

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.02.004

丛枝菌根真菌与化肥共施对水稻品质的改善作用

张淑娟¹, 王立¹, 马放¹, 张雪¹, 徐亚男², 李哲¹, 姜晓峰¹

(1.城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 150090 哈尔滨;
2.中国市政华北设计研究总院有限公司, 300074 天津)

摘要:为探讨化肥施加与丛枝菌根真菌(AMF)接种的共同作用对水稻品质的影响,在大田条件下分别对施肥条件下和不施肥条件下的水稻进行AMF接种,并在收获后测定稻米品质.结果表明:不施肥条件下AMF接种降低了稻谷的加工品质和外观品质,对蒸煮、食味及营养品质无显著影响;化肥的施加提高了稻谷的加工品质和蒸煮品质,但降低了稻米的外观品质、食味品质和营养品质;AMF接种和化肥共施改善了稻谷的外观品质、蒸煮食味品质,并保证了稻米中铁和锌的质量分数.AMF接种和施加化肥单独都不能显著改善水稻品质,但二者共同作用能够达到改善水稻品质的目的.

关键词:丛枝菌根真菌;化肥;水稻;品质;互作效应

中图分类号: X5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)02-0019-06

Effect of interaction between inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and fertilization on rice quality

ZHANG Shujuan¹, WANG Li¹, MA Fang¹, ZHANG Xue¹, XU Yanan², LI Zhe¹, JIANG Xiaofeng¹

(1.State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment(Harbin Institute of Technology), 150090 Harbin, China;
2.North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd, 300074 Tianjin, China)

Abstract: The aim of our study is to estimate the effects of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and fertilization on rice quality. Rice quality was estimated for inoculated and non-inoculated rice grown in both fertilized and non-fertilized paddy fields. It was found that in non-fertilized paddy fields there was a negative effect of inoculation on rice processing and appearance quality but no significant effect on cooking, tasting and nutrition quality. In addition, fertilization improved rice processing and cooking quality whereas no significant effect was found on appearance, tasting and nutrition quality. Finally, the interaction between inoculation and fertilization improved appearance, cooking and tasting quality and guaranteed the Fe and Zn content of rice. In conclusion, interaction between AMF inoculation and fertilization plays a vital role in improving rice quality.

Keywords: arbuscular mycorrhizal fungi; fertilization; rice; quality; interaction

我国水稻生产目标主要以高产、抗逆为主,在提高产量和抗病性方面取得了进步^[1-2],然而稻米品质却长期没有得到显著改善^[3].因此,提高稻米品质已成为当前我国水稻生产的当务之急.食

用稻米品质包括加工品质、外观品质、蒸煮食味品质和营养品质4个方面.反应稻米加工品质的指标主要有糙米率、精米率和整精米率,分别为单位质量捣鼓加工出的糙米、精米和完整精米的质量分数.外观品质是吸引消费者的能力,主要指精米的垩白性状.垩白米率、垩白大小和垩白度高低是稻米外观品质好坏的决定因素.蒸煮食味品质指稻米在蒸煮过程中所表现出来的特性,主要理化指标有粗蛋白质量分数、直链淀粉质量分数和胶稠度.营养品质是指稻米中营养成分的丰富程度,多数指稻米中一些人体必需氨基酸和矿质元素

收稿日期: 2013-12-10.
基金项目: 国家自然科学基金(51179041);水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07201003);黑龙江省自然科学基金(E201206);城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学)自主课题(2014TS05);哈尔滨市科技创新人才研究专项基金(2012RFLXS026).
作者简介: 张淑娟(1984—),女,博士研究生;
马放(1963—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 王立, wli@hit.edu.cn.

(如铁、锌和硒)的质量分数.

