Soil-leaves	0.66±0.00 ^c	0.87±0.03 ^b	0.29±0.04 ^c	0.81±0.06 ^b	0.49±0.05 ^d	0.99±0.09 ^a
土壤-糙米 Soil-brown rice	0.20±0.01 ^{cd}	0.18±0.01 ^{cd}	0.23±0.01 ^c	0.60±0.05 ^a	0.16±0.02 ^d	0.51±0.03 ^b

不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicated significant differences among treatments ($P<0.05$).

2.2 氨基酸类肥料对稻蟹共作糙米食味品质的影响

根据研究稻米蛋白质含量一般在 8% 左右,蛋白质含量在 6%~7% 食味较好,而蛋白质含量超过 9% 时,食味表现较差^[20-22]。由表 3 可知,AAO、AAT、Cys、GA 处理糙米蛋白质和 16 种氨基酸总量显著小于 CK,蛋白质含量降幅在 2.55%~29.37%;16 种氨基酸总量降幅在 6.10%~35.71%,以 Cys 处理降幅最大。各处理间相比,Cys 处理糙米蛋白质和 16 种氨基酸总量显著小于其他处理,说明施用氨基酸类肥料降低了糙米蛋白质和 16 种氨基酸总量,提高了稻米食味品质,以叶面喷施半胱氨酸的处理效果最好。

2.3 糙米 Cd 含量与主要影响因子间的通径分析

如图 2 所示,与 CK 相比,AAO、AAT、GMP、Cys、GA 处理酸提取态 Cd、可氧化态 Cd 含量显著小于 CK,降低了 9.58%~42.35%、5.21%~38.13%,Cys、GA 处理可还原态 Cd 显著小于 CK,降幅为 10.88%、18.85%,GA 处理降幅最大,AAO、AAT、GMP、Cys 处理残渣态 Cd 含量显著大于 CK,增幅在 4.09%~120.63%。

选择水稻植株各部位 Cd 含量、土壤 Cd 形态(图 2)、富集系数为自变量(X),糙米 Cd 含量作为因变量(Y),进行通径分析。为了建立最优的回归方程,对影响因子与糙米 Cd 进行相关性分析,根系 Cd、叶片 Cd、可还原态 Cd 与糙米 Cd 间没有相关性,故在进行通径分析时剔除自变量行列。因此,选择茎 Cd(X_1)、酸提取态 Cd(X_2)、可氧化态 Cd(X_3)、残渣态 Cd(X_4)、土壤-根系富集系数(X_5)、土壤-茎富集系数(X_6)、土壤-叶片富集系数(X_7)、土壤-糙米富集系数(X_8),8 个自变量与糙米 Cd 含量间进行通径分析。

表3 氨基酸类肥料对糙米蛋白质和16种氨基酸含量的影响

Tab.3 Effects of amino acid fertilizer on the contents of protein and 16 amino acids in brown rice

