

李妹娟, 田 华, 莫钊文, 等. 锰施用量对香稻生理特性和糙米锰含量的影响[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(3): 46-53.

锰施用量对香稻生理特性和糙米锰含量的影响

李妹娟^{1,2}, 田 华^{1,2}, 莫钊文^{1,2}, 孔雷蕾^{1,2}, 王抄抄^{1,2},
刘海东^{1,2}, 李芙蓉¹, 李志真¹, 唐湘如^{1,2}
(1 华南农业大学 农学院, 广东 广州 510642; 2 农业部华南地区作物栽培科学观测实验站, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】探究硫酸锰(MnSO₄)不同施用量对香稻生理特性和糙米中锰(Mn)元素含量的影响,为香稻的优质栽培提供理论依据。【方法】以常规香稻美香占和农香18为材料,通过盆栽试验,采用随机区组排列,设置4个基施MnSO₄处理,即分别施入MnSO₄ 6.67(Mn1)、10.00(Mn2)、13.33(Mn3)、16.67(Mn4) mg·kg⁻¹,以不施入MnSO₄作为对照(CK)。【结果】与CK相比,Mn4处理更有利于提高香稻糙米中Mn含量,美香占早、晚造增幅分别为22.02%和6.75%;农香18早、晚造增幅分别为1.48%和4.26%。基施MnSO₄能较好地增加早、晚造香稻孕穗期及后期的茎秆和叶片中全Mn含量,2个品种均以Mn4处理的结果较好。基施MnSO₄,以Mn4处理最有利于早、晚造香稻不同生育期叶片净光合速率(Pn)的提高和植株干物质积累量的增加;Mn4处理更有利于增强早、晚造各生育期叶片超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性,降低叶片丙二醛(MDA)含量。【结论】适量基施MnSO₄有利于提高香稻的Pn,增强香稻对外界环境的抗逆性和适应性,促进香稻的生长,提高香稻茎叶中全Mn含量,最终促进糙米中锰元素的积累;本研究最佳施用量为基施MnSO₄ 16.67 mg·kg⁻¹。

关键词:基施; MnSO₄; 香稻; 糙米锰含量; 生理特性
中图分类号:S143.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-411X(2016)03-0046-08

Effects of Mn application amounts on physiological characteristics and Mn content of aromatic rice

LI Meijuan^{1,2}, TIAN Hua^{1,2}, MO Zhaowen^{1,2}, KONG Leilei^{1,2}, WANG Chaochao^{1,2},
LIU Haidong^{1,2}, LI Furong¹, LI Zhizhen¹, TANG Xiangru^{1,2}
(1 College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Scientific Observing and Experimental Station of Crop Cultivation in South China, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510642, China)

Abstract:【Objective】To investigate the effects of MnSO₄ basal applications on physiological characters and Mn content of aromatic rice, and to provide a theoretical basis for cultivating high-quality aromatic rice. 【Method】Pot experiment was carried out using Meixiangzhan and Nongxiang 18 as planting materials. Four basal applications of MnSO₄ were employed with the concentrations of 6.67 (Mn1), 10.00 (Mn2), 13.33 (Mn3) and 16.67 (Mn4) mg·kg⁻¹ respectively. There was a control treatment (CK) with none MnSO₄ application. The experiment was arranged in a randomized block design. The Mn contents of leaves, stems and brown rice grains were measured. The enzyme activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD), and the content of malondialdehyde (MDA) in rice leaf were investigated. 【Result】Compared to the control, Mn4 was more beneficial to increase the Mn content of

收稿日期:2015-06-29 优先出版时间:2016-04-15
优先出版网址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20160415.1555.030.html>
作者简介:李妹娟(1988—),女,硕士研究生,E-mail:limeijuan028@163.com;通信作者:唐湘如(1964—),男,教授,博士,
E-mail: tangxr@scau.edu.cn
基金项目:国家自然科学基金(31271646);广东省自然科学基金(8151064201000017);广东省农业攻关项目(2011A020202001);广东省农业标准化项目(4100F10003)

brown rice grains in early and late seasons by 22.02% and 6.75% respectively for Meixiangzhan, and 1.48% and 4.26% respectively for Nongxiang18. Mn4 treatment was better to increase the Mn content in the stems and leaves of early and late aromatic rice varieties after booting stages. Mn4 treatment improved the net photosynthetic rate of leaf and dry mass of above-ground of early and late aromatic rice varieties. Moreover, Mn4 treatment was more effective to improve the SOD and POD activities and decrease the MDA content in the leaves of early and late aromatic rice varieties. 【Conclusion】 Appropriate basal application of MnSO_4 would be more effective to improve the net photosynthetic rate and the Mn contents of stem, leaf and brown rice grains, enhance the resistance, adaptability and growth of aromatic rice variety. The optimal application amount of MnSO_4 is $16.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in this study.