稻米品质受土壤生态因子^[4]、施肥种类^[5]、施肥水平^[6]和农艺性状^[7]等多种因素的影响.其中稻米的加工品质受水稻株高、有效穗数和经济系数的影响^[8].而稻米的外观品质与株高呈负相关关系^[7-8],同时,抽穗后较高群体的光合速率也会降低稻米的外观品质^[9].另外,稻米的蒸煮品质、外观品质和营养品质还受水稻根系化学讯号的调节^[10].过去国内外学者对稻米品质的研究大多集中在生态条件、农艺性状及生理特征等方面.丛枝菌根技术是近年发展起来的一种绿色农业非点源污染防治技术^[11],主要通过促进作物对营养物质的吸收来减少农用化学品的施用量,进而从源头上减少非点源污染物的来源^[12].前期研究证明,丛枝菌根技术不能完全替代化肥的施用^[13-14],与化肥共施是今后农田非点源污染源头减量的发展方向.本文从与水稻共生的微生物与稻米品质的关系入手,探讨生物因子对稻米品质的影响,以期对稻米品质的改善提供新思路.

1 试 验

1.1 试验用地与试验材料

试验在城市水资源与水环境国家重点实验室的“农药化肥源头减量技术示范基地”进行.该基地位于黑龙江省双城市朝阳乡政安村,西为拉林河,北靠松花江,三面环水环绕市界,具体地理位置为45°13.819'N, 126°22.611'E(图1).涉及的水稻土类型为潜育型,有机质为26.32 g·kg⁻¹,水解性氮质量分数为125.25 mg·kg⁻¹,速效磷为120.63 mg·kg⁻¹,速效钾为17.59 mg·kg⁻¹.

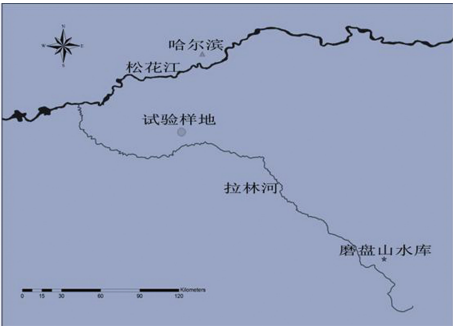


图 1 试验样地位置

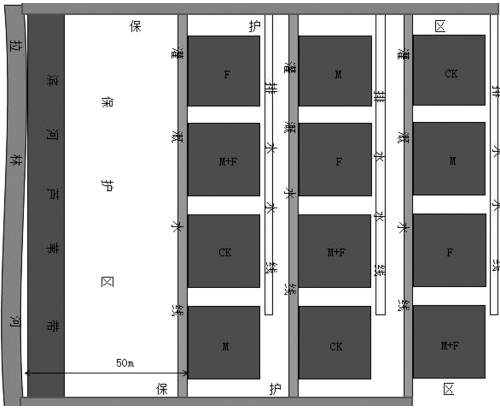
试验作物为水稻 (*Oryza sativa* L.), 合梗一号.采用的丛枝菌根真菌(AMF)为摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*), 保藏在中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心,保藏号为 CGMCC No.3012.

1.2 试验方法

试验设接种丛枝菌根真菌(AMF)和施肥两个处理.其中接种处理有接种 AMF 和不接种 AMF

两个水平.接种在育秧盘(58 cm×28 cm×3 cm)中进行,具体做法是先在水稻育秧盘内放过筛后的秧床用土,并用木板刮平,厚度为2.5 cm.每育秧盘均匀拌入 AMF 菌剂 250 g (孢子数为33~35 g⁻¹).并均匀撒入40 g 发芽率达95%以上的水稻种子.最后秧床覆盖过筛后的秧床用土,厚度约为0.5 cm.不接种的水稻秧苗用灭菌后的 AMF 菌剂代替.接种和不接种的水稻秧苗各10个育秧盘.秧床四周用包裹塑料薄膜的砖块隔离,做好隔断.秧苗的水分和肥料管理按当地水稻秧苗的管理方式进行.6周后将两种秧苗分别移栽到大田不同的小区内.

