

节水灌溉下复合微生物有机肥对水稻光合与产量的影响

张忠学^{1,2} 冯子珈^{1,2} 齐智娟^{1,2} 郑恩楠^{1,2} 杨桦^{1,2} 陈鹏^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为研究寒地黑土区节水灌溉配施复合微生物有机肥对水稻光合特性及产量的影响,在节水灌溉条件下设置了4个复合微生物有机肥施用水水平:OF20(20 kg/hm²)、OF40(40 kg/hm²)、OF60(60 kg/hm²)和OF80(80 kg/hm²),同时以单施无机肥为对照(CK)处理,研究水稻光合特性及其产量的变化趋势。结果表明:随着复合微生物有机肥施用量的增加,水稻各生育时期的叶片净光合速率(P_n)、最大光化学量子效率(F_v/F_m)、反应中心的潜在活性(F_v/F_o)以及光化学系统Ⅱ(PSⅡ)反应中心激发能捕获效率(F'_v/F'_m)均呈先升、后降的趋势;在抽穗期和乳熟期,实际光化学量子效率($\Phi_{psⅡ}$)和光化学荧光淬灭系数(q_p)均随复合微生物有机肥施入量的增加先增大、后减小,在OF60处理时达到最大值,且均高于CK处理;气孔限制值(L_s)随着复合微生物有机肥施用量的增加,先减小后增大,且低于CK处理;非光化学荧光淬灭系数(q_N)在不同复合微生物有机肥施用量处理下并无显著差异;施加复合微生物有机肥处理的水稻产量高于CK处理,其中OF60处理产量最高,且米质优于CK处理。综合分析,施用60 kg/hm²复合微生物有机肥处理效果最佳,研究结果可为寒地黑土区节水灌溉条件下合理配施复合微生物有机肥提供理论依据和参考。

关键词: 水稻;节水灌溉;复合微生物有机肥;光合特性;产量;品质

中图分类号: S511; S275 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0313-09

Effects of Compound Microbial Organic Fertilizer with Water-saving Irrigation on Photosynthetic and Yield of Rice

ZHANG Zhongxue^{1,2} FENG Zijia^{1,2} QI Zhijuan^{1,2} ZHENG Ennan^{1,2} YANG Hua^{1,2} CHEN Peng^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of High Efficiency Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to study the effects of the compound microbial organic fertilizer on photosynthetic characteristics and yield of rice under water-saving irrigation conditions in cold region and black glebe, experiment with four compound microbial organic fertilizer application levels, which were 20 kg/hm² (OF20), 40 kg/hm² (OF40), 60 kg/hm² (OF60) and 80 kg/hm² (OF80) were carried out under the water-saving irrigation regime, meanwhile the inorganic fertilizer was taken as control treatment (CK). The photosynthetic characteristics and yield were studied. The results demonstrated that the net photosynthetic rate (P_n), the maximum photochemical quantum efficiency (F_v/F_m), the reaction center potential activity (F_v/F_o) and the excitation energy capture efficiency (F'_v/F'_m) were increased firstly and then decreased with the increase of compound microbial organ fertilizer at each stage, so did the actual photochemical quantum efficiency ($\Phi_{psⅡ}$) and photochemical fluorescence quenching coefficient (q_p) at heading and milky stage, and approaching the best values in OF60 plot. However, the stomatal limit value (L_s) was decreased firstly and then increased with the increase of compound microbial organic fertilizer, which was less than CK. Across all treatments, for the non-photochemical quenching coefficient (q_N), no significant difference was found at 5% level. Among the different treatments, the highest yield was obtained in OF60 plot as well as the rice quality was better. Therefore, under OF60 regime was the

收稿日期: 2018-12-14 修回日期: 2019-03-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400108、2018YFC0407301)和国家自然科学基金面上项目(51779046、51809042)

作者简介: 张忠学(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangzhongxue@163.com

通信作者: 齐智娟(1987—),女,讲师,博士后,主要从事土壤水热运移和节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhijuan.qi@neau.edu.cn

best. It could provide a theoretical basis and reference for the application compound microbial organic fertilizer under water-saving irrigation conditions in cold region and black glebe.

Key words: rice; water-saving irrigation; compound microbial organic fertilizer; photosynthetic; yield; quality

0 引言

水稻是我国主要粮食作物之一,其种植面积占粮食总面积的 28%,全国 65% 以上的人口以稻米为主食,其高产稳产是保障人民温饱和稻农增收的重要因素^[1]。然而,水稻是“喜水作物”,耗水量约占全国总用水量的 54%,占农业用水的 70%^[2]。作为水稻种植面积最大、总产量最高的黑龙江省,传统淹灌模式下水稻的生产消耗了全省 96% 的农业用水, 占全省社会用水量的 70%^[3],这种灌溉模式极大地浪费了水资源。因此,如何在有限的淡水资源里生产出更多安全优质的稻米是目前水稻生产最主要的问题^[4]。化肥的应用有效提高了粮食产量,但随着施用量的增加,一些负面影响也逐渐凸显,如肥料利用率低^[5]、土壤理化性质破坏^[6]、作物品质降低^[7]、甚至作物产量降低^[8]。

相关学者关于肥料的研究较多,主要集中于不同施肥水平以及有机肥和无机肥不同配比施加^[9-11],但针对东北寒地黑土区复合微生物有机肥的研究较少。复合微生物有机肥是一种新型有机肥,采用的是有机质腐植酸为载体加入拜赖青霉与枯草芽孢杆菌,增加了植物所需元素,能延长肥效,快速补充土壤中的碳“短板”,效果显著,易被植物吸收。而化肥与复合微生物有机肥配合施用,既能供给植物充足的营养,又不会破坏环境^[12]。复合微生物肥料在调控植物生长、改良土壤、增产以及提升品质方面起到了举足轻重的作用^[13]。陈友民等^[14]研究发现,施用复合微生物有机肥可以有效改善土壤理化性质,显著提高土壤有机质含量,明显降低稻谷镉含量。郭鑫年等^[15]研究发现,与常规化肥相比,复合微生物肥有效提高了马铃薯的产量与品质。水稻的生长发育和干物质积累与光合作用密切相关,主要受光照、温度、养分和水分等因素的影响^[16],而复合微生物有机肥料可以提高土壤微生物数量^[17],促进土壤有效养分的活化^[14],使养分不再是限制水稻光合速率和产量的主要因素。