Key words: basal application; MnSO_4 ; aromatic rice; Mn content of brown rice grain; physiological characteristic

据统计,稻米作为主食为亚洲近 30 亿人口提供了 35% ~ 59% 的热量^[1]。中国是世界上最大的稻米生产和消费大国,水稻是中国重要的粮食作物之一,中国稻米的总产量约占粮食总产量的 40%^[2]。香稻是水稻中的珍品,除根部外香稻的茎、叶、花、稻米均能散发怡人香味^[3-4]。香稻香味的主要特征成分是 2-乙酰-1-吡咯啉^[5-6]。香米营养品质优良,含有大量蛋白质、各种氨基酸、维生素、淀粉酶、脂肪酶、麦芽糖酶以及钙、磷、铁、锰等元素,具有滋补和药用效果^[7],具有很高的经济价值,在稻米市场中具有很强的竞争力^[8]。因此,香稻的优质高产研究受到科研工作者的高度重视。锰元素是植物生长所必需的微量元素之一,是维持叶绿体结构所必需的元素^[9],对维持叶绿体膜的正常结构有重要的作用^[10-12],直接参与植物光合作用中电子传递系统的氧化还原过程及 PSII 系统中水的光解^[13-14],促进植物的生长发育。锰亦是多种酶的活化剂,在细胞代谢中起重要作用。光合作用是一系列复杂代谢反应的总和,是生物界赖以生存的基础,也是地球碳-氧平衡的重要媒介,光合作用增强会促进作物的生长,促进水稻植株生物量的增加。已有研究表明,光合作用的增强可以增加干物质积累量^[15-16]。

超氧化物歧化酶(SOD)是生物体内超氧阴离子自由基的清除剂^[17],过氧化物酶(POD)是植物在逆境条件下酶促防御系统的关键酶之一,SOD 与 POD 相互协调配合,清除过剩的自由基,使体内自由基维持在一个正常的动态水平,提高植物的抗逆性^[18]。丙二醛(MDA)是膜脂过氧化反应的终产物,在反应过程中会引起蛋白质、核酸等生命大分子的交联聚合,且具有细胞毒性,是鉴定植物伤害程度的重要指标。冯绪猛等^[19]研究表明,随着农药处理浓度的加大,水稻叶片 MDA 含量也在逐渐增加;孙永健等^[20]

研究表明,成熟期的水氮互作使剑叶中 MDA 增加,有利于 SOD 和 POD 活性的提高,促进结实期物质的转运及产量的增加。本试验研究了 MnSO_4 不同施用量处理对香稻生理特性和糙米中 Mn 含量的影响,以期指导香稻的锰肥施用,提高香米中 Mn 含量,为香稻的优质栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试香稻品种:美香占,由广东省农业科学院水稻研究所提供;农香 18,湖南省水稻研究所提供;均为籼型常规香稻。锰肥: $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, AR, w 为 99%,由江苏南京化学试剂股份有限公司提供。

1.2 试验设计

试验于 2014 年在华南农业大学农学院教学实验农场进行。土壤理化性质:沙壤土,有机质、全氮分别为 25.65 、 $1.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮、速效磷、速效钾、全锰分别为 85.47 、 25.14 、 153.20 和 $15.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 4.88。土壤经风干、磨碎后装入直径 31 cm、高 29 cm 的 PVC 盆中,每盆装土 15 kg,在水稻移栽前加水充分浸泡、拌匀。

设置 4 个施 Mn 处理,分别为基施 MnSO_4 6.67 (Mn1)、 10.00 (Mn2)、 13.33 (Mn3) 和 $16.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Mn4),以不施 MnSO_4 为对照(CK)。每个处理共 16 盆,每盆种 5 穴,每穴 3 棵苗,试验按随机区组排列。各处理均施氮肥 $3.20 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 和氯化钾 $2.00 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ (基肥 70%、分蘖肥 30%)、过磷酸钙 $5.00 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ (基肥 100%),基肥于移栽前 5 d 施入,分蘖肥于移栽 7 d 后施入。早稻于 2014 年 3 月 11 日播种,4 月 7 日移栽,美香占于 7 月 2 日收获,农香 18 于 7 月 5 日收获;晚稻于 2014 年 7 月 17 日播种,8 月 3 日移栽,美香占于 10 月 24 日收获,农香 18 于

10 月 26 日收获。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 全 Mn 含量的测定 早、晚季香稻均分别于分蘖期、孕穗期、齐穗期和成熟期 4 个时期采样,各生育时期每个处理从不同盆中进行取样,共 3 穴。分别取各时期的茎秆和叶片以及收获后的糙米于 80℃烘箱烘干、磨成粉末,用于测定茎秆和叶片以及糙米中全 Mn 含量。植株样品的全 Mn 含量的测定参照周焱等^[21]的方法进行浸提,再用日本岛津火焰原子吸收分光光度计(AA-6300C)在波长为 279.5 nm 下测定其吸光值。

1.3.2 净光合速率的测定 测定时间为 09:00—11:00,采用 Li6400XT 便携式光合速率测定仪(光照度 1 000 lx)分别测定分蘖期、孕穗期香稻倒一完全展开叶和齐穗期、成熟期香稻剑叶的净光合速率,每个处理重复 3 次,每个重复读取 3 个稳定的数据。

1.3.3 干物质的测定 分别于分蘖期、孕穗期、齐穗期、成熟期每个处理取植株 3 茺,将植株地上部分按茎秆、叶、穗(成熟期)分开,于 105℃烘箱中杀青 30 min、80℃烘干至恒质量时称质量。

1.3.4 抗性指标的测定 采用余冰宾^[22]的氯化硝基四氮唑蓝(NBT)光化学还原法测定超氧化物歧化

酶(SOD)的活性,以抑制 NBT 光化学还原的 50% 记为 1 个酶活力单位(1 U);采用余冰宾^[22]的愈创木酚比色法测定过氧化物酶(POD)活性,以每分钟 $D_{470\text{ nm}}$ 变化 1 记为 1 个酶活力单位(1 U);采用汤章诚^[23]的硫代巴比妥酸(TBA)比色法测定丙二醛(MDA)含量。