项目 Project	处理 Treatment				
	CK	氨基酸水溶肥① AAO is 75 kg/hm ² amino acid water soluble fertilizer	氨基酸水溶肥② AAT is 45 kg/hm ² amino acid water soluble fertilizer	半胱氨酸 Cys is 1.295 kg/hm ² amino acid foliar fertilizer	2/5 钙镁磷肥+1/2 氨基酸水溶肥① GA is 450 kg/hm ² calcium magnesium phosphate fertilizer and 37.5 kg/hm ² amino acid water soluble fertilizer
蛋白质 Protein	9.43±0.04 ^a	9.19±0.02 ^b	7.97±0.02 ^d	6.66±0.03 ^c	8.24±0.034 ^c
天门冬氨酸 Aspartic acid	0.7±0.02 ^a	0.68±0.034 ^a	0.58±0.02 ^c	0.47±0.026 ^d	0.62±0.02 ^c
苏氨酸 Threonine	0.27±0.02 ^a	0.23±0.02 ^b	0.22±0.02 ^b	0.18±0.017 ^c	0.23±0.02 ^b
丝氨酸 Serine	0.42±0.017 ^a	0.42±0.02 ^a	0.35±0.01 ^b	0.29±0.01 ^c	0.37±0.017 ^b
谷氨酸 Glutamic acid	1.53±0.026 ^a	1.44±0.02 ^b	1.24±0.017 ^d	0.99±0.03 ^c	1.33±0.026 ^c
甘氨酸 Glycine	0.36±0.026 ^a	0.35±0.017 ^{ab}	0.28±0.026 ^{cd}	0.25±0.03 ^d	0.31±0.01 ^{bc}
丙氨酸 Alanine	0.46±0.03 ^a	0.45±0.01 ^a	0.36±0.017 ^c	0.31±0.01 ^d	0.4±0.02 ^b
缬氨酸 Valine	0.34±0.017 ^a	0.28±0.01 ^b	0.27±0.02 ^b	0.21±0.01 ^c	0.28±0.017 ^b
蛋氨酸 Methionine	0.12±0.01 ^a	0.1±0.01 ^{ab}	0.1±0.017 ^{ab}	0.07±0.01 ^c	0.08±0.01 ^{bc}
异亮氨酸 Isoleucine	0.24±0.02 ^a	0.2±0.017 ^b	0.19±0.01 ^b	0.14±0.02 ^c	0.19±0.02 ^b
亮氨酸 Leucine	0.65±0.01 ^a	0.58±0.02 ^b	0.52±0.017 ^c	0.41±0.01 ^d	0.54±0.01 ^c
酪氨酸 Tyrosine	0.11±0.01 ^b	0.14±0.017 ^a	0.06±0.01 ^c	0.03±0.01 ^d	0.05±0.01 ^{cd}
苯丙氨酸 Phenylalanine	0.39±0.02 ^a	0.36±0.01 ^b	0.31±0.01 ^c	0.24±0.02 ^d	0.33±0.017 ^c
组氨酸 Histidine	0.17±0.01 ^a	0.15±0.01 ^{ab}	0.14±0.02 ^b	0.11±0.01 ^c	0.14±0.01 ^b
赖氨酸 Lysine	0.26±0.01 ^a	0.26±0.017 ^a	0.22±0.02 ^b	0.19±0.01 ^c	0.22±0.01 ^b
精氨酸 Arginine	0.43±0.01 ^a	0.4±0.01 ^b	0.32±0.02 ^c	0.23±0.01 ^d	0.33±0.01 ^c
脯氨酸 Proline	0.27±0.02 ^a	0.27±0.01 ^a	0.23±0.017 ^b	0.2±0.01 ^c	0.26±0.01 ^a
16种氨基酸总量 16 amino acids total content	6.72±0.02 ^a	6.31±0.01 ^b	5.39±0.02 ^d	4.32±0.02 ^c	5.68±0.01 ^c

不同小写字母表示稻米蛋白质和氨基酸各处理间差异显著($P<0.05$)(单位:蛋白质,%;氨基酸,g/100 g);不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences in rice protein and amino acid between treatments ($P<0.05$)(Unit: protein, %; Amino acid, g/100 g); Different lowercase letters indicated significant differences among treatments ($P<0.05$).