施肥与灌溉作为影响水稻生长及光合物质生产的重要因子,一直以来受到农业工作者的重视^[18]。文献[9,19-21]研究了施用常规有机肥对光合作用能力、干物质积累、作物产量等产生的影响。本文在前人研究的基础上,针对寒地黑土区气候特点,采

用盆栽试验,合理设置无机肥与新型复合微生物有机肥施用水平,并根据作物各生育阶段对水分亏缺的敏感程度,适时适量地为作物供水,探究新型复合微生物有机肥不同施入水平对节水灌溉水稻的光合特性、产量以及品质的影响,以期在节水灌溉条件下科学配施复合微生物有机肥量,达到节水、高产、优质的目的。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2017 年 5—10 月在黑龙江省庆安国家灌溉试验站进行,该站(东经 127°40',北纬 46°58')位于黑龙江省绥化市庆安县和平镇,为典型寒地黑土分布区。属寒温带大陆性季风气候区,多年平均气温 2.5℃,大于等于 10℃有效积温变化范围为 2 500 ~ 2 800℃,多年平均降水量 550 mm,多年平均水面蒸发量 750 mm,太阳辐射量 4 000 ~ 4 300 MJ/(m²·a)。作物水热生长期 156 ~ 171 d,全年无霜期 128 d。供试土壤为白浆土型水稻土,饱和含水率为 53.25%。土壤有机质质量比 41.8 g/kg、pH 值 6.45、全氮质量比 15.06 g/kg、全磷质量比 15.23 g/kg、全钾质量比 20.11 g/kg、碱解氮质量比 198.29 mg/kg、有效磷质量比 36.22 mg/kg 和速效钾质量比 112.06 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用盆栽方法,供试盆钵为塑料桶,上口直径为 32 cm,下口直径为 28 cm,高为 40 cm。供试土壤晒干、过筛后,每盆装干土 30 kg(干土初始含水率为 14.53%)。供试水稻品种为龙庆稻 3 号,每盆移栽 2 穴,每穴 5 株。试验在移动式遮雨棚内进行,四周为水稻保护田。

节水灌溉在返青期建立适宜水层,其余各生育时期灌水后田面均不建立水层,以根层土壤含水率为控制指标(表 1)。采用德国 IMKO 公司产 TRIME-PICO-IPH TDR 型剖面土壤水分测量系统检测根层土壤含水率。设 4 个复合微生物有机肥施肥水平,分别为 OF20(20 kg/hm²)、OF40(40 kg/hm²)、OF60(60 kg/hm²)、OF80(80 kg/hm²)。同时设置单施无机肥的对照组 CK,共 5 个处理,每个处理 6 次重复。试验各项农艺措施同大田,手工除草以避免杂草危害水稻生长发育,同时遵循当地传统方法进行水稻病虫害控制以保证水稻稳产。无机肥各处理

施肥量按照不同比例施入,氮肥(N 110 kg/hm²)按照基肥、蘖肥、促花肥、保花肥比例为 4.5:2:1.5:2 分施,磷肥(P₂O₅ 45 kg/hm²)作基肥一次施用,钾肥(K₂O 80 kg/hm²)分基肥和 8.5 叶龄(幼穗分化期)2 次施用,前后比例为 1:1,有机肥同氮肥促花肥一同施入。由于试验所处寒区,施入基肥时气温较低,会影响复合微生物有机肥的活性,而在分蘖以后温度适宜,再施加复合微生物有机肥更有助于养分的吸收。供试复合微生物有机肥为丰喜生物有机肥(厂家推荐最适用量为 40 kg/hm²),有效活菌

数大于等于 0.2 亿/g,有机质质量分数大于等于 40%,N + P₂O₅ + K₂O 质量分数大于等于 4%。5 月 15 日施基肥,5 月 20 日移栽,6 月 5 日施蘖肥,7 月 1 日施 8.5 叶龄钾肥,7 月 7 日施促花肥,7 月 20 日施保花肥,9 月 3 号收获。水稻生育期为 107 d,分为返青期(5 月 20 日—6 月 4 日)、分蘖期(6 月 5 日—7 月 9 日)、拔节期(7 月 10 日—7 月 22 日)、抽穗期(7 月 23 日—8 月 5 日)、乳熟期(8 月 6 日—8 月 15 日)、黄熟期(8 月 16 日—9 月 3 日)。

表 1 稻田生育期内土壤水分管理方式
Tab.1 Water management pattern

处理	返青期	分蘖初期	分蘖盛期	分蘖末期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
控制灌溉	0~30 mm	80% θ _s ~θ _s	80% θ _s ~θ _s	晒田	80% θ _s ~θ _s	80% θ _s ~θ _s	80% θ _s ~θ _s	落干

注:θ_s为根层土壤饱和含水率。

1.3 试验观测指标和方法

光合指标测定:在水稻关键生育时期(拔节期、抽穗期、乳熟期)内,每个处理选取 2 盆 4 穴长势良好且倒 2 叶受光方向一致的水稻标记,于晴朗天气 09:00—11:30 采用美国 LI-COR 公司生产的 Li-6400XT 型便携式植物光合测定系统测定同一叶片的净光合速率(P_n),叶片经过暗适应 30 min 后测定最小初始荧光(F_o)、最大荧光(F_m)、最大光化学量子产量光系统 II(PS II)的光化学量子效率(F_v/F_m),在自然光下适应 30 min 后测定光下最小荧光(F'_o)、光下最大荧光(F'_m)、稳态荧光(F_s)、光下开放的 PS II 反应中心的激发能捕获效率(F'_v/F'_m)、光化学荧光淬灭系数(q_p)和非光化学荧光淬灭系数(q_N),以上参数均由仪器自动给出。

反应中心的潜在活性 F_v/F_o和实际光化学量子效率 Φ_{PS II} 计算公式为

$$F_v/F_o = \frac{F_m - F_o}{F_o}$$
 (1)

$$\Phi_{PS II} = \frac{F'_m - F'_s}{F'_m - F'_o}$$
 (2)