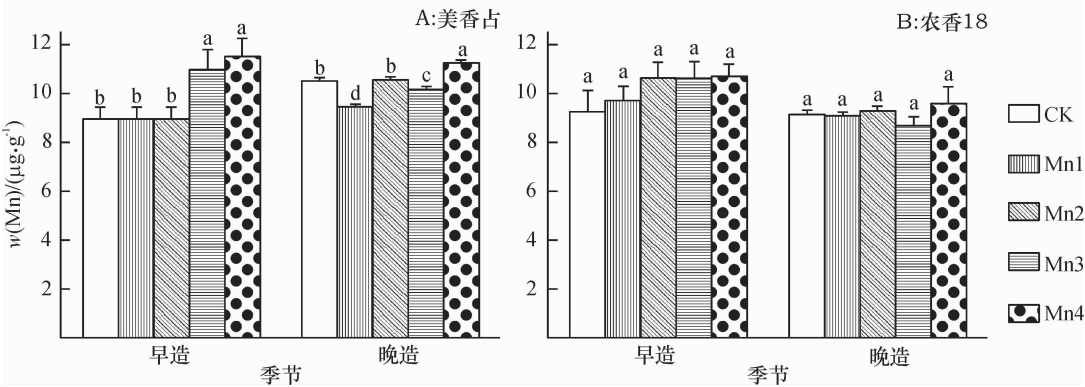
1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2013 和 Statistix 8.0 软件进行数据分析,LSD 法对不同处理数据进行多重比较,用 Origin 8.1 软件作图。

2 结果与分析

2.1 基施 MnSO_4 对早、晚造香稻全 Mn 含量的影响

2.1.1 糙米全 Mn 含量 从图 1 可以看出,早造香稻美香占 Mn3 和 Mn4 中糙米全 Mn 含量分别较 CK 增加了 18.41%、22.02%,差异显著;农香 18 基施 MnSO_4 处理的糙米全 Mn 含量分别高于 CK,增幅达 4.45%~13.78%,但均未达到显著水平。晚造美香占 Mn2 和 Mn4 糙米全 Mn 含量均高于 CK 处理,但只有 Mn4 达到显著水平;农香 18 的 Mn2 和 Mn4 糙米全 Mn 含量均高于 CK 处理,以 Mn4 效果更好,较 CK 增加了 4.26%,但均未达到显著水平。



相同品种、相同季节不同柱子上凡是有有一个相同小写字母者,表示不同处理之间差异不显著 (LSD 法, $P > 0.05$)。

图 1 基施 MnSO_4 对早、晚造香稻糙米中全 Mn 含量的影响

Fig.1 Effect of MnSO_4 basal application on Mn content of aromatic brown rice in early and late seasons

2.1.2 茎秆全 Mn 含量 表 1 的结果表明,基施 MnSO_4 可以提高早、晚造孕穗期至成熟期香稻茎秆中全 Mn 含量,降低分蘖期香稻茎秆中全 Mn 含量,且表现趋势基本一致。早造孕穗期,美香占基施 MnSO_4 可以提高茎秆全 Mn 含量(Mn3 除外);农香 18 基施 MnSO_4 茎秆全 Mn 含量均显著高于 CK,且以 Mn4 效果最好。齐穗期,美香占基施 MnSO_4 茎秆全 Mn 含量均高于 CK,除 Mn1 外均达到显著水平;农香

18 基施 MnSO_4 (Mn1 除外)的茎秆全 Mn 含量均高于 CK 处理,但只有 Mn4 达到显著水平。成熟期,美香占和农香 18 基施 MnSO_4 茎秆全 Mn 含量均高于 CK,农香 18 以 Mn4 效果最显著。对于晚造而言,孕穗期,美香占基施 MnSO_4 (Mn1 除外)较 CK 均显著提高茎秆全 Mn 含量;农香 18 基施 MnSO_4 茎秆全 Mn 含量均显著高于 CK,2 个品种均以 Mn4 效果最显著。齐穗期,美香占 Mn2 和 Mn4 的茎秆全 Mn 含

表 1 基施 MnSO_4 对早、晚造香稻茎秆中全 Mn 含量的影响¹⁾

		$w(\text{Mn})/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$							
品种	处理	早造				晚造			
		分蘖期	孕穗期	齐穗期	成熟期	分蘖期	孕穗期	齐穗期	成熟期
美香占	CK	203.36a	155.82a	158.52b	173.18b	173.24a	135.74c	169.42cd	165.91d
	Mn1	198.50b	158.73a	174.24ab	190.05a	158.17b	120.94d	170.90bc	169.36c
	Mn2	191.48c	158.92a	181.61a	183.87ab	171.34a	143.73b	174.94b	199.87a
	Mn3	185.24d	155.61a	181.31a	180.43ab	161.94b	143.88b	165.95d	182.26b
	Mn4	176.19e	159.77a	181.45a	176.12ab	163.50a	150.39a	188.87a	200.59a
农香 18	CK	172.22a	158.85c	188.59b	164.50b	141.06c	113.75b	129.74d	136.31e
	Mn1	166.99b	165.81b	175.48c	170.40b	155.96b	146.71a	168.35c	154.16d
	Mn2	163.45c	169.57ab	190.11ab	169.58b	161.22a	146.63a	165.73c	160.98c
	Mn3	159.20d	173.26a	192.36ab	184.85a	160.38a	145.53a	178.25a	186.21a
	Mn4	156.63e	173.83a	193.63a	188.09a	159.23a	150.13a	174.10b	171.28b

1) 相同品种、同列数据后凡是有一个相同小写字母者,表示不同处理之间差异不显著(LSD法, $P>0.05$)。

量较 CK 均显著提高;农香 18 基施 MnSO_4 茎秆全 Mn 含量均显著高于 CK,2 个品种均以 Mn4 的效果较好。成熟期,美香占和农香 18 基施 MnSO_4 茎秆全 Mn 含量均显著高于 CK,且美香占以 Mn4 效果最好。