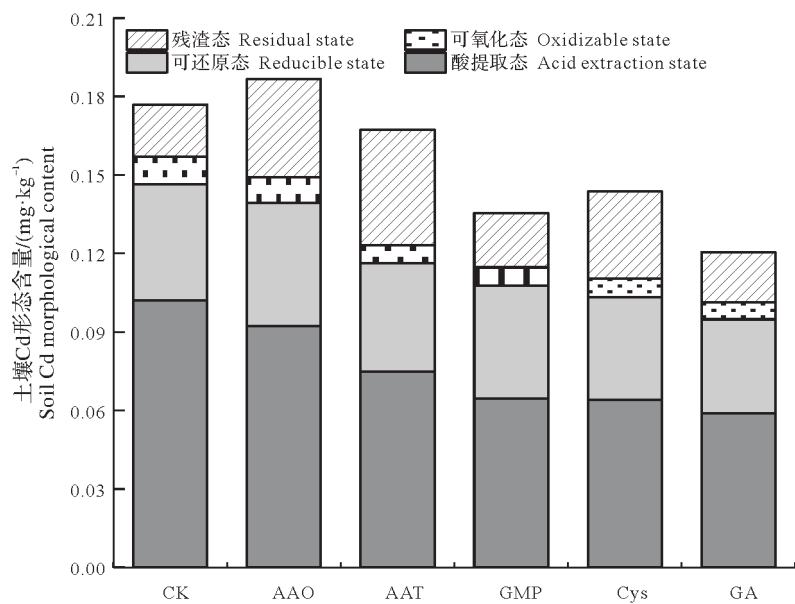


图 2 不同处理土壤 Cd 形态的含量

Fig 2 The content of different Cd form in soil under different treatments

依据直接通径系数和相关系数(表4)可得间接通径系数。对因变量和8个自变量进行显著性检验,酸提取态 Cd(X_2)、可氧化态 Cd(X_3)、土壤-糙米富集系数(X_8)的显著性分别为0.006、0、0 小于0.05,说明自变量与因变量之间存在显著性差异,具有统计学意义。由表5可知,酸提取态 Cd(X_2)、可氧化态 Cd(X_3)、土壤-糙米富集系数(X_8)对糙米 Cd 含量的直接影响中,土壤-糙米富集系数(X_8)的直接作用最大,酸提取态 Cd(X_2)次之,同时根据表5 土壤-糙米富集系数(X_8)的直接通径系数为1.299,间接通径系数之和为-0.301,直接通径系数大于间接通径系数之和,说明土壤-糙米富集系数(X_8)对糙米 Cd 含量以直接影响为主,而酸提取态 Cd(X_2)、可氧化态 Cd(X_3)对土壤-糙米富集系数的间接通径系数为-0.995、-0.685,说明酸提取态 Cd(X_2)、可氧化态 Cd(X_3)通过影响土壤-糙米富集系数(X_8)来间接影响糙米对 Cd 吸收和富集。综上,糙米对 Cd 的吸收累积受到土壤重金属有效态和水稻各部位对 Cd 的富集转运的影响。所以,在镉污染农田生产过程中要使用能够降低水稻根系土壤重金属有效态的修复材料,减少水稻吸收转运富集 Cd 的能力,达到稻米安全生产的目的。

表 4 糙米 Cd 含量与不同影响因子之间的相关系数

Tab.4 Correlation coefficients between Cd content in brown rice and different influencing factors

相关系数 Coefficient of association	Y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
Y	1	0.701**	-0.562**	-0.446*	-0.605**	0.595**	0.866**	0.585**	0.935**
X_1		1	-0.042	0.028	-0.662**	0.32	0.928**	0.391	0.518*
X_2			1	0.837**	0.262	-0.424	-0.398	-0.376	-0.766**
X_3				1	0.01	-0.206	-0.238	0.029	-0.527*
X_4					1	-0.522*	-0.739**	-0.673**	-0.63**
X_5						1	0.473*	0.878**	0.625**
X_6							1	0.548*	0.784**
X_7								1	0.673**
X_8									1

*表示在 $P\leq0.05$ 水平显著,**表示在 $P\leq0.01$ 水平极显著。 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 、Y分别表示茎Cd、酸提取态Cd、可氧化态Cd、残渣态Cd、土壤-根系富集系数、土壤-茎富集系数、土壤-叶片富集系数、土壤-糙米富集系数、糙米Cd。
Annotation: * means significant at $P\leq0.05$ level, ** means extremely significant at $P\leq0.01$ level. X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 , X_6 , X_7 , X_8 and Y respectively represent stem Cd, acid extraction Cd, oxidizable Cd, residue Cd, soil-root enrichment coefficient, soil-stem enrichment coefficient, soil-leaf enrichment coefficient, soil-brown rice enrichment coefficient and brown rice Cd.

表 5 不同影响因子对糙米 Cd 的通路分析
Tab.5 Path analysis of different influencing factors on brown rice Cd

影响因子 Factor of influence	直接通路系数 Direct path coefficient	间接通路系数 Indirect path coefficient								间接通路系数之和 Sum of indirect path coefficients
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	
X_1	0.628		-0.019	-0.008	-0.034	0.011	-0.417	-0.048	0.673	-0.011
X_2	0.443	-0.026		-0.252	0.013	-0.014	0.179	0.046	-0.995	-1.049
X_3	-0.301	0.018	0.371		0.001	-0.007	0.107	-0.004	-0.685	-0.2
X_4	0.051	-0.416	0.116	-0.003		-0.018	0.332	0.083	-0.818	-0.724
X_5	0.034	0.201	-0.188	0.062	-0.027		-0.212	-0.108	0.812	0.54
X_6	-0.449	0.583	-0.176	0.072	-0.038	0.016		-0.067	1.018	1.225
X_7	-0.123	0.246	-0.167	-0.009	-0.034	0.030	-0.246		0.874	0.694
X_8	1.299	0.325	-0.339	0.159	-0.032	0.021	-0.352	-0.083		-0.301

X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 分别表示茎 Cd、酸提取态 Cd、可氧化态 Cd、残渣态 Cd、土壤-根系富集系数、土壤-茎富集系数、土壤-叶片富集系数、土壤-糙米富集系数。

X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 , X_6 , X_7 , and X_8 respectively represent stem Cd, acid extraction Cd, oxidizable Cd, residue Cd, soil-root enrichment coefficient, soil-stem enrichment coefficient, soil-leaf enrichment coefficient and soil-brown rice enrichment coefficient.