试验区与农田防护林距离50 m,外设宽6 m的农田保护区.小区面积36 m²,内设1 m宽的保护行.边界用高80 cm的土工膜做隔断处理,其中50 cm作地下水文阻断,30 cm为地上的水文阻断,每小区设置单独的进水口和出水口.小区间隔2 m,空间隔离(见图2).移栽时每个小区20垅,每垅40穴,每穴3棵基本苗.移栽后的两种水稻分别进行施肥和不施肥两种处理.每个处理3个重复,采用随机区组设计.施肥分4次进行,底肥为高浓度水稻复合肥(N-P2O3-K2O:16-17-12,总养分质量分数大于45%),施肥量为50 g·m⁻².移栽后第2天、第15天和第30天追肥.第1次和第3次追加硫酸铵,追加量分别为6.0和10.0 g·m⁻².第2次追加尿素,追加量为12.5 g·m⁻².稻田水分管理按当地高产管理方式进行.



CK—对照; M—接种 AMF; F—施肥; M+F—施肥并接种 AMF

图 2 试验设置示意

1.3 数据采集与处理

AMF 侵染率按网格交叉法测定.根系样品用蒸馏水冲洗干净,并剪成1 cm左右长度的根段;于10%(质量分数)的 KOH 溶液中100℃下脱色30 min至透明,用蒸馏水冲洗干净;2%盐酸中和3~5 min,用蒸馏水冲洗干净;酸性品红染色液

90 ℃ 染色 30 min. 将经过上述处理的根样, 用镊子和解剖针挑选出 25 条粗细一致的根段整齐地排列在干净的载玻片上, 加盖洁净的盖玻片后在显微镜下观察. 每处理测定 100 条根段. 根据每条根段上菌根结构多少按 0%, 10%, 20%, 30%, 40%...100% 的侵染比例给出每条根段的侵染率, 代入以下公式:

侵染率(%) = $\sum (0\% \times I_0 + 10\% \times I_1 + 20\% \times I_2 + \dots + 100\% \times I_{10}) \div \text{观察总根段数}$

式中: I 为各侵染率下根段的条数; I_0 为侵染率为零的根段条数; I_1 为侵染率为 1% ~ 10% 的根段条数; 以此类推; I_{10} 为侵染率为 90% ~ 100% 的根段条数.

待水稻成熟后, 各个小区单打单收. 去杂后存放 90 d 以上, 待水稻含水率在 13% 左右, 且理化性质稳定后送农业部谷物及制品检验中心 (哈尔滨) 对稻米品质进行测定. 糙米率、精米率和垩白大小按《NY/T83—1988 米质测定方法》测定. 整精米率按照《GB1350—1999 附录 A 优质稻谷》测定. 粗蛋白按照《NY/T3—1982 米质测定方法》测定. 直链淀粉按照《NY/T55—1987 米质测定方法》测定. 垩白米率和垩白度按照《GB/T17891—1999 优质稻谷》测定. 胶稠度按照《GB/T5497—1985 优质稻谷》测定. 氨基酸按照《GB/T5009.124—2003 优质稻谷》测定. 稻米中铁、锌和硒的质量分数按微波消解-电感耦合等离子体-原子发射光谱法进行测定.

试验数据通过正态分布检验和方差齐性检验后进行方差分析. 数据统计采用 SPSS21.0 软件进行分析.

2 结果与讨论

2.1 化肥的施加和 AMF 接种对水稻根系 AMF 侵染率及水稻产量的影响

在水稻收获期测定了 AMF 在水稻根系的侵染率 (见图 3) 和水稻产量 (见图 4). 可以看出, 化肥的施加和 AMF 接种对 AMF 在水稻根系侵染率的影响显著不同. 在不接种条件下, AMF 在水稻根系的侵染率低于 5%, 且与是否施肥无关. 接种 AMF 能够显著改善 AMF 在水稻根系的定殖情况. 而化肥的施加抑制了接种的 AMF 在根系的生长. 如图 4 所示, 施肥处理和 AMF 接种二者单独使用均显著提高了水稻的产量. 但二者共同作用, 与单独接种 AMF 相比, 水稻产量进一步提高; 而与单独施肥条件相比, 水稻产量差异无统计学意义. 可见在施肥条件下接种 AMF 并不能有效提高水稻产量.