2.1.3 叶片全 Mn 含量 基施 MnSO_4 可以提高早、晚造孕穗期至成熟期香稻叶片中全 Mn 含量,降低分蘖期香稻叶片中全 Mn 含量,且表现趋势基本一致。对于早造而言,孕穗期,美香占基施 MnSO_4 (Mn3 除外)可以提高叶片全 Mn 含量,农香 18 基施 MnSO_4 叶片全 Mn 含量均显著高于 CK(除 Mn1 外),且 2 个品种均以 Mn4 效果最好。齐穗期,美香占基施 MnSO_4 叶片全 Mn 含量均高于 CK,但只有 Mn3 达到

显著水平;农香 18 基施 MnSO_4 (Mn1 除外)叶片全 Mn 含量均高于 CK,以 Mn4 效果最好,但均未达到显著水平。成熟期,美香占 Mn2、Mn4 叶片全 Mn 含量较 CK 均显著提高;农香 18 基施 MnSO_4 叶片全 Mn 含量均高于 CK,以 Mn4 效果最显著。对于晚造而言,孕穗期,2 个品种基施 MnSO_4 (Mn1 除外)叶片全 Mn 含量均显著高于 CK,农香 18 以 Mn4 效果最显著。齐穗期,美香占 Mn2、Mn3 和 Mn4 的叶片全 Mn 含量较 CK 均显著提高,以 Mn4 效果最好;农香 18 只有 Mn4 的叶片全 Mn 含量高于 CK,但差异不显著。成熟期,2 个品种基施 MnSO_4 叶片全 Mn 含量均高于 CK,且均以 Mn4 的叶片全 Mn 含量最高。

表 2 基施 MnSO_4 对早、晚造香稻叶片中全 Mn 含量的影响¹⁾

		$w(\text{Mn})/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$							
品种	处理	早造				晚造			
		分蘖期	孕穗期	齐穗期	成熟期	分蘖期	孕穗期	齐穗期	成熟期
美香占	CK	205.44a	160.91a	174.04b	192.26b	147.02c	158.83c	186.92b	183.46c
	Mn1	198.11b	162.45a	181.04ab	198.56ab	152.85ab	148.05d	183.28b	198.41b
	Mn2	192.02c	161.15a	179.06ab	202.21a	153.91a	169.06a	194.90a	211.26a
	Mn3	186.49d	160.89a	189.22a	198.18ab	148.05bc	169.92a	195.53a	187.77c
	Mn4	177.18e	164.59a	179.99ab	200.63a	144.81c	165.00b	199.20a	212.00a
农香 18	CK	174.36a	165.90c	190.59ab	190.46b	151.63a	153.90d	214.05ab	126.68c
	Mn1	169.91b	169.72bc	186.80b	201.88a	154.07a	170.81c	195.05c	145.33b
	Mn2	166.33c	171.62b	191.69ab	194.52b	153.17a	180.38ab	193.98c	148.47b
	Mn3	162.31d	173.54b	196.36a	204.97a	153.18a	177.76b	210.15b	148.73b
	Mn4	160.83d	179.38a	197.74a	207.41a	148.83a	181.54a	216.24a	166.38a

1) 相同品种、同列数据后凡是有一个相同小写字母者,表示不同处理之间差异不显著(LSD法, $P>0.05$)。

2.2 基施 MnSO_4 对早、晚造香稻生长特性的影响

2.2.1 叶片净光合速率 表 3 表明,对于早造而言,分蘖期,美香占 Mn2、Mn3 和 Mn4 较 CK 提高了

叶片净光合速率(P_n),Mn4 达到显著水平;农香 18 的 Mn2 和 Mn3 较 CK 提高了叶片 P_n ,其中 Mn3 达到显著水平。孕穗期,美香占基施 MnSO_4 叶片 P_n 均显

著高于 CK;农香 18 基施 MnSO_4 (Mn_2 除外) 叶片 Pn 均高于 CK, Mn_4 达到显著水平。齐穗期, 与 CK 相比, 美香占仅有 Mn_4 、农香 18 的 $\text{Mn}_1 \sim \text{Mn}_4$ 均提高了叶片 Pn, 但均未达到显著水平。成熟期, 美香占 Mn_1 、 Mn_3 和 Mn_4 以及农香 18 的 4 个处理较 CK 均显著提高了叶片 Pn。对于晚造而言, 分蘖期, 美香占 Mn_2 和 Mn_3 较 CK 显著降低了叶片 Pn; 农香 18 除 Mn_4 外均提高了叶片净光合速率, 但未达显著水平。孕穗期, 美香占基施 MnSO_4 (Mn_4 除外) 较 CK 均显著提高了叶片 Pn; 农香 18 仅有 Mn_2 和 Mn_3 叶片 Pn 高于 CK, 其中 Mn_3 达显著水平。齐穗期, 基施 MnSO_4 美香占、农香 18 叶片 Pn 均比 CK 显著提高。成熟期, 美香占只有 Mn_4 叶片 Pn 高于 CK, 农香 18 基施 MnSO_4 叶片 Pn 均高于 CK。综上所述, 基施 MnSO_4 以 $16.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Mn 处理) 更有利于提高美香占和农香 18 的叶片 Pn。