3 讨 论

3.1 氨基酸肥料对稻鳖共作水稻富集 Cd 的影响

水稻植株各部位 Cd 含量遵守根>茎>叶的规律,在 AAT 和 Cys 处理下水稻根茎叶 Cd 含量低于 CK,与 Arooj 等^[23]、Hussain 等^[24]和 Sharma 等^[25]研究结果相似;施用氨基酸类肥料可提高土壤养分含量,增加细菌多样性,进而提高土壤酶活^[26-27],降低水稻植株 Cd 浓度,减少 Cd 对水稻的毒害,此外氨基酸能与重金属形成络合物,减少重金属离子的活性,降低重金属迁移率。例如 Hussain 等^[24]研究发现,氨基酸与微量营养素螯合不只提高了植物的光合作用,增加了叶绿素含量,还降低了植物中的 Cd 浓度。除 AAT 和 Cys 处理外,其他处理水稻植株各部位 Cd 含量高于 CK 的原因,与肥料的施用量有关,例如鄢德梅等^[28]发现水稻根茎叶 Cd 含量受钙镁磷肥用量的影响,钙镁磷肥施用量为 2 250 kg/hm²时对稻米镉含量降低效果最好,其他高于和低于此用量的处理水稻植株 Cd 含量高于对照,原因可能在于植物的根际作用使原本被钝化的重金属激活再次转化成可被植物吸收利用的形态从而使植物 Cd 含量增加^[29]。

3.2 氨基酸肥料对稻鳖共作农产品品质的影响

糙米和甲鱼肌肉 Cd 含量未超标准限值,但作为比较用的常规肥 GMP 处理的糙米 Cd 含量显著大于 CK,本试验 GMP 处理的修复材料添加量大于其他处理修复材料的添加量,使水稻吸收累积了较多的 Cd 元素^[30],这就导致了 GMP 处理糙米 Cd 含量大于其他处理。氨基酸类肥料降低了糙米蛋白质和 16 种氨基酸总量,特别是叶面喷施半胱氨酸,这与 Ali 等^[31]、隆斌庆^[32]的研究结果相似。稻米蛋白质含量与食味品质一般呈负相关,蛋白质含量过高稻米的食味品质表现较差^[33]。目前关于调控稻米食味品质的方法主要是通过氮肥的管理来实现,程方伟等^[34]研究发现施氮量显著影响稻米品质,在高施氮量下,稻米蛋白质含量增加,食味品质下降;蒋明金等^[35]通过减施氮肥试验发现稻米蛋白质含量随着施氮量的减少逐渐降低,食味品质提高。但是根据一些研究也有相反的结论,例如陈莹莹^[36]在氮肥对稻米品质影响的研究中发现,进一步施加氮肥,反而使稻米蛋白质含量下降。根据前人研究施氮量对稻米食味品质的影响机制目前还没有明确的定论^[21]。而氨基酸类肥料富含的主要元素之一是氮元素,此外根据曹小闯等^[37]研究发现施用氨基酸水溶肥提高了氮素在水稻内的转运量和转运率,这可能就是氨基酸类肥料影响稻米蛋白质含量的原因之一。此外,氨基酸肥可提高土壤微生物和酶活性,加速有机质矿化,促进营养元素的释放,提高作物对营养元素的吸收,促进作物生长和光合作用,从而提高作物抗性,改善作物品质^[38]。因此,通过调控氨基酸类肥料的施用,改善稻米蛋白质含量是除施用氮肥外调控稻米食味品质的重要举措。但是根据前人研究与现有文献,目前关于氨基酸类肥料对农产品蛋白质

和氨基酸含量的影响机制、调控农产品食味品质的作用原理以及最佳施用方式与施用量等方面的研究较少,还需进一步加强探究。

4 结 论

综上所述,氨基酸水溶肥处理显著降低了水稻根茎叶Cd含量,减少了水稻植株对Cd的富集;氨基酸叶面喷施肥半胱氨酸对降低糙米Cd含量的效果最显著;氨基酸类肥料均降低了糙米蛋白质和16种氨基酸总量。糙米对土壤Cd的富集是影响糙米Cd含量的直接因素,因此,为保证稻米的安全品质,需对稻田土壤进行监测和修复。

