

# 生物肥氮肥耦合对水稻资源利用的影响

张雪, 王立, 马放, 张淑娟, 徐亚男, 李哲, 傅生杰

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 城市水资源与水环境国家重点实验室, 150090 哈尔滨)

**摘要:** 为从源头控制农业面源污染,用一种清洁的生物肥与化肥配施,提高氮肥利用效率.以水稻农田生态系统为研究对象,以摩西球囊霉为生物肥核心菌种,研究生物肥(M)、氮肥(N)以及二者联合施用(NM)条件下对水稻生长和生产状况的影响.结果表明:3种处理中,氮菌联合施用条件下,水稻具有最高的净光合速率,较N处理和M处理分别提高4.5%和5.0%.与空白相比,氮肥能够显著提高水稻地上生物量(提高22.8%);而菌肥能够显著提高地下生物量(提高41.5%) ( $P < 0.05$ );氮菌联合施用能同时提高地上和地下生物量(分别提高37.0%和35.0%).氮菌联合较传统田间管理能够提高4.8%的水稻产量,这种提高是通过强化水稻的r繁殖对策实现的.菌根对宿主的侵染可有效提高水稻的资源利用效率、生长与生产能力.

**关键词:** 水稻;摩西球囊霉;氮菌耦合;繁殖对策

中图分类号: S141.4

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)08-0039-04

## Effects of nitrogen and biological fertilizer coupling on rice resource utilization

ZHANG Xue, WANG Li, MA Fang, ZHANG Shu-juan, XU Ya-nan, LI Zhe, FU Sheng-jie

(State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

**Abstract:** To control agricultural non-point source pollution, the cleaning biological fertilizer and chemical fertilizer were used together to raise nitrogen use efficiency. The growth and production of rice under the conditions of single application of nitrogen fertilizer (N), single application of biological fertilizer with *Glomus mosseae* as the subject (M) and joint application of nitrogen fertilizer and biological fertilizer (NM) were studied, and the results reveal: (1) The application of nitrogen and *G. mosseae* (NM) makes rice reach the highest net photosynthetic rate, and increases by 4.5% and 5.0% more than N and M treatment, respectively. (2) The nitrogen fertilizer can increase the aboveground biomass by 22.8%, the biological fertilizer can increase the underground biomass by 41.5% significantly ( $P < 0.05$ ), and NM treatment can promote both the above- and under-ground biomass (37.0% and 35.0%, respectively). (3) The NM treatment increases rice yield by 4.8% more than traditional nitrogen fertilizer management. Therefore, mycorrhizal infection to the rice can effectively improve the efficiency of resource utilization, growing and producing capacity.

**Key words:** rice; *Glomus mosseae*; coupling of nitrogen and fungi; reproductive strategy

生物肥料因其高效、环保、易推广的优良特性

成为目前生态农业研究中的热门领域.其中,丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)因其能够促进植物对养分的吸收<sup>[1-3]</sup>,提高植物的抗逆性<sup>[4]</sup>以及抗病虫害<sup>[5]</sup>等促生优势而成为生物肥料的主体生物.摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)是在全世界分布最广泛的AM真菌之一<sup>[6]</sup>,存在于紫色土、红壤、黄壤以及水稻土<sup>[7]</sup>等

收稿日期: 2011-12-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50809020, 51179041); 国家创新研究群体科学基金资助项目(51121062); 城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学)基金资助项目(HC200816, 2011TS07).

作者简介: 张雪(1986—),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.

多种土壤类型中,并且对陆生<sup>[8]</sup>和水生<sup>[9]</sup>等多种生境均具有较强的适应能力,因此,可以作为优良的生物肥料制作主体。*G. mosseae* 是稻田中的土著菌种<sup>[10]</sup>,与水稻有较好的互利共生关系<sup>[11]</sup>,但是由于水稻长期处于淹水状态,*G. mosseae* 的生长和促生作用受到抑制<sup>[12]</sup>,为此,以稻田生态系统为研究对象,研究在施加氮肥、施加生物肥以及氮肥生物肥联合的强化方式下,*G. mosseae* 的侵染状况及其对水稻生长和生产效果的影响。