表 3 基施 MnSO_4 对早、晚造香稻叶片净光合速率 (Pn) 的影响¹⁾

		Pn/($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)							
品种	处理	早造				晚造			
		分蘖期	孕穗期	齐穗期	成熟期	分蘖期	孕穗期	齐穗期	成熟期
美香占	CK	17.77b	15.42c	19.66ab	10.58d	27.90a	13.64c	14.24c	31.89a
	Mn_1	16.34c	18.45ab	18.26c	11.42c	27.92a	17.18a	16.26b	29.94ab
	Mn_2	18.35b	18.01b	19.09b	10.19d	22.88c	14.87b	20.23a	27.95b
	Mn_3	17.87b	17.28b	18.19c	12.78b	25.35bc	14.97b	16.61b	29.60ab
	Mn_4	20.72a	19.85a	19.91a	14.09a	26.66ab	14.27bc	19.51a	32.38a
农香 18	CK	18.59b	23.78bc	18.76a	10.77c	24.47ab	15.82b	15.52c	32.56c
	Mn_1	18.21b	24.53bc	19.87a	14.29a	25.71a	12.89c	18.22b	35.03bc
	Mn_2	18.84ab	22.31c	19.39a	12.77b	25.37a	16.21ab	17.36b	42.53a
	Mn_3	19.58a	25.54b	18.93a	13.24b	25.46a	17.25a	17.26b	36.18bc
	Mn_4	17.94b	28.91a	19.70a	14.47a	23.25b	13.62c	19.93a	37.73b

1) 相同品种、同列数据后凡是有一个相同小写字母者, 表示不同处理之间差异不显著 (LSD 法, $P>0.05$)。

2.2.2 地上部干物质积累量 表 4 的结果表明, 对于早造而言, 美香占和农香 18 植株地上部干物质积累量从分蘖期至成熟期均以 Mn_4 最高 (除了农香 18 成熟期外)。对于晚造而言, 基施 MnSO_4 , 美香占在齐穗期和成熟期均以 Mn_4 的干物质积累量较高, 农香 18 各生育期 (除分蘖期 Mn_1 、 Mn_2 、 Mn_4 外) 植株地上部干物质积累量均高于 CK, 其中 Mn_4 在孕穗期和成熟期均达显著水平, Mn_2 在齐穗期和成熟期均达显著水平。

表 4 基施 MnSO_4 对早、晚造地上部干物质积累量的影响¹⁾

		m/g							
品种	处理	早造				晚造			
		分蘖期	孕穗期	齐穗期	成熟期	分蘖期	孕穗期	齐穗期	成熟期
美香占	CK	5.79b	12.90ab	19.23a	27.69a	7.80a	18.20a	18.83ab	21.51a
	Mn_1	6.41ab	11.80ab	18.91a	24.73a	6.44b	18.52a	16.25b	22.10a
	Mn_2	6.31ab	11.07b	18.88a	27.69a	5.30bc	15.04a	17.02b	20.50a
	Mn_3	6.84a	13.55a	19.68a	24.61a	5.85bc	16.63a	17.42b	21.93a
	Mn_4	7.00a	13.58a	20.14a	28.87a	5.14c	18.38a	23.13a	22.18a
农香 18	CK	5.59a	10.97b	19.47b	38.51ab	6.59a	12.59b	14.27b	19.67c
	Mn_1	5.53a	11.11b	18.66bc	33.26b	5.63a	14.80b	15.75b	22.85bc
	Mn_2	4.42b	12.25ab	17.07c	37.17ab	7.51a	15.75ab	20.90a	31.22a
	Mn_3	5.70a	11.35b	19.90b	43.37a	6.44a	18.45ab	17.68ab	25.05abc
	Mn_4	6.15a	13.35a	22.04a	33.98b	6.14a	22.16a	19.07ab	28.25ab

1) 相同品种、同列数据后凡是有一个相同小写字母者, 表示不同处理之间差异不显著 (LSD 法, $P>0.05$)。

2.3 基施 MnSO_4 对香稻叶片生理特性的影响

2.3.1 叶片 SOD 活性 表 5 的结果表明, 不同处理早、晚造各时期香稻叶片 SOD 活性不同。早造, 与 CK 相比, 分蘖期至齐穗期, 适量施 Mn 处理可以显著地提高叶片 SOD 活性, 2 个品种均以 Mn_4 效果最佳。成熟期, Mn_4 较显著提高了美香占叶片 SOD 活性; 除 Mn_1 外, 其他处理较 CK 均显著提高了农香 18 叶片 SOD 活性。晚造, 美香占 Mn_2 和 Mn_4 分蘖期叶

片 SOD 活性高于 CK,基施 MnSO_4 (Mn_2 除外)均提高了孕穗期叶片 SOD 活性, Mn_3 和 Mn_4 齐穗期叶片 SOD 活性高于 CK,成熟期仅 Mn_4 的叶片 SOD 活性高于 CK;农香 18 基施 MnSO_4 各时期叶片 SOD 活性

均比 CK 强,且以 Mn_4 效果最好。可见,早、晚造同时提高 2 个品种叶片 SOD 活性的最佳处理是 Mn_4 ,也有利于提高香稻对逆境的适应能力。

表 5 基施 MnSO_4 对早、晚造香稻叶片 SOD 活性的影响¹⁾

Tab.5 Effect of MnSO_4 basal application on SOD activity of aromatic rice leaf in early and late seasons										$\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$
品种	处理	早造				晚造				
		分蘖期	孕穗期	齐穗期	成熟期	分蘖期	孕穗期	齐穗期	成熟期	
美香占	CK	163.10a	135.59b	126.08b	139.57bc	189.49b	169.63c	232.16a	215.31a	
	Mn_1	157.93a	134.02b	126.27b	150.77ab	182.33b	177.80c	223.20a	184.25b	
	Mn_2	165.59a	136.91b	137.17a	136.91c	192.61b	143.97d	228.33a	211.14a	
	Mn_3	161.14a	158.23a	124.15b	136.50c	187.64b	202.33b	242.58a	213.92a	
	Mn_4	163.27a	157.25a	147.31a	156.77a	205.70a	219.98a	239.16a	219.11a	
农香 18	CK	175.88ab	138.30a	106.86b	137.02c	212.05a	177.35a	143.79d	183.70a	
	Mn_1	170.55b	145.96a	109.86b	123.08d	213.33a	184.78a	206.47c	183.81a	
	Mn_2	151.10c	133.98a	130.84ab	204.15a	213.58a	177.80a	191.13c	187.33a	
	Mn_3	177.53ab	115.98b	180.72a	205.12a	213.74a	186.21a	226.55b	189.09a	
	Mn_4	190.70a	146.49a	175.78a	194.58b	216.25a	191.80a	251.34a	194.90a	