根据 BERRY 等^[22]的方法计算气孔限制值 L_s,即

$$L_s = 1 - \frac{C_i}{C_a}$$
 (3)

式中 C_i——胞间 CO₂ 浓度
C_a——外界 CO₂ 浓度

产量测定:在收获后,对每盆水稻进行测产,分别测量水稻的有效穗数、穗粒数、千粒质量和结实率,计算每盆水稻产量。

稻米品质测定:在测产 3 个月对水稻米质进

行测量,稻米品质在黑龙江八一农垦大学稻米检测中心进行检测。

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 和 SPSS 19.0 进行数据处理及绘图,运用 LSD 进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 对净光合速率和气孔限制值的影响

以水稻典型生育期分蘖期、拔节期和抽穗期为例,研究节水灌溉配施复合微生物有机肥对 P_n和 L_s的影响,如图 1 所示。由图 1a 可知,在拔节前期 OF20、OF40、OF60、OF80 处理的 P_n分别比 CK 高 4.67%、11.99%(P<0.05)、12.07%(P<0.05)、7.32%,在拔节后期分别比 CK 高 3.63%、10.40%(P<0.05)、12.65%(P<0.05)、8.57%;在抽穗期,OF20、OF40、OF60、OF80 处理分别比 CK 高 3.17%、7.68%、12.15%(P<0.05)、4.55%;乳熟前期与 CK 相比,OF20、OF40、OF60 和 OF80 处理分别增加了 15.24%、23.42%(P<0.05)、35.02%(P<0.05)、2.60%,而在乳熟后期,与 CK 相比分别增加了 41.85%(P<0.05)、53.33%(P<0.05)、56.62%(P<0.05)、9.17%。从不同生育时期与 CK 相比的增加幅度来看,OF60 处理在各个时期的增加幅度最大。L_s是用来定量分析光合限制因子的指标,由气孔对 CO₂的开度和碳同化对 CO₂需求共同决定^[23]。由图 1b 可知,各生育时期的 L_s均低于 CK,表明施加复合微生物有机肥能有效降低气孔限制,增大气孔开度,使叶肉细胞内 CO₂浓度增大,从而提高了水稻的光合速率。在拔节前期,OF20、OF40、OF60、OF80 处理 L_s分别较 CK 降低了

11.79%、16.77%、34.49% ($P < 0.05$)、11.44%，在拔节后期分别较 CK 降低了 4.20%、18.07%、22%、15.98%；在抽穗期，OF20、OF40、OF60 和 OF80 处理分别较 CK 降低了 4.02%、17.22%、19.30% ($P < 0.05$)和 5.54%；在乳熟前期，和 CK 相比，OF20、OF40、OF60、OF80 处理分别降低了 10.65%、16.02% ($P < 0.05$)、16.24% ($P < 0.05$)、6.36%；而乳熟后期分别下降了 7.74%、12.09%、14.18% ($P < 0.05$)、4.32%。与 CK 相比，从不同生育时期的增降幅度来看， P_n 和 L_s 在 OF60 处理下相对较高，表明在节水灌溉条件下，施加 60 kg/hm² 复合微生物有机肥有助于寒地黑土区水稻光合速率的提高。

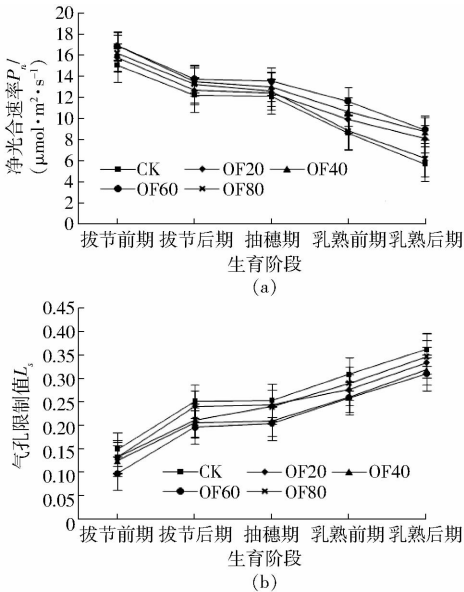


图 1 不同复合微生物有机肥施用量对水稻叶片净光合速率和气孔限制值的影响

Fig. 1 Effects of compound microbial organ fertilizer on P_n and L_s

2.2 对最大光化学量子效率和潜在活性的影响

图 2 为不同生育时期节水灌溉配施复合微生物有机肥对 F_v/F_m 、 F_v/F_o 的影响。 F_v/F_m 与 F_v/F_o 总体变化趋势一致，均随着复合微生物有机肥施入量的增加先逐渐增大而后减小，且在 OF60 处理出现最大值。由图 2a 可以看出，在拔节期， F_v/F_m 在 OF20 处理与 CK 之间差异不显著 ($P > 0.05$)，但随着复合微生物有机肥施入量的增加，OF40、OF60 和 OF80 处理显著高于 CK，且分别提高了 1.07%、1.38%、1.22%；在抽穗期，OF40、OF60 处理显著高于 CK，分别比 CK 增加了 1.58%、1.76%，而其他处理与 CK 之间均无显著差异 ($P > 0.05$)；在乳熟期，OF60 处理显著高于 CK，比 CK 增加了 2.59%，而其他处理之间差异性不显著 ($P > 0.05$)。OF60 处理在各生育时期的 F_v/F_m 均高于其他处理，维持较高 F_v/F_m

有利于降低发生光抑制的程度，提高光能转化效率。 F_v/F_o 反映了通过 PS II 的电子传递情况^[24]。如图 2b 所示，在拔节期，与 CK 相比，OF20、OF40、OF60、OF80 处理的 F_v/F_o 分别增加了 2.38%、6.22%、10.14%、7.17%，其中 OF60、OF80 处理增加显著 ($P < 0.05$)；在抽穗期，OF40、OF60 处理的 F_v/F_o 显著高于其他各处理，OF40、OF60 处理分别较 CK 增加了 9.27%、10.43%；在乳熟期，除 OF60 处理外，其他处理之间无显著差异 ($P > 0.05$)，且与 CK 相比，OF60 处理增加了 13.24%。由不同生育时期水稻叶片 F_v/F_m 与 F_v/F_o 分析可知，复合微生物有机肥施用量为 60 kg/hm² 时，对 F_v/F_m 和 F_v/F_o 促进作用最大。

