

# 菌肥及其与氮磷配施对水稻生产及分配的影响

张淑娟, 王立, 马放, 张雪, 徐亚男, 李哲

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

**摘要:** 为探讨菌根菌肥单施及其与化肥配施对水稻产量的影响,测定不同施肥方式下水稻光合速率,分析水稻物质分配比例及产量构成因子. 结果表明:菌根菌肥单施增大库容的同时改善了光合作用,水稻增产 29.27%. 菌根菌肥与氮肥配施提高了水稻光合速率,加大了籽实的物质分配比例,水稻增产 41.37%. 菌根菌肥与磷肥配施及其与磷肥氮肥配施两种条件下,光合作用显著改善,稻草产量增加,水稻实际产量增幅小. 菌根菌肥单施及其与氮肥配施都能有效提高水稻产量,而与磷肥配施及与氮肥磷肥二者配施的促产条件有待进一步探讨.

**关键词:** 水稻;氮肥;磷肥;产量;菌根;生物肥料;产量构成;库源关系

**中图分类号:** X5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2012)06-0033-04

## Effects of mycorrhiza alone with or without nitrogen and phosphate on rice dry matter production and distribution

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

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

**Abstract:** With different fertilization, the photosynthetic rate of rice was measured, then the distribution and yield components were analyzed to investigate the influences of single mycorrhizal fertilizer and the mycorrhizal fertilizer mixed chemical fertilizer on rice yield. The results showed that: 1) The usage of single mycorrhizal fertilizer increased the storage capacity and the photosynthetic rate of rice, making rice yield increase by 29.27%, while there was no difference in distribution of dry matters. 2) The photosynthetic rate of rice was improved by the mycorrhizal nitrogen fertilizer, moreover, the proportion of dry matter to the rice seeds raised, and rice yield increased by 41.37%. 3) The photosynthetic rate of rice was enhanced by the mycorrhizal phosphate fertilizer and the mycorrhizal nitrogen and phosphate fertilizer; there was no difference in distribution of rice dry matter; the rice yield increased by 19.10% and 17.48%, respectively. The usage of single mycorrhizal fertilizer and the mycorrhizal nitrogen fertilizer can effectively improve the rice yield, but it needs further research to touch the effectiveness of the other fertilizer-modes.

**Key words:** rice; nitrogen; phosphate; yield; mycorrhiza; bio-fertilizer; yield components; sink source

水稻增产的重要途径是增加化肥施用量,由此产生的能源和资源紧缺<sup>[1]</sup>土壤板结<sup>[2]</sup>环境污染<sup>[3-5]</sup>等问题日益突出. 化肥过度施用造成的生

态危机使得开发环保型的生物肥料变得刻不容缓. 以根瘤菌为核心的生物肥料可使水稻产量提高 13%~43%<sup>[6-8]</sup>. I. Pereira<sup>[9]</sup>、H. Saadatnia<sup>[10]</sup>和 H. Gamal-Eldin 等<sup>[11]</sup>分别利用丝状蓝藻菌和荚膜红细菌在保证产量不变的前提下使每公顷稻田氮肥施用量减少 50%. 日本学者在大田试验条件下利用菌根真菌将水稻产量提高 10%~21%<sup>[12-13]</sup>,本项目前期研究表明盆栽水稻接种菌根真菌后产量提高 45.3%<sup>[14]</sup>. 水稻产量的形成是

收稿日期: 2011-07-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179041); 国家创新研究群体科学基金资助项目(50821002); 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.

源生产和输出库接收和贮藏同化产物的过程,源库关系是影响水稻高产的重要因素.前人对生物肥料的研究多集中在改善作物营养水平方面,对水稻物质生产分配和积累研究较少.实验设置菌根菌肥单施及其与化学肥料配施,考察菌根菌肥在水稻源库流体系中的作用,确定与化学肥料配施的最佳方式,为高效生物肥的开发提供理论支持.

1 试 验

实验地点: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”(45°13.819'N, 126°22.611'E).基地土壤养分:有机质 26.32 g · kg<sup>-1</sup>,水解氮 125.25 mg · kg<sup>-1</sup>,速效磷 120.63 mg · kg<sup>-1</sup>,速效钾 17.59 mg · kg<sup>-1</sup>.