## 1 试验

### 1.1 分布区自然概况

试验地点位于黑龙江省双城市朝阳乡政安村。双城市位于黑龙江南部(E: 125°41′ - 126°42′, N: 45°08′ - 45°43′),属中温带气候,年平均温度 3.5℃,年降水量为 481.5 mm。水热同季,适合作物生产,耕地总面积 22.50 × 10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,其中灌溉水田面积 0.57 × 10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,是我国主要的粮食作物产区。周边水系发达,南、西以拉林河为界,农田灌溉水源即引自拉林河,是优良的水稻产地。

### 1.2 研究对象与方法

实验对象为水稻 (*Oryza sativa* L.),生物肥核心菌种为摩西球囊霉 (*G. mosseae*)。

试验区设在距农田防护林 50 m 的位置。每个试验小区由厚度为 2 mm 的防水材料围隔,各小区之间间隔 1 m,每小区面积为 6 m × 6 m = 36 m<sup>2</sup>,其中插入地下部分深 50 cm,地上部分高于农田土壤表层 30 cm,水分管理单独进行。

水稻于育秧阶段(2010年4月末)接种菌根真菌 *G. mosseae*,菌剂以高粱为宿主扩繁,包括基质和植物根段,施加到育秧盘,施加量为 30 g/盘。2010年6月中旬进行移栽,并按照正常和接种秧苗分别移栽到相应的小区。施加复合肥(N-P<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>O)作为基肥,施肥量 360 kg · hm<sup>-2</sup>,6月下旬追施分蘖肥硫酸铵 140 kg · hm<sup>-2</sup>。在追肥阶段,设置 4 个处理:空白对照(CK)、单独追施氮肥(N)、单独追施菌肥(M)、追施氮肥和菌肥(NM)(菌肥早育秧阶段已经施过)。每个处理重复 3 次,共 12 个小区。田间水分管理:返青期灌溉深水,水深为苗高的三分之二;分蘖初期保持水层 5~10 cm,分蘖末期落干晒田;穗分化期保持 4~6 cm 水层,而后自然落干。

于水稻幼苗期、拔节期、孕穗期检测 AMF 的侵染状况,孕穗期考察水稻的光合生理指标(净光合速率  $r_{np}$ 、气孔导度  $C_s$ 、蒸腾速率  $r_T$  和水分利用效率  $E_{wu}$ ),收获阶段考察水稻生长与生产相关

的指标。

AMF 侵染率/% = (侵染根段数/观察根段数) × 100,

根冠比 = 地下生物量/地上生物量,

$$E_{wu} = r_{np}/r_T.$$

### 1.3 统计分析软件

应用 SAS8.1 软件对数据进行统计分析,采用 Student-Newman-Keuls 多重比较检验各处理平均值间的差异,统计学意义水平为 5%。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥方式下菌根形成情况

为考察菌根系统的形成情况,于水稻生长的不同时期检测 *G. mosseae* 在根际的定殖情况,结果以菌丝侵染率表示,见图 1。

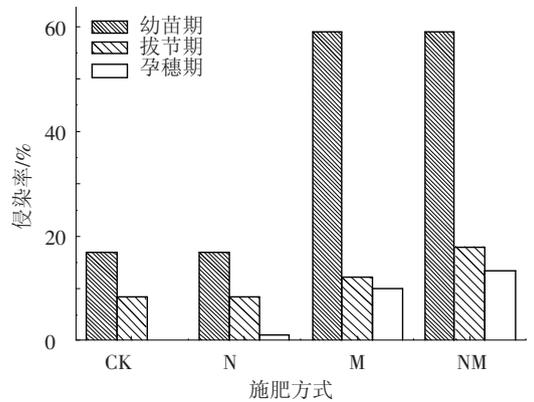


图 1 不同处理中水稻根部 *G. mosseae* 侵染率

由图 1 可以看出,各处理条件下,*G. mosseae* 的侵染率均随着水稻的生长而逐渐降低,幼苗期水稻处于早育秧阶段,*G. mosseae* 侵染率高,拔节时期水稻经历了灌水浸田管理,*G. mosseae* 的侵染率明显下降。