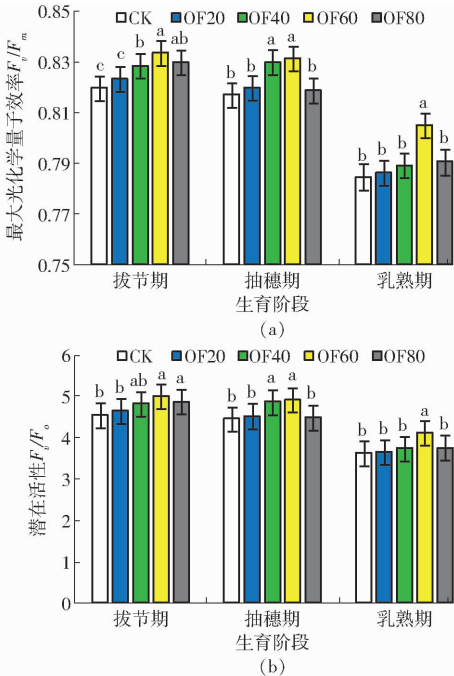


图 2 不同复合微生物有机肥施用量对水稻叶片最大光化学量子效率和潜在活性的影响

Fig. 2 Effects of compound microbial organ fertilizer on F_v/F_m and F_v/F_o

2.3 对水稻叶片 PS II 反应中心激发能捕获效率和实际光化学量子效率的影响

由表 2 可看出，各生育时期施加复合微生物有机肥处理的水稻叶片 F'_v/F'_m 均高于 CK，且随着复合微生物有机肥施用量的增加呈先增大后减小的变化趋势。在拔节期和乳熟期，施加复合微生物有机肥处理 F'_v/F'_m 均显著高于 CK，拔节期分别提高了 7.06%、13.28%、15.54%、10.73%，乳熟期分别提高了 14.29%、28.92%、34.84%、24.04%，乳熟期增幅大于拔节期，说明随着复合微生物有机肥肥效不断地释放，土壤中的养分不断被补充，有利于水稻叶片生长。在抽穗期，OF20、OF80 处理与 CK 无显著差异，OF40、OF60 处理显著高于 CK，且分别增加

了 12.37% 和 15.32%。各生育时期 F'_v/F'_m 在 OF60 处理下达到最大, 总体由大到小依次为 OF60、OF40、OF80、OF20、CK, 说明适量施用复合微生物有机肥可以使水稻叶片具有良好的光能捕获效率, 而过量施用则会起到一定的限制作用。 Φ_{PSII} 表示作用光存在时的实际光化学量子效率, 即反应中心电荷分离实际量子效率, 反映了被用于光化学途径激发能占进入总激发能的比例, 是检测植物光合能力的一个重要指标。由表 2 可看出, 施加复合微生物

有机肥处理的水稻叶片 Φ_{PSII} 在各生育时期均高于 CK。在拔节期和抽穗期, 施加复合微生物有机肥处理均显著高于 CK, 拔节期分别提高了 6.63%、25.90%、24.70%、25.30%, 抽穗期分别提高了 13.37%、28.49%、34.88%、11.05%。在乳熟期, 除 OF20 处理外, 其他处理均显著高于 CK, OF40、OF60、OF80 处理分别比 CK 增加了 72.41%、97.70%、25.29%。总体由大到小依次为 OF60、OF40、OF80、OF20、CK。

表 2 不同生育时期的 PS II 反应中心激发能捕获效率和实际光化学量子效率

Tab. 2 F'_v/F'_m , Φ_{PSII} at different growth stages

处理	F'_v/F'_m			处理	Φ_{PSII}		
	拔节期	抽穗期	乳熟期		拔节期	抽穗期	乳熟期
CK	(0.354 ± 0.012) ^c	(0.372 ± 0.017) ^b	(0.287 ± 0.014) ^d	CK	(0.166 ± 0.006) ^c	(0.172 ± 0.009) ^c	(0.087 ± 0.002) ^d
OF20	(0.379 ± 0.014) ^b	(0.389 ± 0.016) ^b	(0.328 ± 0.011) ^c	OF20	(0.177 ± 0.010) ^b	(0.195 ± 0.012) ^b	(0.092 ± 0.005) ^{cd}
OF40	(0.401 ± 0.017) ^a	(0.418 ± 0.025) ^a	(0.370 ± 0.023) ^{ab}	OF40	(0.209 ± 0.012) ^a	(0.221 ± 0.023) ^a	(0.150 ± 0.012) ^b
OF60	(0.409 ± 0.035) ^a	(0.429 ± 0.037) ^a	(0.387 ± 0.039) ^a	OF60	(0.207 ± 0.011) ^a	(0.232 ± 0.029) ^a	(0.172 ± 0.024) ^a
OF80	(0.392 ± 0.018) ^{ab}	(0.391 ± 0.009) ^b	(0.356 ± 0.019) ^b	OF80	(0.208 ± 0.011) ^a	(0.191 ± 0.013) ^b	(0.109 ± 0.010) ^c

注: 同一列不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著, 下同。

2.4 不同施用量对节水灌溉水稻叶片光化学荧光淬灭系数和非光化学荧光淬灭系数的影响

q_p 反映了天线色素吸收的光能用于化学电子传递的比例^[25]。由图 3a 可看出, 施加复合微生物有机肥能够改变 q_p , 这表明复合微生物有机肥的配施能够改善 PS II 反应中心的开放, 增强了 PS II 氧化侧向 PS II 反应中心的电子流动。在拔节期, 与 CK 相比, OF20 处理的 q_p 减少了 0.56% ($P > 0.05$), OF40、OF60、OF80 处理的水稻叶片 q_p 分别增加了 10.67%、7.92% 和 12.83%; 在抽穗期, 与 CK 相比, OF20、OF40、OF60、OF80 处理的水稻叶片 q_p 分别增加了 8.13%、14.49%、16.71%、5.80%; 在乳熟期, OF20、OF40、OF60、OF80 处理的水稻叶片 q_p 较 CK 分别增加了 20.36%、52.46%、66.50%、14.93%。OF40、OF60 处理增幅显著大于其他处理, OF60 处理最优, 其次为 OF40 处理。 q_N 代表以热耗散形式散掉的过剩的光能部分。由图 3b 可看出, 施加复合微生物有机肥的各处理 q_N 在拔节期稍高于 CK 处理, 乳熟期只有 OF20 处理的 q_N 稍高于 CK, 而施加高水平的复合微生物有机肥后 q_N 稍下降, 这与 q_p 的变化趋势相反。虽然较高的 q_N 有利于过剩光能的及时耗散, 避免了过剩光能对光合器官的损伤, 但各处理的水稻叶片 q_N 在 3 个生育阶段内并没有显著差异 ($P > 0.05$)。