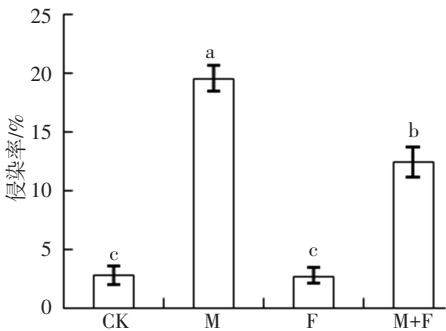


图 3 不同处理对 AMF 在水稻根系侵染率的影响

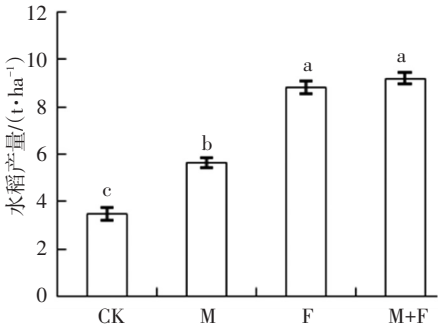


图 4 不同处理对 AMF 在水稻产量的影响

2.2 化肥的施加和 AMF 接种对稻谷加工品质的影响

加工品质又叫碾磨品质, 反应稻米对加工的适应性. 稻米的加工品质主要取决于籽粒的灌浆特性、胚乳结构及糠层厚度等, 如籽粒充实、胚乳结构致密、硬性好的谷粒, 加工适应性较好. 其中整精米率是影响稻米商品价值的主要因素, 整精米率高, 意味着稻谷食用部分大, 经济价值高, 且有利于提高优质稻米的商品价值.

如图 5 所示, 化肥的施加和 AMF 接种对稻谷加工品质的影响显著不同. 其中化肥的施加对糙米率、精米率和整精米率均有不同程度的改善, 即化肥的施加提高了水稻对加工的适应性. 而接种 AMF 对稻谷加工品质的作用受土壤肥料条件的影响. 在不施肥条件下, 接种 AMF 显著降低了稻谷的糙米率、精米率和整精米率. 其中, AMF 接种对整精米率的负面效应降低了稻谷食用部分所占比例, 进而严重影响了稻米的商品价值. 而在施肥条件下, 接种 AMF 对体现稻米加工品质的 3 个指标均无显著影响. 以上结果说明单独接种 AMF 降低了水稻的加工品质, 但与化肥共施后其对稻米加工品质的负面效应消失. 因此, 接种 AMF 可与化肥共施来保证稻谷的加工品质及商品价值.

水稻产量和品质的形成包括 3 个方面, 即物质生产、物质转运和物质分配. 只有这 3 方面相协调时水稻才能形成较高的产量和品质^[15]. 有研究表明, 齐穗后水稻群体光合速率的提高, 会导致碳水化合物转化成淀粉的速度加快, 从而使稻米胚

乳内的淀粉间隙加大,籽粒充实度变差,最终降低稻米的加工品质^[9].另外,AM 共生结构能够提高宿主光合速率^[16-17].本实验在前期阶段亦发现接种 AMF 能够提高水稻抽穗后光合作用速率^[18].可见,接种 AMF 对水稻加工品质的负面效应源于对光合作用的改善.