结果表明,拔节时期 *G. mosseae* 对水稻的侵染比较稳定,与 CK 相比,N、M 和 NM 处理下侵染率分别提高 2.4%、47.0% 和 116.9%,其中 NM 侵染率最高。自然条件下(CK 处理),*G. mosseae* 对水稻有少量侵染,氮肥和菌肥的施加均能够提高原生环境中 *G. mosseae* 对水稻的侵染率。其中,氮菌的联合在侵染稳定时期使 *G. mosseae* 的侵染效果最佳,还能提高共生系统的稳定性和抗环境冲击能力,在水稻淹水状态下,仍能保持 13.5%~18.0% 的稳定侵染,缓冲了水淹胁迫作用,保证了后续侵染的维持。因此,对于 *G. mosseae* 的侵染状况,氮肥与生物肥同施为最佳处理条件。

### 2.2 不同施肥方式下水稻的光合生理

于孕穗期考察水稻的光合速率、气孔导度和

水分利用效率等生理活性指标, 考察菌根作物与非菌根作物在光合作用方面的差异, 结果见表 1。

表 1 不同施肥条件下水稻生理活性指标

施肥条件	光合速率	气孔导度	水分利用效率
	$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
CK	15.56b ± 0.84	0.36c ± 0.07	2.46ab ± 0.06
N	17.88a ± 0.72	0.48b ± 0.01	1.83c ± 0.05
M	17.79a ± 0.07	0.50b ± 0.00	2.66a ± 0.01
NM	18.69a ± 0.26	0.65a ± 0.03	2.27b ± 0.35

注: 同列不同字母表示差异统计学意义达 5% 水平。

结果表明, N 处理、M 处理和 NM 处理下的净光合速率均显著高于 CK, 在 3 种施肥处理(N、M 和 NM)中, NM 的净光合速率最大, 较 N 和 M 分别提高 4.5% 和 5.0%。

在同施化肥的处理中, 接菌处理 NM 的水分利用效率显著高于不接菌处理 N, 比 N 处理提高 23.9%, 说明接菌处理能够提高水稻对水资源利用率。尽管氮肥和菌肥单独施用, 其气孔导度和光合利用效率差异无统计学意义, 但是单独接菌处理 M 使水稻具有最高的水分利用效率, 比单独施氮肥处理 N 提高 45.2%。

上述结果表明, 氮菌联合施用使作物对光能和水分等资源的利用方式最合理, 氮菌共施所获得的综合效益最高, 是水稻有效利用资源的最优化措施。

### 2.3 不同施肥方式下水稻总生物量

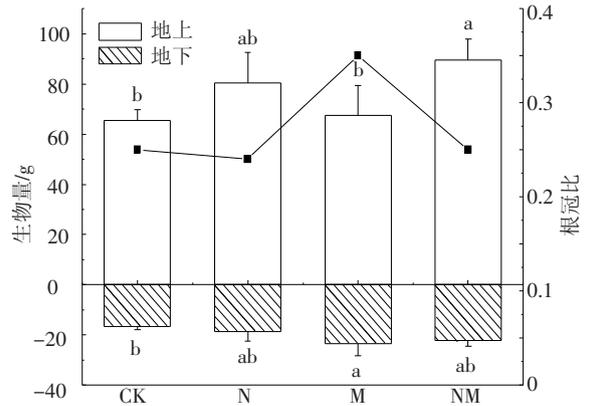
植物各器官在总生物量中所占的比重不同, 体现了不同的生态分配对策。通过比较根冠比, 可以揭示菌根作物与非菌根作物在水稻生物量分配对策上的差异, 于水稻收获期检测水稻总生物量, 结果如图 2 所示。可以看出, 相对于 CK, 施氮处理(N 和 NM)能够显著提高水稻地上部分生物量( $P < 0.05$ ), 分别提高 22.8% 和 37.0%, M 处理与 CK 差异无统计学意义; N、M 和 NM 处理其地下生物量均显著高于 CK, 分别提高 12.3%、41.5% 和 35.0%, 其中 M 对地下生物量促进程度最大。