2.5 对水稻产量和品质的影响

水稻产量由有效穗数、穗粒数、千粒质量和结实率共同决定。由表 3 可看出, 施加复合微生物有机

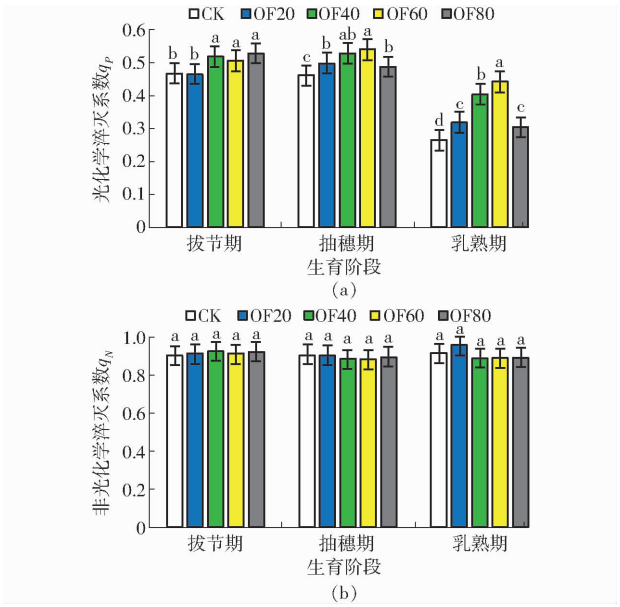


图 3 不同复合微生物有机肥施用量对水稻叶片光化学淬灭系数和非光化学淬灭系数的影响

Fig. 3 Effects of compound microbial organ fertilizer on q_p and q_N

肥处理的水稻有效穗数和千粒质量均高于 CK, 除 OF20 处理的有效穗数外, 其余复合微生物有机肥处理均与 CK 差异显著 ($P < 0.05$), 且由大到小均表现为 OF60、OF80、OF40、OF20、CK, 其中有效穗数的增加表明施加复合微生物有机肥有助于提高水稻的有效分蘖, 但超过一定量反而起到限制作用。除 OF40 处理的穗粒数显著低于 CK 外, 其余复合微生物有机肥处理均高于 CK, 其中 OF20、OF60 处理与 CK 差异显著 ($P < 0.05$), 总体由大到小依次为 OF60、

OF20、OF80、CK、OF40。除 OF20 处理的结实率显著低于 CK 外,其余复合微生物有机肥处理与 CK 无显著差异 ($P > 0.05$),由大到小依次为 OF60、CK、OF80、OF40、OF20。施加复合微生物有机肥的水稻产量高于单施无机肥,且随着复合微生物有机肥施

用量的增加呈先增后减的趋势,OF20、OF40、OF60、OF80 分别比 CK 增加了 2.46%、6.14%、22.50%、14.90%,由大到小依次为 OF60、OF80、OF40、OF20、CK,表明施加复合微生物有机肥能提高水稻的产量,且复合微生物有机肥最佳施用量为 60 kg/hm²。

表 3 不同处理的水稻产量
Tab.3 Yield of different treatments

处理	有效穗数/(穗·盆 ⁻¹)	穗粒数/(粒·穗 ⁻¹)	千粒质量/g	结实率/%	产量/(g·盆 ⁻¹)
CK	(57.17 ± 0.12) ^c	(66.83 ± 3.94) ^b	(26.057 ± 1.23) ^d	(93.25 ± 2.16) ^a	(92.835 ± 6.47) ^d
OF20	(58.00 ± 0.01) ^c	(68.10 ± 4.13) ^a	(26.901 ± 1.47) ^c	(89.52 ± 1.97) ^b	(95.118 ± 7.27) ^c
OF40	(59.50 ± 0.06) ^b	(65.39 ± 5.12) ^c	(27.383 ± 2.16) ^{bc}	(92.49 ± 2.39) ^{ab}	(98.538 ± 6.93) ^c
OF60	(61.33 ± 0.98) ^a	(68.59 ± 3.79) ^a	(28.861 ± 1.48) ^a	(93.67 ± 1.52) ^a	(113.722 ± 8.21) ^a
OF80	(60.83 ± 0.13) ^a	(67.48 ± 5.27) ^{ab}	(27.948 ± 2.36) ^b	(92.98 ± 1.03) ^a	(106.668 ± 8.64) ^b

试验结果表明,复合微生物有机肥施用量为 60 kg/hm²时产量最高。因此,采用 OF60 与 CK 两组处理比较稻米品质。如表 4 所示,OF60 处理的糙米率、精米率和整精米率均高于 CK,说明施加 60 kg/hm²的复合微生物有机肥能够提高稻米的碾磨品质。与 CK 相比,OF60 处理的米粒长宽比较

高,且 OF60 处理的稻米垩白率和垩白度明显低于 CK,说明施加 60 kg/hm²的复合微生物有机肥能够有效降低稻米垩白率与垩白度。OF60 处理的稻米蛋白含量稍低于 CK,稻米直链淀粉含量明显高于 CK,说明 60 kg/hm²的复合微生物有机肥施用量有助于提高稻米的蒸煮品质。