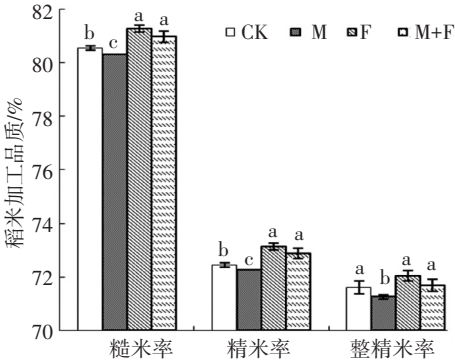


图 5 不同处理对稻米加工品质的影响

2.3 化肥的施加和 AMF 接种对稻米外观品质的影响

在水稻米贸易中,外观性状在一定程度上决定了市场上稻米的价格.我国目前出口的优质米关于垩白性状的标准是无垩白.在本试验中,化肥的施加提高了稻米的垩白米、率垩白大小和垩白度.可见化肥的施加降低了稻米的外观品质(如图 6 所示).AMF 接种对稻米外观品质的作用受施肥条件的影响.在不施肥条件下,与不接种处理相比,AMF 接种提高了稻米的垩白米率、垩白大小和垩白度,因而降低了稻米的外观品质.但在施肥条件下,AMF 接种降低了稻米的垩白米率、垩白大小和垩白度,从而改善了稻米的外观品质.可见在不施加肥料的条件下稻米外观品质较好,而传统的施肥和单独接种 AMF 均降低了稻米的外观品质.化肥的施加与接种 AMF 共同作用则能改善稻米的外观品质,从而提高稻米吸引消费者的能力.

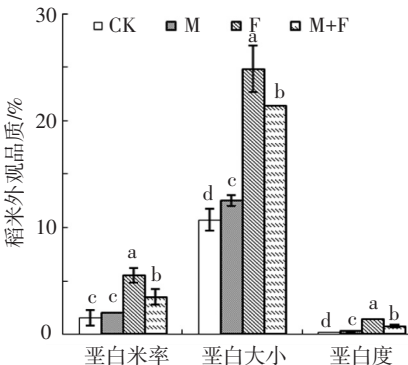


图 6 不同处理对稻米外观品质的影响

有研究表明,中国东北地区稻米的一些外观品质与国家优质指标有较大差距,达标率低的性状是垩白米率和垩白度^[19].本试验施加化肥后稻

米的垩白米率高达 5.5%,已不属于优质稻范畴,这与前人研究结果一致.但是,AMF 接种与化肥施加共同作用则改变了稻米外观品质的等级,即将稻米品质从非优质稻提升至三级优质稻.另外,前期研究表明,AMF 接种能够增加水稻株高^[20].水稻农艺性状与稻米品质相关关系的研究表明,株高较高的水稻稻米垩白性状不显著,外观品质较好^[9].尽管株高与加工品质关系密切的机理还不明确,但这能够说明施肥条件下接种 AMF 可能通过影响水稻株高而提高稻米的外观品质.

2.4 化肥的施加和 AMF 接种对稻米蒸煮和食味品质的影响

稻米的胶稠度是衡量米饭软硬的标准,对米饭软硬适口性有重要影响.胶稠度大的稻米做出的米饭较柔软.稻米中粗蛋白质质量分数也是衡量稻米蒸煮和食味品质的指标之一,但其对稻米品质的影响具有两面性.一方面,蛋白质质量分数高的稻米颜色浅黄,贮藏过程中容易变质,有时还有令人“倒胃口”的气味.因此,稻米的高蛋白质质量分数意味着较低的外观品质与食味品质.另一方面,稻米蛋白质含有的谷蛋白易消化吸收,营养价值较高,被认为是品质最好的植物蛋白质.因此,如何权衡粗蛋白这两方面的作用值得探讨.此外,直链淀粉质量分数能够反映稻米的蒸煮品质.直链淀粉质量分数高的稻米,米饭硬而松散,柔软性和粘性都差,食味不好.直链淀粉质量分数低的稻米,直链淀粉的相对分子质量也相对较低,米饭柔软和粘聚性都好,食味也好,冷饭重蒸仍如新鲜饭一样.

如图 7 所示,施肥能够提高稻米的胶稠度,使蒸煮的米饭较柔软,改善了稻米的蒸煮品质.但是 AMF 接种对稻米胶稠度的作用受土壤营养条件的影响.在不施加化肥的条件下,AMF 接种对稻米胶稠度无显著影响.而在施肥条件下,AMF 接种显著降低了稻米的胶稠度.与国际水稻研究所制定的标准相比,施肥条件下接种 AMF 的稻米胶稠度仍处于“软”水平.可见,施肥条件下接种 AMF 并不会对稻米的蒸煮品质造成本质的影响.