参考文献 References:

- [1] 杨玲霞,许兴,邱小琮,等.稻渔综合种养生态效应研究进展[J].上海农业学报,2020,36(3):141-145.
YANG L X, XU X, QIU X C, et al. Research progress on ecological effect of rice-fishing comprehensive breeding[J]. Acta agriculturae Shanghai, 2020, 36(3): 141-145.
- [2] “十三五”中国稻渔综合种养产业发展报告[J].中国水产,2022(1):43-52.
“13th Five-Year Plan” China rice and fishery comprehensive cultivation industry development report[J]. China fisheries, 2022(1): 43-52.
- [3] 刘小琴.4种不同类型叶面阻控剂对水稻镉吸收和积累的影响[J].浙江农业科学,2022,63(7):1456-1459.
LIU X Q. Effects of 4 different types of leaf surface inhibitors on cadmium uptake and accumulation in rice[J]. Journal of Zhejiang agricultural sciences, 2022, 63(7): 1456-1459.
- [4] 陈慧茹,董亚玲,王琦,等.重金属污染土壤中Cd、Cr、Pb元素向水稻的迁移累积研究[J].中国农学通报,2015,31(12):236-241.
CHEN H R, DONG Y L, WANG Q, et al. Distribution and transportation of Cd, Cr, Pb in rice with contamination in soil[J]. Chinese agricultural science bulletin, 2015, 31(12): 236-241.
- [5] 刘秋员,陶钰,程爽,等.不同直链淀粉与蛋白质含量类型梗稻稻米品质特征[J].食品科技,2022,47(11):150-158.
LIU Q Y, TAO Y, CHENG S, et al. Rice quality characteristics of japonica rice varieties with different amylose and protein content[J]. Food science and technology, 2022, 47(11): 150-158.
- [6] 江棋.土壤调理剂对镉污染稻田土壤质量和稻米品质的影响[D].武汉:华中农业大学,2020.
JIANG Q. Effects of soil amendment on soil quality and rice quality in cadmium contaminated paddy fields[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.
- [7] 文典,江棋,邓腾灏博,等.土壤调理剂对稻米中镉含量及其品质的影响[J].生态环境学报,2021,30(2):400-404.
WEN D, JIANG Q, DENG T H B, et al. Effects of soil amendment on rice cadmium uptake and quality [J]. Ecology and environmental sciences, 2021, 30(2): 400-404.
- [8] 李仰锐,徐卫红,吴艳波.有机酸、EDTA对镉污染土壤上稻米品质的影响[J].中国农学通报,2012,28(9):102-105.
LI Y R, XU W H, WU Y B. Effects of organic acid and EDTA on quality of rice in cadmium polluted soil[J]. Chinese agricultural science bulletin, 2012, 28(9): 102-105.
- [9] 刘欣宇,曹盼,林永锋,等.餐厨堆肥对水稻产量、稻米品质及水土环境的影响[J].江苏农业科学,2022,50(20):253-257.
LIU X Y, CAO P, LIN Y F, et al. Effects of kitchen compost on rice yield, rice quality and water and soil environment[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2022, 50(20): 253-257.
- [10] JIANG Y, ZHOU H, GU J F, et al. Combined amendment improves soil health and Brown rice quality in paddy soils moderately and highly Co-contaminated with Cd and As.[J]. Environmental pollution (barking, essex : 1987), 2021, 295: 118590.
- [11] TENG B, LI Z, XIAO L, et al. Effects of nitrogen application level on yield, quality, and Hg, As, Cd concentrations in grains of high quality rice[J]. Chinese agricultural science bulletin, 2011, 27(7): 30-33.
- [12] 陈静,何吉祥,方焱,等.稻鳖共作中华鳖放养密度对稻鳖产量和经济效益的影响[J].安徽农学通报,2022,28(8):123-125.
CHEN J, HE J X, FANG Y, et al. Effects of stocking density of Chinese turtle on yield and economic benefits in rice turtle co-culture[J]. Anhui agricultural science bulletin, 2022, 28(8): 123-125.