1) 相同品种、同列数据后凡是有一个相同小写字母者,表示不同处理之间差异不显著 (LSD 法, $P>0.05$)。

2.3.2 叶片 POD 活性 表 6 的结果表明,早、晚造叶片 POD 活性随基施 MnSO_4 含量的不同而异。早造,美香占以 Mn_4 的叶片 POD 活性较强,其中分蘖期、孕穗期、齐穗期的其他处理叶片 POD 活性均低于 CK;农香 18 基施 MnSO_4 (分蘖期 Mn_2 、齐穗期 Mn_1 和 Mn_3 除外)均提高叶片 POD 活性,均以 Mn_4 效果较好,且 Mn_4 各时期 (除农香 18 齐穗期外) 叶片

POD 活性均比 CK 显著提高。晚造,在分蘖期和孕穗期时,基施 MnSO_4 (Mn_1 除外)较 CK 均显著提高美香占的叶片 POD 活性;基施 MnSO_4 (分蘖期 Mn_3 和孕穗期 Mn_1 、 Mn_2 除外)均显著提高农香 18 的叶片 POD 活性。齐穗期和成熟期,美香占和农香 18 叶片 POD 活性均以 Mn_4 的效果较好。

表 6 基施 MnSO_4 对早、晚造香稻叶片 POD 活性的影响¹⁾

Tab.6 Effect of MnSO_4 basal application on POD activity of aromatic rice leaf in early and late seasons										$\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$
品种	处理	早造				晚造				
		分蘖期	孕穗期	齐穗期	成熟期	分蘖期	孕穗期	齐穗期	成熟期	
美香占	CK	142.77a	93.68ab	117.11a	106.97ab	113.46c	83.41d	115.46b	113.25b	
	Mn_1	121.28b	86.53ab	96.04b	111.56a	108.99c	75.34e	115.88b	106.89c	
	Mn_2	126.04b	78.58b	92.25b	102.05b	132.25ab	90.76c	118.23b	121.32a	
	Mn_3	101.82c	83.33ab	87.61b	107.57ab	124.31b	104.10a	101.35c	111.34b	
	Mn_4	144.21a	97.92a	120.87a	113.79a	135.55a	97.99b	135.27a	119.92a	
农香 18	CK	154.76bc	106.61c	127.42bc	125.75d	154.26c	125.27b	92.05d	113.67c	
	Mn_1	172.01a	125.33b	124.91bc	126.36cd	176.99ab	94.53d	100.71c	107.23d	
	Mn_2	151.34c	150.89a	139.08a	138.93ab	171.64b	102.03c	109.80b	125.58b	
	Mn_3	164.28ab	157.70a	123.50c	132.83bc	124.92d	138.00a	113.00ab	167.83a	
	Mn_4	169.89a	157.14a	132.96ab	144.48a	183.73a	138.45a	117.98a	170.32a	

1) 相同品种、同列数据后凡是有一个相同小写字母者,表示不同处理之间差异不显著 (LSD 法, $P>0.05$)。

2.3.3 叶片 MDA 含量 MDA 含量的降低可以减轻其对香稻细胞的损害程度,有利于香稻吸收营养和水分。表 7 的结果表明,对于早造而言,分蘖期,美香占基施 MnSO_4 的叶片 MDA 含量均低于 CK,农香 18 仅 Mn_3 的叶片 MDA 含量低于 CK;孕穗期,2 个品种均以 Mn_4 的叶片 MDA 含量最低;齐穗期,美

香占以 Mn_2 的叶片 MDA 含量降低最显著,农香 18 则以 Mn_4 降低最显著;成熟期,2 个品种均以 Mn_4 的叶片 MDA 含量降低最显著。对于晚造而言,分蘖期,基施 MnSO_4 的叶片 MDA 含量均以 Mn_3 降低最显著;齐穗期,基施 MnSO_4 较 CK 均显著降低美香占叶片 MDA 含量;孕穗期,2 个品种则均以 Mn_2 、 Mn_4

的叶片 MDA 含量降低显著;齐穗期,2 品种均以 Mn4 说明基施 $MnSO_4$ 可以不同程度地降低香稻各生育期叶片 MDA 含量降低最显著。成熟期,美香占以 叶片 MDA 含量,2 个品种均以 Mn4 效果最好,其次是 Mn2。Mn4、农香 18 以 Mn2 和 Mn4 的叶片 MDA 含量较低。