与不接种处理相比,AMF 接种在两种施肥条件下均显著提高了稻米粗蛋白的质量分数(见图 8).可见,无论是否与化肥配合使用,AMF 接种均能够提高稻米中谷蛋白的质量分数,提高稻米的营养品质.但是 AMF 接种生产的稻米容易变质,产生令人不愉快的气味,因此,需要较好的储藏条件.此外,在两种施肥条件下,AMF 接种还降低了稻米的直链淀粉质量分数,改善了稻米的粘聚性和食味.

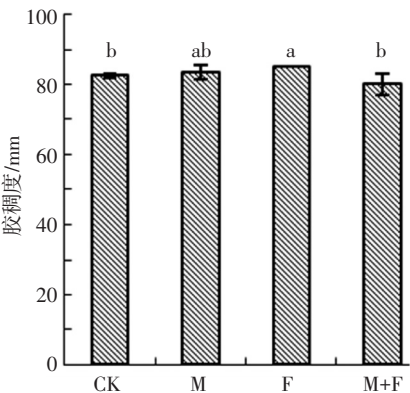


图 7 不同处理对稻米蒸煮品质的影响

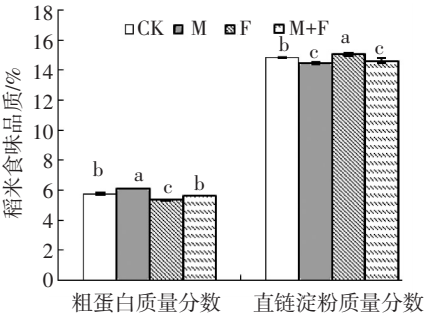


图 8 不同处理对稻米食味品质的影响

可见, AMF 接种与化肥配施不仅提高了稻米的蒸煮品质和食味品质, 而且在一定程度上改善了稻米的营养品质.

2.5 化肥的施加和 AMF 接种对稻米氨基酸总量和人体必需氨基酸质量分数的影响

营养品质是指稻米营养成分的丰富程度, 氨基酸总量和人体必需氨基酸的质量分数是表示稻米营养成分丰富程度的重要指标. 其中, 人体必需氨基酸质量分数的高低对稻米的营养价值尤为重要, 因为这些氨基酸在人体内不能合成, 需要从食物中摄取. 这些人体必需氨基酸包括亮氨酸、异亮氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸、蛋氨酸、赖氨酸和苏氨酸.

本项试验通过研究施肥和 AMF 接种对稻米中氨基酸总量及人体必需氨基酸质量分数的影响, 为高产、高效、优质的水稻生产提供依据. 如表 1 所示, AMF 接种对稻米氨基酸总量影响不显著. 另外, 亮氨酸、异亮氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸、蛋氨酸、赖氨酸、苏氨酸这些人体必需氨基酸质量分数也不受施肥和 AMF 接种的影响.

表 1 不同处理对稻米氨基酸总量和人体必需氨基酸质量分数的影响

项目	CK	M	F	M+F
氨基酸总量	6.17±0.06	6.04±0.26	5.66±0.07	5.76±0.26
苏氨酸	0.24±0	0.24±0	0.22±0.01	0.23±0.01
缬氨酸	0.45±0.01	0.43±0.02	0.42±0.01	0.42±0.01
蛋氨酸	0.16±0	0.15±0.01	0.14±0.03	0.15±0.03
异亮氨酸	0.21±0	0.21±0.01	0.19±0.01	0.20±0.03
亮氨酸	0.48±0.01	0.48±0.03	0.44±0.03	0.46±0.05
苯丙氨酸	0.41±0	0.40±0.05	0.39±0.02	0.40±0.03
赖氨酸	0.25±0	0.25±0	0.23±0.01	0.24±0.01

2.6 化肥的施加和 AMF 接种对稻米矿质元素质量分数的影响

微量元素铁、锌和硒是与人体健康密切相关的必需营养元素. 提高稻米中的微量元素质量分数及其生物有效性是改善稻米营养品质的重要指标, 研究稻米中微量元素的变化及其影响因素具有重要意义.