小区设置: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 m<sup>2</sup>,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 做地下水文阻断,30 cm 为地上的水文阻断,小区间隔 1 m 做空间隔离.

田间管理:高浓度水稻复合肥作为底肥(N - P<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - K<sub>2</sub>O:16 - 17 - 12,总养分 >45%),施肥量为 360 kg · hm<sup>-2</sup>.移栽时每个小区 20 垅,每垅 40 穴,每穴 3 棵基本苗.移栽后 15 d 追肥,追肥方见表 1.每处理 3 个重复.

表 1 稻田各小区施肥方案

| 施肥方式      | 编号  | 肥料种类及施肥量/(kg · hm <sup>-2</sup> )               |                                                  |      |
|-----------|-----|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------|
|           |     | (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> | 菌根菌肥 |
| 菌根菌肥单施    | M   | 0                                               | 0                                                | 550  |
| 氮肥菌根配施    | NM  | 180                                             | 0                                                | 550  |
| 磷肥菌根配施    | PM  | 0                                               | 600                                              | 550  |
| 氮肥磷肥与菌根配施 | NPM | 180                                             | 600                                              | 550  |
| 对照        | CK  | 0                                               | 0                                                | 0    |

光合速率:用 Li - 6400 便携式光合作用测定仪进行测定.晴朗天气集中在 9:00 ~ 11:30 和下午 3:00 ~ 5:00 两个时段测定.测定叶片均为旗叶,且叶片颜色、伸展卷曲状态、叶片宽窄一致,有代表性的完整叶片.每小区测定 3 个叶片,每个叶片重复 3 次.

单穴稻草产量:水稻成熟后每个小区随机齐根割取 10 穴水稻,分别手工脱粒后,地上部分在 105 ℃ 高温下杀青 15 min,在 75 ℃ 烘干至恒质量,平均值为单穴稻草产量.单穴籽实产量:每个小区随机抽取 10 穴水稻,分别进行手工脱粒.籽粒室内晾晒 7 d,平均值为单穴籽实产量.单穴根

系产量:每个小区随机抽取 3 穴水稻的根部,洗净后获得水稻根系干质量,平均值为单穴根系产量(每穴以水稻生长处为中心,取 15 cm × 15 cm × 10 cm 规格的土柱获得根系).单穴总生物量为单穴稻草产量单穴籽实产量与单穴根系产量之和.

稻草比例/% =  $\frac{\text{单穴稻草产量}}{\text{单穴总生物量}} \times 100,$

籽实比例/% =  $\frac{\text{单穴籽实产量}}{\text{单穴总生物量}} \times 100,$

根系比例/% =  $\frac{\text{单穴根系产量}}{\text{单穴总生物量}} \times 100.$

水稻实际产量:每小区随机选取 4 个收割区(收割区范围是 4 垅,每垅 7 穴),每个收割区的水稻收割脱粒及晾晒都单独进行.依据水稻群体密度计算单位面积水稻实际产量.

水稻理论产量(kg · hm<sup>-2</sup>) = 穗数 × 每穗粒数 × 结实率 × 千粒质量,

水稻库容有效充实度/% =  $\frac{\text{水稻实际产量}}{\text{水稻理论产量}} \times 100,$

结实率/% =  $\frac{\text{每穗实粒数}}{\text{每穗总粒数}} \times 100.$

穗数(穗 · hm<sup>-2</sup>):每个小区随机抽取 10 穴水稻计量平均有效分蘖数,平均值换算为每公顷穗数.

每穗粒数(粒/穗):每个小区随机抽取 10 个稻穗计量.

千粒质量(kg):每小区选取 100 粒籽实称得质量,重复 5 次的平均值即为千粒质量.

2 结果与分析

2.1 施肥方式对水稻产量指标的影响

在水稻腊熟期后对其进行取穗考产,产量见图 1.