- [13] 黄勇,佟力,贺胜利.信阳稻渔综合种养产业发展现状与思考[J].河南水产,2022(4):4-6.
HUANG Y, TONG L, HE S L. Development of rice and fishery comprehensive planting and breeding industry in Xinyang: current situation and reflection[J]. Henan fisheries, 2022(4):4-6.
- [14] 邢志鹏,张洪程,高辉,等.关于稻渔综合产业发展的若干思考与建议[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2022,43(5):1-9.
XING Z P, ZHANG H C, GAO H, et al. Thoughts and suggestions on the development of rice-fishery integrative industry[J]. Journal of Yangzhou university (agricultural and life science edition), 2022, 43(5):1-9.
- [15] 鲍思屹,徐梦洁,解菁菁,等.红壤耕地重金属含量空间变异与潜在生态风险的不确定性:以鹰潭市余江区为例[J].天津农业科学,2020,26(7):55-61.
BAO S Y, XU M J, XIE J J, et al. Spatial variability of heavy metal content in cultivated land of red soil and uncertainty of potential ecological risks: a case of Yujiang district, Yingtan City[J]. Tianjin agricultural sciences, 2020, 26(7):55-61.
- [16] 田威,李娜,倪才英,等.江西省稻渔系统中土壤和稻谷重金属污染特征及健康风险评价[J].生态毒理学报,2021,16(3):331-339.
TIAN W, LI N, NI C Y, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metals pollution in soil and rice for Jiangxi rice-fish co-culture system[J]. Asian journal of ecotoxicology, 2021, 16(3):331-339.
- [17] QUEVAUVILLER P, RAURET G, LOPEZ-SANCHEZ J F, et al. Certification of trace metal extractable contents in a sediment reference material (CRM 601) following a three-step sequential extraction procedure[J]. Science of the total environment, 1997, 205(2):223-234.
- [18] 刘巍.生物有机肥对红壤性水稻土的性质、Cd形态与水稻植株迁移的影响[D].南京:南京农业大学,2020.
LIU W. Effects of bio-organic fertilizer in red paddy soil properties, Cd fraction and Cd migration in rice plant tissues [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.
- [19] 潘荣庆,蓝消琛,何卿姮,等.不同地区叶面施用调理剂对水稻累积镉的影响[J].江苏农业科学,2023,51(3):205-211.
PAN R Q, LAN Y C, HE Q H, et al. Effects of foliar application of conditioner on cadmium accumulation in rice in different areas[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2023, 51(3):205-211.
- [20] 路凯,赵庆勇,周丽慧,等.稻米蛋白质含量与食味品质的关系及其影响因素研究进展[J].江苏农业学报,2020,36(5):1305-1311.
LU K, ZHAO Q Y, ZHOU L H, et al. Research progress on the relationship between rice protein content and eating quality and the influence factors[J]. Jiangsu journal of agricultural sciences, 2020, 36(5):1305-1311.
- [21] 石吕,张新月,孙惠艳,等.不同类型水稻品种稻米蛋白质含量与蒸煮食味品质的关系及后期氮肥的效应[J].中国水稻科学,2019,33(6):541-552.
SHI L, ZHANG X Y, SUN H Y, et al. Relationship of grain protein content with cooking and eating quality as affected by nitrogen fertilizer at late growth stage for different types of rice varieties [J]. Chinese journal of rice science, 2019, 33(6):541-552.
- [22] WAKAMATSU K, SASAKI O, UEZONO I, et al. Effect of the amount of nitrogen application on occurrence of white-back kernels during ripening of rice (*Oryza sativa*) under high-temperature conditions[J]. Japanese journal crop science, 2008, 77(4):424-433.
- [23] AROOJ B, MUHAMMAD R, SHAFQAAT A, et al. Effect of foliar-applied iron complexed with lysine on growth and cadmium(Cd) uptake in rice under Cd stress[J]. Environmental science & pollution research international, 2018, 25(21):20691-20699.
- [24] HUSSAIN A, ALI S, RIZWAN M, et al. Role of zinc-lysine on growth and chromium uptake in rice plants under Cr stress[J]. Journal of plant growth regulation, 2018, 37(4):1413-1422.
- [25] SHARMA P, KUMAR A, BHARDWAJ R. Plant steroidal hormone epibrassinolide regulate-heavy metal stress tolerance in *Oryza sativa* L. by modulating antioxidant defense expression[J]. Environmental & experimental botany, 2016, 122:1-9.
- [26] 彭宇,闫会转,肖中林,等.不同施肥处理对盆栽辣椒土壤酶活性及土壤微生物含量的影响[J].新疆农业科学,2022,59(9):2200-2208.
PENG Y, YAN H Z, XIAO Z L, et al. Effects of different fertilization treatments on soil enzyme activity and soil microbial content of potted pepper[J]. Xinjiang agricultural sciences, 2022, 59(9):2200-2208.