表 7 基施 $MnSO_4$ 对早、晚造叶片 MDA 含量的影响¹⁾

Tab.7 Effect of $MnSO_4$ basal application on MDA content of aromatic rice leaf in early and late seasons $\mu mol \cdot g^{-1}$									
品种	处理	早造				晚造			
		分蘖期	孕穗期	齐穗期	成熟期	分蘖期	孕穗期	齐穗期	成熟期
美香占	CK	4.78a	6.46a	7.81a	7.91b	6.02a	4.18ab	17.10a	10.79b
	Mn1	2.75bc	6.57a	7.27b	10.70a	3.73b	4.95a	11.48c	10.71b
	Mn2	2.30cd	6.34a	5.39d	8.45b	3.92b	2.30d	13.97b	14.04a
	Mn3	1.99d	6.33a	8.26a	10.23a	1.18c	3.47bc	10.39c	11.70b
	Mn4	3.34b	5.44a	6.04c	6.63c	3.73b	2.82cd	10.10c	7.62c
农香 18	CK	4.27b	5.98bc	10.64a	10.93a	3.65ab	8.21a	7.70b	12.39b
	Mn1	6.53a	7.06b	8.24b	7.39d	4.70a	4.36b	7.36b	10.17c
	Mn2	6.57a	10.30a	7.04bc	8.58c	3.58ab	2.62c	7.98ab	8.76c
	Mn3	2.70c	5.75c	10.94a	9.86b	2.03c	8.90a	8.61a	15.64a
	Mn4	4.32b	4.34d	6.50c	7.33d	2.88bc	2.78c	6.22c	9.93c

1) 相同品种、同列数据后凡是有一个相同小写字母者,表示不同处理之间差异不显著 (LSD 法, $P>0.05$)。

2.4 香稻糙米与植株中 Mn 含量的相关性

表 8 的结果表明,香稻糙米 Mn 含量与孕穗期、齐穗期的茎秆 Mn 含量存在显著或极显著正相关,各个生长时期(孕穗期与成熟期间存在负相关除外)的茎秆 Mn 含量之间均呈正相关。而香稻糙米 Mn 含

量与成熟期的叶片 Mn 含量呈极显著正相关,与其他生长时期的叶片 Mn 含量呈负相关。分蘖期与孕穗期、齐穗期的叶片 Mn 含量呈极显著负相关,而孕穗期与齐穗期的叶片 Mn 含量呈极显著正相关。

表 8 不同生育期香稻植株与糙米中全 Mn 含量(w) 的相关性¹⁾

Tab.8 Correlation coefficients between Mn contents of aromatic rice plant and brown rice grain in different periods						
因子	生育期	$w_{\text{糙米}}$	分蘖期	孕穗期	齐穗期	成熟期
$w_{\text{糙米}}$		1.000 0	-0.005 1	0.298 5 *	0.398 6 **	0.143 0
$w_{\text{茎秆}}$	分蘖期	-0.005 1	1.000 0	0.160 1	0.029 3	0.376 1 **
	孕穗期	0.298 5 *	0.160 1	1.000 0	0.715 3 **	-0.298 2 *
	齐穗期	0.398 6 **	0.029 3	0.715 3 **	1.000 0	0.010 7
	成熟期	0.143 0	0.376 1 **	-0.298 2 *	0.010 7	1.000 0
$w_{\text{糙米}}$		1.000 0	-0.035 8	-0.029 2	-0.156 1	0.428 9 **
$w_{\text{叶片}}$	分蘖期	-0.035 8	1.000 0	-0.417 7 **	-0.685 5 **	0.288 6 *
	孕穗期	-0.029 2	-0.417 7 **	1.000 0	0.479 2 **	-0.423 3 **
	齐穗期	-0.156 1	-0.685 5 **	0.479 2 **	1.000 0	-0.496 7 **
	成熟期	0.428 9 **	0.288 6 *	-0.423 3 **	-0.496 7 **	1.000 0

1) * 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平的显著相关。

3 讨论与结论

土壤基施 $MnSO_4$ 后,Mn 以离子形式存在而被香稻吸收,Mn 是维持叶绿体结构所必需的元素,是叶绿素合成过程中酶促反应的辅因子,它直接参与植物光合作用中电子传递系统的氧化还原过程及 PSII 系统中水的光解^[11,14]。本试验对香稻各时期的剑叶光合测定可知,基施 $MnSO_4$ 可以不同程度地提高早、晚季香稻叶片 Pn,美香占和农香 18 均以 Mn4 效果最佳,这可能是因为基施 $MnSO_4$ 后促进了香稻叶片叶绿素的合成,从而提高了叶片 Pn,增加了水稻植株

干物质质量,这与 Abin 等^[24]的研究结果相似。
香稻幼苗移栽后,在分蘖期可能受到外界环境即较高浓度的 $MnSO_4$ 的胁迫而导致香稻体内产生大量的活性氧(ROS),氧化细胞膜脂结构产生膜脂过氧化产物 MDA,从而影响香稻的正常生长,而 ROS 的积累可以通过抗氧化酶系统(如 SOD、POD 等)来消除^[18]。本试验研究表明,基施 $MnSO_4$ 激活了香稻体内的抗氧化酶系统以消除体内的 ROS,随着香稻的生长,早、晚造 2 个品种均以 Mn4 处理更利于增强香稻叶片 SOD 和 POD 的活性、降低香稻叶片 MDA 含量,这有利于增强香稻在后期的生长中对外界的

抗逆性和适应性、促进香稻在生长过程中吸收更多的营养物质。

本研究结果表明,早、晚造美香占和农香 18 的糙米 Mn 含量均以 Mn4 较高,参考国家稻米标准样品(GBW10010)测定稻米中 Mn 含量的参考推荐值为 $16 \times 10^{-6} \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,本研究中稻米 Mn 含量处于临界状态并未超标。对香稻不同生育期茎秆和叶片 Mn 含量分析得知,美香占和农香 18 基施 MnSO_4 茎秆和叶片 Mn 含量在分蘖期均降低,其他时期则均以 Mn4 更有利于提高香稻茎秆和叶片的 Mn 含量,促进了后期稻米中 Mn 含量的提高。这可能是因为分蘖期虽然外界 Mn 浓度提高,但香稻抗氧化酶活性提高幅度均很小且无明显规律,叶片 Pn、地上部生物量与 CK 相比也无显著差异;随着香稻的生长,后期叶片抗氧化酶活性增强,促进了叶片 Pn 的提高,从而促进香稻茎秆和叶片对土壤中 Mn 的吸收,最终促进稻米中 Mn 积累。根据不同生育期香稻茎秆或叶片与糙米中 Mn 含量的相关性分析得知,糙米中 Mn 含量与成熟期茎秆或叶片的 Mn 含量均呈正相关性,说明成熟期香稻茎、叶中 Mn 含量的增加更有利于促进糙米中 Mn 的积累。