如图 9 所示, 化肥的施加和 AMF 接种对稻米硒质量分数无显著影响. 与不施肥对照相比, 施用化肥降低了稻米中铁和锌的质量分数, 接种 AMF 在不施肥条件下对铁和锌的质量分数无显著影响, 而在施肥条件下与不接种 AMF 处理相比, 接种 AMF 对二者有不同程度的改善, 从而施肥对稻米铁和锌质量分数的副作用消失. 有研究表明锌与磷存在拮抗效应, 即磷施加过量后会影响到水稻对锌的吸收, 导致锌缺乏^[21]. 此外, 磷肥也能够降低稻米中铁的质量分数^[22]. 国际水稻研究所还发现了稻米铁和锌的质量分数正相关^[23]. 在本实验中, 二者对化肥施加和 AMF 接种的响应也是一致的. 可见, AMF 在改善植物矿质营养方面起着重要作用.

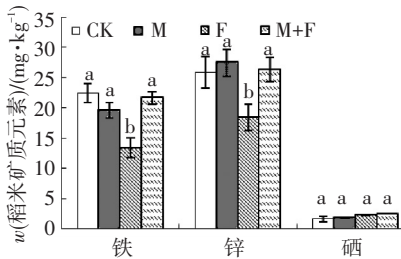


图 9 不同处理对稻米矿质元素质量分数的影响

Cavagnaro^[24]发现 AM 共生结构甚至能够在在大田条件下提高宿主锌的质量分数. 与不能形成菌根的变异植株相比, 在大田条件下, 被 AMF 侵染的番茄地上部分和果实锌质量分数提高了 50%^[25]. 在本试验施肥条件下, AMF 接种将稻米锌质量分数提高 44%. AMF 接种是否提高宿主铁质量分数受 AMF 菌种和宿主种类的影响. 在本实验中, 对水稻接种 AMF(摩西球囊霉)保证了施肥条件下稻米铁的质量分数. 而对小麦、水稻和黑莓接种根内球囊霉发现, AMF 只提高了小麦铁质量分数, 对水稻铁质量分数无显著影响^[26]. 原因可能是不同 AMF 菌种对宿主矿质营养的影响不同^[27].

3 结 论

1) AMF 接种与化肥施加共同作用可改善稻米的外观品质, 将稻米品质从非优质稻提升至三级优质稻.

2) AMF 接种与化肥共施还提高了稻米的蒸

煮品质和食味品质,保证了铁和锌的质量分数,改善了稻米的营养品质.而不施肥条件下,AMF 接种降低了稻谷的加工品质和外观品质,对蒸煮、食味及营养品质无显著影响.

3)从改善稻米品质的角度出发,AMF 接种不能完全替代化肥,化肥也不能替代 AMF 接种,只有 AMF 接种和化肥共施才能改善水稻品质.

4)丛枝菌根技术在稻米生产中能够提高稻米品质,对促进农民增收、企业增效具有重要意义,可以在水稻优质生产中推广应用.