- [27] 吕娜娜,沈宗专,王东升,等.施用氨基酸有机肥对黄瓜产量及土壤生物学性状的影响[J].南京农业大学学报,2018,41(3):456-464.
LYU N N, SHEN Z Z, WANG D S, et al. Effects of amino acid organic fertilizer on cucumber yield and soil biological characters[J]. Journal of Nanjing agricultural university, 2018, 41(3): 456-464.
- [28] 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, HANG 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.
- [29] 郝金才,李柱,吴龙华,等.铅镉高污染土壤的钝化材料筛选及其修复效果初探[J].土壤,2019,51(4):752-759.
HAO J C, LI Z, WU L H, et al. Preliminary study on cadmium and lead stabilization in soil highly polluted with heavy metals using different stabilizing agents[J]. Soils, 2019, 51(4): 752-759.
- [30] CHEN X X, LIU Y M, ZHAO Q Y, et al. Health risk assessment associated with heavy metal accumulation in wheat after long-term phosphorus fertilizer application[J]. Environmental pollution, 2020, 262: 114348.
- [31] ALI K S, PIA M A, RASHID S, et al. Effects of biochar and zeolite soil amendments with foliar proline spray on nickel immobilization, nutritional quality and nickel concentrations in wheat [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2019, 173: 182-191.
- [32] 隆斌庆.“一季稻+渔+再生稻”模式对稻田土壤养分及稻米品质的影响研究[D].长沙:湖南农业大学,2019.
LONG B Q. Effects of “rice + fishing + ratooning rice” pattern on soil nutrients in paddy fields and rice quality[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019.
- [33] 王有伟,苗燕妮,江鹏,等.水稻产量、蛋白质及食味特性的关联研究[J].中国农学通报,2017,33(5):1-5.
WANG Y W, MIAO Y N, JIANG P, et al. Correlation studies on yield, protein and palatability of rice[J]. Chinese agricultural science bulletin, 2017, 33(5): 1-5.
- [34] 程方伟,谢东婕,杨欣欣,等.施氮量和种植密度对优质稻‘壮香优白金5’稻米品质的影响[J/OL].分子植物育种:1-23[2023-05-06].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20220615.1724.012.html>.
CHENG F W, XIE D J, YANG X X, et al. Effects of nitrogen application rate and planting density on grain quality of high quality rice ‘Zhuangxiangyoubaijin5’ [J/OL]. Molecular plant breeding: 1-23 [2023-05-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20220615.1724.012.html>.
- [35] 蒋明金,徐文波,王荣基,等.减氮对机插杂交籼稻产量和稻米品质的影响[J].南方农业学报,2022,53(1):104-114.
JIANG M J, XU W B, WANG R J, et al. Effects of nitrogen reduction on grain yield and quality of mechanical transplanting hybrid indica rice[J]. Journal of southern agriculture, 2022, 53(1): 104-114.
- [36] 陈莹莹.江苏早熟晚粳品种稻米品质对氮肥的响应及其类型[D].扬州:扬州大学,2012.
CHEN Y Y. The response to nitrogen fertilizer of the quality properties of early-maturing late japonica rice in Jiangsu and its type[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012.
- [37] 曹小闯,李烨锋,吴龙龙,等.氨基酸水溶肥施用模式对水稻氮素吸收和转运的影响[J].江苏农业学报,2020,36(4):888-895.
CAO X C, LI Y F, W L L, et al. Effects of different application patterns of amino acid soluble fertilizer on nitrogen accumulation and translocation in rice[J]. Jiangsu journal of agricultural sciences, 2020, 36(4): 888-895.
- [38] 蒋舒蕊,毛莲珍,赵凯,等.氨基酸与腐植酸肥对无土栽培生菜生长及营养品质的影响[J].蔬菜,2021(7):28-31.
JIANG X R, MAO L Z, ZHAO K, et al. Effects of amino acids fertilizer and humic acid fertilizer on growth and nutritional quality of lettuce in soilless cultivation[J]. Vegetables, 2021(7): 28-31.