由水稻的根冠比可知, N 处理的根冠比低于 CK, M 处理高于 CK, 说明单施氮肥处理对地上生物量的促进程度较大, 单施菌肥处理能够促进地下部分的生长, 而氮菌联合能够同时促进地上和地下部分的生长。

### 2.4 不同施肥方式下水稻产量

产量是衡量水稻生产能力的重要指标。于收获阶段考察水稻实际产量, 结果见图 3。可以看出, 与 CK 相比, N、M 和 NM 处理均能够提高水稻

产量, 其中 N 与 NM 能够显著提高作物产量, 分别提高 15.4% 和 21.0%; 在 3 种施肥方式中, N 与 M 处理的产量差异有统计学意义, 这表明单独施加菌肥影响作物生长和菌根效能的发挥, 菌肥单独作用不能保证作物产量, 菌肥不能完全代替化肥; NM 处理产量最高, 在同施化肥的处理中, 接菌处理 NM 的产量比传统田间管理提高 4.8%, 说明在相同化肥施加量下, 氮肥和菌肥联合能够提高氮肥的效率, 进而提高作物产量, 效果好于单独施加氮肥的处理, 氮菌联合是最有利于作物生长的施肥方式。



图中不同字母表示差异统计学意义达 5% 水平。

图 2 水稻收获阶段生物量

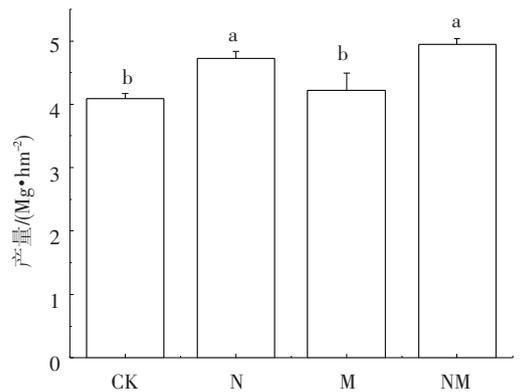


图 3 不同处理水稻的产量

对于作物产量构成因素的分析有助于揭示不同处理对产量影响的内在机理, 找到最佳的促产控制手段。不同施肥方式在水稻产量构成因素中的差别见表 2。

表 2 不同施肥方式的水稻产量构成因素

施肥方式	有效穗数/穴	实粒数/穴	千粒质量/g
CK	18.9b ± 1.6	103.2c ± 12.2	17.951 0c ± 1.635 2
N	19.4b ± 2.9	118.8b ± 16.6	22.561 7a ± 1.122 0
M	19.4b ± 2.1	124.0b ± 13.4	18.556 8c ± 1.300 6
NM	23.4a ± 2.2	135.8a ± 11.2	20.588 6b ± 1.368 4

由表 2 可知, 相对于 CK 处理, N、M 和 NM 3 种

施肥方式下,水稻的有效穗数、实粒数和千粒质量均得到提高,其中 NM 处理的综合效应最显著. 在 3 种强化措施中,接菌的 M 和 NM 处理,总体上水稻的有效穗数和实粒数比不接菌的 N 处理高,而水稻千粒质量均显著低于不接菌处理 ( $P < 0.05$ ),尤其是 NM 处理,其有效穗数和实粒数分别比不接菌的 N 处理提高 20.6% 和 14.3%,而千粒质量降低 9.6%,差异有统计学意义. 这说明相对于未接菌水稻,接菌处理使水稻粒数增多而个体减小,因此, NM 共施耦合效应对作物产量的促进是通过强化大量小种子的对策来实现.

### 3 讨 论

2.1 节的结论表明,相对于不接菌处理(CK 和 N),菌剂施加(M)能够极显著提高作物侵染率,但是由于水淹耕种带来的耗损明显,不能完全替代传统肥料, NM 共施对环境干扰的缓冲能力较强,在经历灌水浸田后仍能维持稳定的侵染率,因此,氮菌共施为最佳田间管理条件.