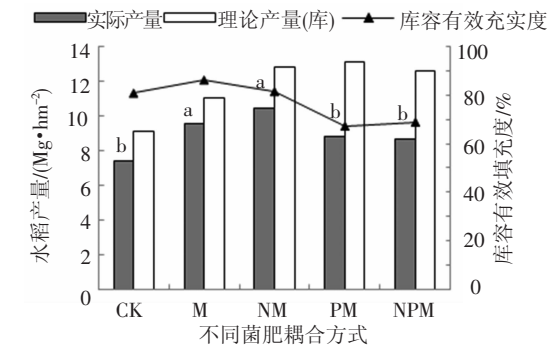


图 1 施肥方式对水稻实际产量和理论产量的影响

由图 1 可知,施肥方式对水稻实际产量和理论产量的影响差异有统计学意义.与对照相比,单施菌根菌肥提高了水稻的实际产量和理论产量,库容有效充实度最高(86.36%).氮肥和菌根菌肥配施时,水稻实际产量和理论产量进一步提高,

实际产量变异较大.与单施菌根菌肥相比,磷肥与菌根菌肥配施氮肥磷肥与菌根菌肥配施两种追肥方式下实际产量较对照高.在此两种条件下水稻的理论产量提高显著,其中磷肥和菌根菌肥配施时理论产量达 13 084.29 kg·hm<sup>-2</sup>,库容有效充实度最低.

2.2 施肥方式对水稻光合作用及物质分配的影响

水稻光合作用及物质分配比例是影响水稻实际产量的重要因素,见图 2、3.由图 2 可知,与对照相比,4 种施肥方式都显著提高了水稻光合速率.其中单施菌根菌肥和氮肥磷肥菌根菌肥的促进作用最显著.在磷肥与菌根菌肥配施条件下,水稻的光合速率显著提高.由图 3 可知,与其他处理相比,菌根菌肥和氮肥配施条件下物质向根系分配的比例显著降低,而流向籽实的比例显著增大.

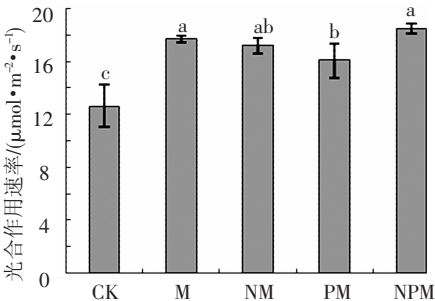


图2 施肥方式对水稻光合作用的影响

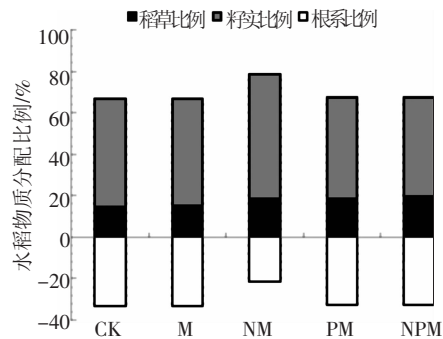


图3 施肥方式对水稻物质分配比例的影响

2.3 施肥方式对水稻产量构成因子的影响

产量构成因子分析能直观地展现产量分析的视野,从而分析水稻产量变异的可能途径.施肥方式对水稻产量构成因子的影响见表 2、3.

表2 施肥方式对水稻产量构成因子的影响

| 实验设置 | 穗数<br>穗·m <sup>-2</sup> | 每穗总粒数<br>粒·穗 <sup>-1</sup> | 结实率<br>% | 千粒质量<br>g |
|------|-------------------------|----------------------------|----------|-----------|
| CK   | 446.6±11.3              | 114.2±5.8                  | 91.2     | 19.6±1.6  |
| M    | 451.11±6.7              | 135.6±3.4                  | 89.8     | 20.1±0.7  |
| NM   | 488.8±5.9               | 139.7±4.9                  | 93.1     | 20.1±1.1  |
| PM   | 515.5±9.2               | 145.8±6.0                  | 90.2     | 19.3±0.9  |
| NPM  | 450.3±7.6               | 119.9±3.1                  | 95.0     | 22.3±2.0  |