表 4 不同处理的水稻品质
Tab.4 Rice quality of different treatments

处理	糙米率/ %	精米率/ %	整精米率/ %	粒长/ mm	粒宽/ mm	长宽比	垩白率/ %	垩白度/ %	蛋白含量/ %	直链淀粉 含量/%
CK	(79.95 ± 2.34) ^b	(55.65 ± 1.57) ^b	(47.13 ± 1.29) ^b	(4.5 ± 0.3) ^a	(2.8 ± 0.2) ^a	(1.61 ± 0.12) ^a	(2.1 ± 0.9) ^a	(1.1 ± 0.2) ^a	(8.6 ± 1.1) ^a	(14.7 ± 1.5) ^b
	(81.09 ± 2.48) ^a	(65.29 ± 1.68) ^a	(59.68 ± 1.37) ^a	(4.7 ± 0.6) ^a	(2.7 ± 0.2) ^a	(1.74 ± 0.23) ^a	(0.3 ± 0.1) ^a	(0.1 ± 0.0) ^a	(8.5 ± 1.2) ^a	(16.5 ± 1.7) ^a

3 讨论

3.1 对节水灌溉水稻叶片光合特性的影响

光合作用是作物生长发育的基础和生产力的决定性因素^[25]。李迪秦等^[26]研究发现,含芽孢杆菌和 EM 微生物生物有机肥与无机肥配施,有利于改善烟叶的光合生理性能。本试验在节水灌溉下不同复合微生物有机肥施用量对水稻 P_n 、 L_s 的研究结果与杨芳芳等^[27]施用有机肥对甜菜叶片 P_n 的研究结果一致,即随着施肥量的增加表现为先增加后下降的趋势。叶绿素荧光特性可以了解植物的生长和逆境胁迫下的生理状况,具有精准度高、灵敏等优势。本试验表明,在节水灌溉条件下施加复合微生物有机肥能提高各生育时期 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 F'_v/F'_m 、 Φ_{PSII} 以及抽穗期、乳熟期的 q_P ,且均随着复合微生物有机肥施用量的增加呈先升高后下降的趋势,OF60 处理更有利于作物的光能捕获。与陈娜^[28]研究发现相类似。原因可能在于施加 60 kg/hm²的复合微生

物有机肥使 PS II 反应中心内原初光能转化效率提高,增大 PS II 反应中心的电子传递活性,而过量的施加抑制了光化学反应中心的光合电子传递速率,抑制了水稻的光合作用。但与赵隽等^[29]研究结果不一致,其原因可能为本试验是在节水灌溉条件下进行,水稻受水分胁迫且寒区气温较低的影响,不同处理之间以热形式耗散掉的光能并不明显,且施用的有机肥种类不同,影响效果也有差异。

前人研究成果的最佳有机肥施用量远远高于本试验施用的复合微生物有机肥,增加了使用成本。复合微生物有机肥相比于传统的有机肥含有植物所需的微量元素,采用有机质腐植酸为载体加入拜赖青霉与枯草芽孢杆菌,能同时延长肥效,增加了植物所需元素,合理施加能起到促进水稻光合作用,复合微生物有机肥料除了自身的养分被植物吸收利用,其自身的腐解产物也能够影响土壤的理化和生物学性质,供给土壤微生物以碳源,促进其繁衍活动。使土壤中的有机物质不断更新,保持甚至提高有机质含量,减缓有机质的消亡,使土壤持续保持较高土壤

肥力,促进植物生长,使水稻的冠层群体结构较好,叶面积指数较大,有助于提高光化学效率、光合电子传递和 CO₂同化过程,加快了光合作用的进行,导致光合速率较大,光能利用效率较高,有利于水稻对光和养分的利用和有机物的积累。

3.2 对节水灌溉水稻产量品质的影响

有研究表明^[30],复合微生物有机肥具有节约肥料成本投入,提高作物经济效益等优点。不同复合微生物有机肥施用量下,对水稻的有效穗数、穗粒数、千粒质量和结实率的影响各不相同。张建国等^[31]研究发现,适量的复合生物有机肥有利于烤烟的生长发育、干物质积累,进而提高烤烟的产量及品质。本研究从最终产量来看,施加复合微生物有机肥处理的产量均高于单施无机肥处理,且施加 60 kg/hm²的复合微生物有机肥处理产量最高。由于本试验施用的复合微生物有机肥拜赖青霉与枯草芽孢杆菌的添加,延长肥效,提高地温,同时本试验采用的是前氮后移的施肥技术方式,因此后期土壤肥力仍能保持较高的水平。后期土壤肥力较高,促进植株的生长发育以及干物质的积累,对水稻的产

量构成要素和品质的提高有较好的促进作用,增加了千粒质量和结实率,因此最大程度地增加了水稻产量和改善了水稻品质。

4 结论

- (1)随着复合微生物有机肥施用量的增加,各生育时期的水稻叶片 P_n 与 L_s 变化趋势相反,与 CK 处理相比, P_n 最大增幅和 L_s 最大降幅均出现在 OF60 处理。
- (2)各生育时期的水稻叶片 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 F_v'/F'_m 、 Φ_{psII} 和 q_p 均在 OF60 处理时显著高于 CK 处理,表明施加复合微生物有机肥有助于增强水稻叶片光合作用能力,降低光抑制程度,提高光能利用效率;不同复合微生物有机肥施用量处理下水稻叶片 q_N 在 3 个生育时期内并无显著差异。
- (3)施加复合微生物有机肥处理的产量均高于单施无机肥,复合微生物有机肥施用量为 60 kg/hm² 的产量最高,较 CK 处理增长了 22.50%,并且米质优于单施无机肥处理。因此,施加 60 kg/hm² 复合微生物有机肥有助于提高水稻光合能力、增加水稻产量、改善水稻品质。

参 考 文 献

[1] 俞双恩,李偲,高世凯,等. 水稻控制灌排模式的节水高产减排控污效果[J]. 农业工程学报,2018,34(7):128-136. YU Shuang'en, LI Si, GAO Shikai, et al. Effect of controlled irrigation and drainage on water saving, nitrogen and phosphorus loss reduction with high yield in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(7): 128-136. (in Chinese)

[2] 魏永霞,汝晨,吴昱,等. 黑土区水稻生长生理特性与产量对耗水过程的响应[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(9):214-225. WEI Yongxia, RU Chen, WU Yu, et al. Response of growth physiological characteristic and yield of rice to water consumption process in black soil region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 214-225. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180926&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.026. (in Chinese)

[3] 刘慧,魏永霞,汝晨. 寒地黑土区水稻植株干物质积累对耗水过程的响应[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(7):195-204. LIU Hui, WEI Yongxia, RU Chen. Response of rice dry matter accumulation to water consumption process in cold black soil region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 195-204. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180724&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.024. (in Chinese)