在水稻孕穗期间,3 种施肥强化措施中,氮菌联合使水稻的净光合速率最大,这与其气孔导度的增大有关,通常气孔开度越大,单位时间内叶片吸收的二氧化碳越多,从而能够有效提高作物同化固定碳源的能力,为水稻生殖生长做好充足的物质储备. 同时,接菌处理(M 和 NM)的水分利用效率明显高于施肥处理(N),尤其是 NM 处理能够同时提高光合速率并减少水分散失的风险. 结合 *G. mosseae* 生长需要适当通气度、减少水层的特性,菌肥共施可以作为节水灌溉的一种耕作方式<sup>[13]</sup>,适合水资源紧张地区的水稻种植,可以作为田间水分管理的指导.

由 2.3 节水稻根冠比的结论可知,接菌能够促进作物地下部分的生长,对于菌根化作物,其地下生物量除了植物根系外,还包括根外菌丝,它的量能够呈指数增长并无限扩展<sup>[14]</sup>,因此,接种 *G. mosseae* 的作物其根部质量会增加,根系及根外菌丝的扩展有利于大面积吸收水分和营养元素,促进作物生长. 氮菌同施能够使水稻地上和地下的生长同时得到促进,既有利于光合器官的构建,促进作物同化吸收碳源并积累干物质,又利于根部对水分及营养的摄取,进而源源不断地提供给地上部分,为光合器官的构建及同化作用提供原料.

为保证物种的延续,作物对生殖资源的分配存在不同的对策,通过产生少量个体大的后代以提高个体竞争能力的对策为 K 对策,产生大量个体小的后代以提高存活能力,在生存进化中以量

取胜的对策为 r 对策<sup>[15-16]</sup>. 水稻的生殖对策属于 r 对策,通过产生大量的小种子将大部分能量用于繁殖,提高存活力,使种群增长到最大. 本文产量构成因素中,相对于传统田间管理(N),接菌处理(NM)能够显著提高水稻的有效穗数和实粒数,降低其千粒质量,并且促进了产量的提高,表明接种 *G. mosseae* 能够使水稻产出更大量的小种子,强化水稻 r 对策的繁殖策略,进一步提高其存活能力.

因此,生物肥料既可以提高作物产量,又可以节约灌水,同时制作成本低廉,可作为一种高效、环保、经济的绿色肥料.

### 4 结 论

1) 各处理条件下,*G. mosseae* 的侵染率从早育秧阶段至移栽后,均随着水稻的生长而逐渐降低;氮肥(N)和菌肥(M)的施加能够提高原生环境中 *G. mosseae* 的侵染率,分别比 CK 提高 2.4% 和 47.0%;在 3 种强化措施中, NM 的侵染率最高,在水稻淹水状态下,仍能保持 13.5% ~ 18.0% 的稳定侵染. *G. mosseae* 在水生环境中的损耗特性决定生物肥不能完全替代传统肥料, NM 联合施用能够获得最稳定的田间共生系统.

2) 在 3 种施肥处理(N、M 和 NM)中, NM 的净光合速率最大,较 N 和 M 分别提高 4.5% 和 5.0%,接菌处理(M 和 NM)可有效提高作物水分利用效率,相对于 N 分别提高 45.2% 和 23.9%. NM 耦合效应对作物的促进能够保证作物具有最佳的光合和水分利用效率.

3) 相对于 CK,施氮处理(N 和 NM)能够显著提高水稻地上部分生物量 ( $P < 0.05$ ),分别提高 22.8% 和 37.0%;接菌处理(M 和 NM)显著提高地下生物量,分别提高 41.5% 和 35.0%,其中 NM 耦合效应能够同时促进地上和地下部分的生长.

4) 在 3 种施肥方式中, NM 处理产量最高,比传统田间管理提高 4.8%,氮菌联合是最有利于作物生长的施肥方式;在相同化肥施加量下,相对于未接菌水稻,接菌处理的有效穗数和实粒数分别提高 20.6% 和 14.3%,通过大量小种子的方式获得高产.

### 参 考 文 献:

- [1] 王小燕,王焱,田小海等. 纳米碳增效尿素对水稻田面水氮素流失及氮肥利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 106-109. (下转第 66 页)