参考文献

- [1] PENG S B, KHUSH G S, VIRK P, et al. Progress in ideotype breeding to increase rice yield potential [J]. *Field Crops Research*, 2008, 108(1): 32-38.
- [2] HUANG J, HU R, ROZELL E, et al. Insect-resistant GM rice in farmers' fields: assessing productivity and health effects in China [J]. *Science*, 2005, 308 (5722): 688-690.
- [3] 胡培松, 翟虎渠, 万建民. 中国水稻生产新特点与稻米品质改良[J]. *中国农业科技导报*, 2002, 4(4): 33-39.
- [4] 夏建国, 邓良基, 谭宏, 等. 影响稻米品质的主要土壤生态因子研究[J]. *四川农业大学学报*, 2000, 18 (4): 343-347.
- [5] JHA M N, PRASAD A N. Useful carriers for cyanobacteria: their response to cyanobacterial growth, acetylene-reductase activity, cyanobacterial grazers and paddy yield in calcareous soil [J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2005, 21(8/9): 1521-1527.
- [6] JHA M N, PRASAD A N. Efficacy of new inexpensive cyanobacterial biofertilizer including its shelf-life [J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2006, 22(1): 73-79.
- [7] 耿立清. 植株农艺性状与稻米品质关系的研究进展 [J]. *中国稻米*, 2005(1): 12-13.
- [8] 姚国新, 高山, 陈素生. 宁夏引进优质水稻品种的主要农艺性状和部分品质性状的分析[J]. *宁夏农学院学报*, 2003, 24(1): 3-5, 13.
- [9] 赵全志, 吴坤, 李梦琴, 等. 水稻群体光合速率的比较及其与稻米碾磨和外观品质的关系[J]. *中国粮油学报*, 2005, 20(2): 8-11.
- [10] 杨建昌, 常二华, 张文杰, 等. 根系化学讯号与稻米品质的关系[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(1): 38-47.
- [11] 王立, 贾文奇, 马放, 等. 菌根技术在环境修复领域中的应用及展望[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(2): 487-493.
- [12] 张淑娟, 王立, 马放, 等. 丛枝菌根 (AM) 对水稻生长促进及化肥减量研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(6): 958-962.
- [13] 马放, 李哲, 王立, 等. 丛枝菌根真菌对农药三环唑的残留减量研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2013, 45 (4): 58-63.
- [14] 马放, 刘贵祥, 王立, 等. AMF 对早熟禾建植及氮、磷截留能力的强化作用[J]. *中国给水排水*, 2013, 29 (13): 64-68.
- [15] 张淑娟, 王立, 马放, 等. 菌肥及其与氮磷配施对水稻生产及分配的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, 44(6): 33-36.
- [16] 李敏, 刘润进, 李晓林. 大田条件下丛枝菌根真菌对西瓜生长和枯萎病的影响[J]. *植物病理学报*, 2004, 34(5): 472-473.
- [17] 朱先灿, 宋凤斌, 徐洪文. 低温胁迫下丛枝菌根真菌对玉米光合特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21 (2): 470-475.
- [18] SMITH S E, READ D J. *Mycorrhizal symbiosis* [M]. 3rd ed. San diego, U.S.: Academic Press, 2008.
- [19] EL-SHARKAWI H, HONNA T, YAMAMOTO S, et al. Biological nitrogen fixation by native microorganisms in a waste-amended paddy soil [J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 2007, 29(4): 23-38.
- [20] 张淑娟. 丛枝菌根在水稻清洁生产中的应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [21] 付力成. 叶面喷施锌肥对水稻锌吸收, 分配及积累的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [22] 俄胜哲, 袁继超, 丁志勇, 等. 氮磷钾肥对稻米铁、锌、铜、锰、镁、钙质量分数和产量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2005, 19(5): 434-440.
- [23] ABILGOS R, MANAOIS R, CORPU Z, et al. Breeding for iron-dense rice in the Philippines [J]. *Philippine Journal of Crop Science*, 2002, 27(79): 23-26.
- [24] CAVAGNARO T R. The role of arbuscular mycorrhizas in improving plant zinc nutrition under low soil zinc concentrations: a review[J]. *Plant and Soil*, 2008, 304 (1/2): 315-325.
- [25] CAVAGNARO T R, JACKSON L E, SIX J, et al. Arbuscular mycorrhizas, microbial communities, nutrient availability, and soil aggregates in organic tomato production [J]. *Plant and Soil*, 2006, 282 (1/2): 209-225.
- [26] MÄDER P, KAISER F, ADHOLEYA A, et al. Inoculation of root microorganisms for sustainable wheat—rice and wheat—black gram rotations in India [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(3): 609-619.
- [27] CHEN X H, ZHAO B. Arbuscular mycorrhizal fungi mediated uptake of nutrient elements by Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) grown in lanthanum spiked soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2009, 45(6): 675-678.

(编辑 刘 彤)