[4] 何海兵,武立权,杨茹,等. 干旱区控制灌溉下水稻光合特性与蒸腾效率研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):186-193. HE Haibing, WU Liquan, YANG Ru, et al. Photosynthesis characteristics and transpiration efficiency of rice plants under controlled irrigation technology in arid region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 186-193. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160927&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.027. (in Chinese)

[5] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报,2008,45(5):915-924. ZHANG Fusuo, WANG Jiqing, ZHANG Weifeng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)

[6] 张北赢,陈天林,王兵. 长期施用化肥对土壤质量的影响[J]. 中国农学通报,2010,26(11):182-187. ZHANG Beiyang, CHEN Tianlin, WANG Bing. Effects of long-term uses of chemical fertilizers on soil quality[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(11): 182-187. (in Chinese)

[7] 李俊良,崔德杰,孟祥霞,等. 山东寿光保护地蔬菜施肥现状及问题的研究[J]. 土壤通报,2002,33(2):126-128. LI Junliang, CUI Dejie, MENG Xiangxia, et al. The study of fertilization condition and question in protectorate vegetable in Shouguang, Shandong[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(2): 126-128. (in Chinese)

[8] YADUVANSHI N P S. Effect of five years of rice-wheat cropping and NRK fertilizer use with and without organic and green manures on soil properties and crop yields in a reclaimed sodic soil[J]. Journal of the Indian Society of Soil Science, 2001, 49:

714 – 719.

- [9] 吴秀宁,张军,赵永平,等.生物有机肥对夏玉米光合特性和产量的影响[J].陕西农业科学,2018,64(2):33–35.
WU Xiuning,ZHANG Jun,ZHAO Yongping,et al. Effects of organic fertilizers on photosynthetic traits and yield in summer maize [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Science,2018,64(2):33–35. (in Chinese)
- [10] 彭辉辉,刘强,荣湘民,等.生物炭、有机肥与化肥配施对春玉米光合特性的影响[J].江苏农业科学,2016,44(7):132–135.
- [11] 杨玉玲,刘文兆,王俊,等.配施钾肥、有机肥对旱地春玉米光合生理特性和产量的影响[J].西北农业学报,2009,18(3):116–121.
YANG Yuling,LIU Wenzhao,WANG Jun,et al. Effects of potassium and organic fertilizer on photosynthetic physiological characteristics and yield of spring maize in dry lands[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica,2009,18(3):116–121. (in Chinese)
- [12] 任增良.一种复合微生物有机肥的研制及效果研究[D].南京:南京农业大学,2014.
REN Zengliang. Research of preparation and effects of a compound microbial fertilizer [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2014. (in Chinese)
- [13] 郑茗月,李海梅,赵金山,等.微生物肥料的研究现状及发展趋势[J].江西农业学报,2018,30(11):52–56.
ZHENG Mingyue,LI Haimei,ZHAO Jinshan,et al. Current situation and developmental trend of microbial fertilizer researches [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018,30(11): 52–56. (in Chinese)
- [14] 陈友民,周卫军,周雨舟,等.复合微生物有机肥在晚稻生产中的降镉效果[J].湖南农业科学,2017(3):35–37,41.
CHEN Youmin,ZHOU Weijun,ZHOU Yuzhou,et al. Effects of decrease cadmium after application compound microbial organic fertilizer in late rice[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2017(3):35–37,41. (in Chinese)
- [15] 郭鑫年,陈刚,梁锦秀,等.复合微生物肥对宁南旱地马铃薯产量和品质的影响[J].中国农学通报,2018,34(28):1–6.
GUO Xinnian,CHEN Gang,LIANG Jinxiu,et al. Compound microbial fertilizer; effect on yield and quality of potato in dryland of Southern Ningxia[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018,34(28):1–6. (in Chinese)
- [16] 陆红飞,郭相平,甄博,等.旱涝交替胁迫条件下粳稻叶片光合特性[J].农业工程学报,2016,32(8):105–112.
LU Hongfei,GUO Xiangping,ZHEN Bo,et al. Photosynthetic characteristics of japonica rice leave under alternative stress of drought and waterlogging[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(8):105–112. (in Chinese)
- [17] 严兴,侯毛宇,梁毅成.微生物有机肥复苏枯萎榆树的实验研究[J].农学学报,2018,8(4):28–31.
YAN Xing,HOU Maoyu,LIANG Yicheng. Experimental research on recovering wilted elm by microbial organic fertilizer[J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(4):28–31. (in Chinese)
- [18] 赵黎明,李明,郑殿峰,等.灌溉方式与种植密度对寒地水稻产量及光合物质生产特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(6):159–169.
ZHAO Liming,LI Ming,ZHENG Dianfeng,et al. Effects of irrigation methods and rice planting densities on yield and photosynthetic characteristics of matter production in cold area[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(6):159–169. (in Chinese)
- [19] 王晓娟,贾志宽,梁连友,等.不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响[J].应用生态学报,2012,23(2):419–425.
WANG Xiaojuan,JIA Zhikuan,LIANG Lianyou,et al. Effects of organic fertilizer application rate on leaf photosynthetic characteristics and grain yield of dryland maize [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012,23(2): 419–425. (in Chinese)
- [20] 杨德廉,李祥英,赵文超,等.有机肥施用对烟草光合特性的影响[J].中国农学通报,2016,32(28):47–51.
YANG Delian,LI Xiangying,ZHAO Wenchao,et al. Influence of organic fertilizers on photosynthesis of tobacco[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2016,32(28):47–51. (in Chinese)
- [21] 李春喜,张令令,马守臣,等.有机培肥和减施氮肥对小麦光合特性和氮素吸收及产量的影响[J].西北植物学报,2017,37(5):943–951.
LI Chunxi,ZHANG Lingling,MA Shouchen,et al. Effects of organic fertilization combined with reduced nitrogen fertilizer on wheat photosynthetic characteristics, nitrogen uptake and grain yield [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2017,37(5):943–951. (in Chinese)
- [22] BERRY J A, DOWNTON W J S. Environmental regulation of photosynthesis [M] // GOVIND J. Photosynthesis, Vol II: development carbon metabolism, and plant productivity. New York: Academic Press, 1982:263–343.
- [23] 燕辉,胡笑涛,姚付启.限量灌溉对冬小麦光合与叶绿素荧光的影响[J].农业机械学报,2011,42(11):49–54.
YAN Hui,HU Xiaotao,YAO Fuqi. Effects of limited irrigation on photosynthesis and fluorescence of winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(11):49–54. (in Chinese)
- [24] 冯建灿,胡秀丽,毛训甲,等.叶绿素荧光动力学在研究植物逆境生理中的应用[J].经济林研究,2002,20(4):14–18.
FENG Jiancan,HU Xiuli,MAO Xunjia,et al. Application of chlorophyll fluorescence dynamics to plant physiology in adverse circumstance[J]. Non-wood Forest Research,2002,20(4):14–18. (in Chinese)
- [25] 徐俊增,彭世彰,魏征,等.不同供氮水平及水分调控条件下水稻光合作用光响应特征[J].农业工程学报,2012,28(2):72–76.
XU Junzeng,PENG Shizhang,WEI Zheng,et al. Characteristics of rice leaf photosynthetic light response curve with different