根据水稻源库流理论^[25]得知,随着香稻茎秆和叶片中 Mn 含量的增加,香稻糙米中 Mn 含量也会进一步增加。因此,在不使香稻的生长受到高 Mn 浓度胁迫情况下,适度范围内增加 Mn 元素的施用可以增强香稻的光合作用,有利于香稻的生长和增强其抗逆性,促进香稻植株干物质的积累,同时也有利于香稻茎秆和叶片中 Mn 含量的增加,最终促进香稻糙米中 Mn 积累。本研究以 MnSO_4 施用量 $16.67 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的效果较佳。

参考文献:

- [1] GREGORIO G B, SENADHIRA D, HTUT T. Improving iron and zinc value of rice for human nutrition[J]. Agr Develop, 1999, 23(9): 77-81.
- [2] 程式华, 胡培松. 中国水稻科技发展战略[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(3): 223-226.
- [3] 林光. 香稻的发展现状与研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(8): 164-168.
- [4] WONGPORNCHAI S, DUMRI K, JONGKAEWWAT-TANA S, et al. Effects of drying methods and storage time on the aroma and milling quality of rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk Mali 105[J]. Food Chem, 2004, 87(3): 407-414.
- [5] CORDEIRO G M, CHRISTOPHER M J, HENRY R J, et al. Identification of microsatellite markers for fragrance in rice by analysis of the rice genome sequence[J]. Mol Breed, 2002, 9(4): 245-250.
- [6] JEZUSSEK M, JULIANO B O, SCHIEBERLE P. Comparison of key aroma compounds in cooked brown rice varieties based on aroma extract dilution analysis[J]. J Agric Food Chem, 2002, 50(5): 1101-1105.
- [7] 王国峰, 黄金龙, 刘兰芳, 等. 优质白香稻新品种古榆香稻 1 号的选育与应用[J]. 现代农业, 2004(11): 14.
- [8] 游晴如, 黄庭旭. 稻米香味的研究与育种利用[J]. 福建稻麦科技, 2003(3): 33.
- [9] 曹恭, 梁鸣早. 锰:平衡栽培体系中植物必需的微量元素[J]. 土壤肥料, 2004(1): 2-3.
- [10] 孙羲. 植物营养原理[M]. 北京:中国农业出版社, 1997: 205-212.
- [11] BURNELL J N. The biochemistry of manganese in plants [M]//GRAHAM R D, HANNAM R J, UREN N C. Manganese in soils and plants. Dordrecht, Netherlands: Springer, 1988: 125-137.
- [12] MUKHOPADHYAY M J, SHARMA A. Manganese in cell metabolism of higher plants[J]. Bot Rev, 1991, 57(2): 117-149.
- [13] 匡廷云, 杨宗年, 崔激. 锰在光合作用中的作用[J]. 植物学报, 1966, 14(2): 139-143.
- [14] CLAIRMONT K B, HAGAR W G, DAVIS E A. Manganese toxicity to chlorophyll synthesis in tobacco cells[J]. Plant Physiol, 1986, 80(1): 291-293.
- [15] 卢海博, 龚学臣, 乔永明, 等. 杂谷干物质积累及光合特性的研究[J]. 作物杂志, 2014(1): 121-124.
- [16] 李勇, 王红光, 李瑞奇, 等. 表油菜素内酯对冬小麦开花后光合特性和物质生产的影响[J]. 河北农业大学学报, 2015, 1(2): 1-7.
- [17] 窦俊辉, 喻树迅, 范术丽, 等. SOD 与植物胁迫抗性[J]. 分子植物育种, 2010, 8(2): 359-364.
- [18] 梁艳荣, 胡晓红, 张颖力, 等. 植物过氧化物酶生理功能研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2003, 24(2): 110-113.
- [19] 冯绪猛, 罗时石, 胡建伟, 等. 农药对水稻叶片丙二醛及叶绿素含量的影响[J]. 核农学报, 2003, 17(6): 481-484.
- [20] 孙永健, 孙圆圆, 刘凯, 等. 水氮互作对结实期水稻衰老和物质转运[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1339-1349.
- [21] 周焱, 徐素君, 钱肖余. 一种一次性完全提取植株中微量元素的新方法: HCl + Vc 浸提法[J]. 江西医药, 1994, 29(增刊): 147-150.
- [22] 余冰宾. 生物化学实验指导[M]. 北京:清华大学出版社, 2003: 131-140.
- [23] 汤章诚. 现代植物生理学实验指导[M]. 北京:科学出版社, 1999: 305-306.
- [24] ABIN S, MNV P. Iron-and manganese-assisted cadmium tolerance in *Oryza sativa* L.: Lowering of rhizotoxicity next to functional photosynthesis[J]. Planta, 2015, 241(6): 1519-1528.
- [25] 王丰, 张国平, 白朴. 水稻源库关系评价体系研究进展与展望[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(6): 556-560.

【责任编辑 庄 延, 周志红】

<http://xuebao.scau.edu.cn>