表3 产量构成因子与对照相比增加比例 %

| 实验设置 | 单位面积穗数 | 每穗总粒数  | 结实率   | 千粒质量  |
|------|--------|--------|-------|-------|
| M    | 1.01   | 18.74  | -1.54 | 2.55  |
| NM   | 9.45   | 22.33  | 2.08  | 2.55  |
| PM   | 15.43  | 27.67  | -1.10 | -1.53 |
| NPM  | -0.18  | -13.75 | 5.70  | 11.22 |

由表 2、3 可知,单施菌根菌肥,每穗总粒数与对照相比提高 18.74%,单位面积穗数和千粒质量分别提高 1.01% 和 2.55%,结实率下降.氮肥和菌根菌肥配施条件下,构成因子与对照相比都有不同程度的提高,其中每穗总粒数提高幅度最大,为 22.33%.磷肥和菌根配施条件下,单位面积穗数和每穗总粒数分别提高 15.43% 和 27.67%,同时结实率和千粒质量分别下降 1.10% 和 1.53%.在氮肥磷肥菌根菌肥配施条件下,每穗总粒数和千粒质量变化显著,前者降低 13.75%,后者提高 11.22%.结实率提高了 5.7%.

3 讨论

3.1 菌根菌肥对水稻的促产作用

源强库大节流是水稻高产的必要条件.光合速率是源活性的重要表征.稻草的生物量则是源大小的主要体现<sup>[15]</sup>.追加菌根菌肥能够改善水稻光合作用,提高稻草产生量,实现强源.同时,菌根菌肥还通过穗大粒多性状实现扩库功能.结实率的降低完全由千粒质量的增加补偿,即产量构成因子间的补偿现象.追加菌根菌肥后稻草产生量降低,说明光合产物高效地流入了籽粒这一不可逆库,而流向稻草这一可逆库的量相对较少.源的流向正确,即节流的实现,减少了无效库的开支,提高了光合产物的利用效率,保证了较高的库容有效充实度(86.36%)<sup>[14]</sup>.单独追加菌根菌肥对水稻增产起到了强源扩库节流作用.

3.2 菌根菌肥与氮肥配施对水稻的促产作用

氮素是水稻产量提高主要限制元素之一.合理的氮素营养具有丰源、强源、扩库、活库功能,体现在提高水稻叶面积指数<sup>[16]</sup>、提高水稻光合作用速率、增穗、稳粒、提高蔗糖合成酶活性<sup>[17]</sup>.在菌根菌肥的强源扩库节流的基础之上,氮肥的添加使产量提高 9.36%.一是氮肥的施加实现了水稻有效分蘖和穗数的增加大穗的形成及较大籽粒的产生及较高结实率.二是氮肥的施加提高了光合作用速率,增大了源器官同化物的形成和输出的能力,从而保证了库形成和充实的物质基础.另外,物质流向根系的比例减小,流向籽实的比例增大,从而减少了源的浪费,达到了“节流”目的<sup>[18]</sup>.菌根菌肥与氮肥配施更大幅度地实现了强源扩库

节流,从而保证了水稻的高产。

### 3.3 菌根菌肥与磷肥配施菌根菌肥与氮肥磷肥配施对水稻的促产作用

磷素营养在水稻生长过程中能够促进水稻根的伸长分蘖颖花与结实等<sup>[19]</sup>。实验地区土壤速效磷含量适中,可以基本满足作物生长的需要<sup>[20]</sup>。施加磷肥使得水稻争取了最高的库数量和库容量。但水稻的光合作用速率却没有相应提高,出现源和库不匹配的现象。不仅如此,稻草产量均高于其他追肥方式表明源的流向与库的节奏不合拍,即光合产物流向了无效分蘖穗粒等,造成物质和能量的浪费。此条件下水稻前期建库数量与后期实库能力不符,源流向错误,导致用于构建无效库的开支过大,水稻实际产量提高幅度有限。

## 4 结 论

1) 菌根菌肥单施在水稻生产中起强源扩库节流作用,水稻实际产量高达  $9\,535.23\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,与空白对照相比增加 29.27%。

2) 与氮肥配施后菌根菌肥进一步提高了水稻光合作用速率,增大了源器官同化物的形成和输出能力,同时扩大了库容。源和库的节奏相适应保证了较高的库容有效充实度,水稻实际产量高达  $10\,427.7\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