water and nitrogen regulation[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(2):72 – 76. (in Chinese)

[26] 李迪秦,龚湛武,李玉辉,等. 复合生物有机肥对烤烟光合生理特性及土壤微生物的影响[J]. 中国农业科技导报,2017,19(9):109 – 116.

LI Diqin, GONG Zhanwu, LI Yuhui, et al. Effects of compound bio-organic fertilizer on flue-cured tobacco photosynthetic physiological characters & soil microbes[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017,19(9):109 – 116. (in Chinese)

[27] 杨芳芳,李彩凤,刘丹,等. 有机肥对混合盐碱胁迫甜菜光合特性及产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,47(4):1 – 8.

YANG Fangfang, LI Caifeng, LIU Dan, et al. Effects of organic fertilizer on photosynthetic characteristics and yield of sugar beet under mixed salined alkali stress[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2018,47(4):1 – 8. (in Chinese)

[28] 陈娜. 微生物有机肥对枸杞荧光参数和生长结实及土壤养分的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学,2013.

CHEN Na. Effects of organic fertilizer and biogas slurry on lycium barbarum chlorophyll fluorescence parameters, growth and soil nutrient[D]. Lanzhou:Gansu Agricultural University,2013. (in Chinese)

[29] 赵隼,董树亭,刘鹏. 有机无机肥长期定位配施对冬小麦群体光合特性及籽粒产量的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(8):2362 – 2370.

ZHAO Jun, DONG Shuting, LIU Peng. Effects of long-term mixed application of organic and inorganic fertilizers on canopy apparent photosynthesis and yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2015,26(8):2362 – 2370. (in Chinese)

[30] 梁和钦,李富山,张翰君,等. 复合微生物有机肥在红心火龙果上的施用效果试验[J]. 安徽农学通报,2018,25(1):54 – 56.

LIANG Heqin, LI Fushan, ZHANG Hanjun, et al. Effect of compound microbial organic fertilizer on red pitaya[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2018,25(1):54 – 56. (in Chinese)

[31] 张建国,聂俊华,杜振宇. 复合生物有机肥在烤烟生产中的应用研究[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(4):424 – 428.

ZHANG Jianguo, NIE Junhua, DU Zhenyu. Response of flue-cured tobacco to compound bio-organic fertilizer[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004,10(4):424 – 428. (in Chinese)

(上接第 280 页)

[14] TAN S Y, JIANG Y, SONG S, et al. Two *Bacillus Myloliuefaciens* strains isolated using the competitive tomato root enrichment method and their effects on suppressing *rastonia solanacearum* and promoting tomato plant growth[J]. Crop Prot, 2013, 43: 134 – 140.

[15] OLUWASEYI S O. Streptomyces: implications and interactions in plant growth promotion[J]. Applied Microbiology and Biotechnology,2019,103(3):1179 – 1188.

[16] WANG J, LIANG J, GAO S. Biodegradation of lignin monomers vanillic, p-Coumaric, and Syringic Acid by the bacterial strain, *Sphingobacterium* sp. HY – H[J]. Current Microbiology,2018,75(9):1156 – 1164.

[17] STORY S P, KLINE E L, HUGHES T A, et al. Degradation of aromatic hydrocarbons by *Sphingomonas paucimobilis* strain EPA505[J]. Arch. Environ. Contam. Toxicol. , 2004, 47: 168 – 176.

[18] HARTMANN M, FREY B, MAYER J, et al. Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming [J]. ISME Journal, 2015, 9(5): 1177 – 1194.

[19] RYCKEBOER J R, MERGAERT J, VAES K, et al. A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes[J]. Annals of Microbiology, 2003, 53(4): 349 – 410.

[20] WATANABE K, NAGAO N, YAMAMOTO S, et al. *Thermobacillus composti* sp. nov, a moderately thermophilic bacterium isolated from a composting reactor[J]. Int. J. Syst. Evol. Microbiol. , 2007, 57(7): 1473 – 1477.

[21] SHAUKAT S, BAJWA M A, WAQAR M A, et al. Production, optimization, purification and characterization of glucomalylase from *Arachniotus* sp[J]. Chem. Soc. Pak. ,2006,28:368 – 373.

[22] 张初署. 中国四个生态区花生土壤中黄曲霉菌分布、产毒特征及遗传多样性研究[D]. 北京:中国农业科学院,2013.

ZHANG Chushu. Study on the distribution, aflatoxin production and genetic diversity of *Aspergillus flavus* in soils of peanut fields in four agroecological zones of China[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2013. (in Chinese)

[23] JURJEVIE Z, PETERSON S W, SOLFRIZZO M, et al. Sterigmatocystin production by nine newly described *Aspergillus* species in section *Versicolores* grown on two different media[J]. Mycotoxin Research,2013, 29(3): 141 – 145.

[24] YUE Haimei, WANG Mu, GONG Wenfeng, et al. The screening and identification of the biological control fungi *Chaetomium* spp against wheat common root rot[J]. FEMS Microbiol. Letter,2018, 365(22). <http://doi.org/10.1093/femsle/fny242>.