3) 与磷肥、磷肥氮肥配施后,菌根菌肥同时提高了水稻源强和库容。但二者节奏不合拍且流向错误,使水稻理论产量和稻草产量过高,最终导致水稻实际产量未达到预期效果。

## 参考文献:

- [1] 宋阳,韩效钊,吴雪平,等. 化肥与节能减排[J]. 安徽化工,2010,(1):7-10.
- [2] 高菊生,李菊梅,徐明岗,等. 长期施用化肥对红壤旱地作物和水稻产量影响[J]. 中国农学通报,2008,24(1):286-292.
- [3] ENTRYA J A, SOJKA R E, WATWOOD M, *et al.* Polyacrylamide preparations for protection of water quality threatened by agricultural run off contaminants[J]. Environmental Pollution, 2002, 120:191-200.
- [4] WANG Xiaoyan. Management of agricultural nonpoint source pollution in China: current status and challenges[J]. Water Sci Technol, 2006, 53(2):1-9.
- [5] USEPA. National management measures to control nonpoint source pollution from agriculture [J]. Office of Wetlands, Oceans and Watersheds, 2003, 42(3):55-60.
- [6] HUSSAIN M B, MEHBOOB I, ZAHIR Z A, *et al.* Potential of Rhizobium spp. for improving growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Soil Environ, 2009, 28(1):49-55.
- [7] TRAN van V, BERGO O, KE S N, *et al.* Repeated beneficial effects of rice inoculation with a strain of Burkholderia vietnamiensis on early and late yield components in low fertility sulphate acid soils of Vietnam [J]. Plant Soil, 2000, 218:273-284.
- [8] YANNI Y G, DAZZO F B. Enhancement of rice production using endophytic strains of Rhizobium leguminosarum bv trifolii in extensive field inoculation trials within the Egypt Nile delta [J]. Plant and Soil, 2010, 336(1/2):129-142.
- [9] PEREIRA I, ORTEGA R, BARRIENTOS L, *et al.* Development of a biofertilizer based on filamentous nitrogen-fixing cyanobacteria for rice crops in Chile [J]. J Appl Phycol, 2009, 21:135-144.
- [10] SAADATNIA H, RIAHI H. Cyanobacteria from paddy fields in Iran as a biofertilizer in rice plants [J]. Plant Soil and Environment, 2009, 55(5):207-212.
- [11] GAMAL-ELDIN H, ELBANNA K. Field evidence for the potential of rhodobacter capsulatus as biofertilizer for flooded rice [J]. Current Microbiology, 2011, 62(2):391-395.
- [12] SOLAIMAN M Z, HIRATA H. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation of rice seedlings at the nursery stage upon performance in the paddy field and greenhouse [J]. Plant and Soil, 1997, 191:1-12.
- [13] SOLAIMAN M Z, HIRATA H. Responses of directly seeded wetland rice to arbuscular mycorrhizal fungi inoculation [J]. Journal of Plant Nutrition, 1997, 20(11):1479-1487.
- [14] 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):958-963.
- [15] 杨建昌,张文虎,王志琴,等. 水稻新株型与粳/籼杂种源库特征与物质运转的研究[J]. 中国农业科学, 2001, 34(5):511-518.
- [16] EVANS L T. Crop evolution, adaptation and yield [M]. England: Syndicate of the Press of the University of Cambridge, 1996.
- [17] PANYA P I, PASEUTH S I, SHISAVONG P, *et al.* Genotype differences in nutrient up take and utilization for grain yield production of rainfed lowland rice under fertilized and nonfertilised conditions [J]. Field Crops Research, 2000, 65:57-68.
- [18] 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.
- [19] 郭再华,贺立源,徐才国. 不同耐低磷水稻基因型对难溶性磷的活化吸收[J]. 作物学报, 2005, 31(10):1322-1327.
- [20] 刘慧屿,魏丹,汪景宽,等. 黑龙江省双城市土壤有机质和速效养分的空间变异特征[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(2):195-199.

(编辑 刘 彤)