

周德平,孙会峰,褚长彬,等.施氮水平对水稻产量、AMF 侵染状况及根际土壤性状的影响[J].上海农业学报,2021,37(3):35-41.

## 施氮水平对水稻产量、AMF 侵染状况及根际土壤性状的影响

周德平,孙会峰,褚长彬,赵 峥,周 胜,吴淑杭\*

(上海市农业科学院生态环境保护研究所,上海 201403;上海低碳农业工程技术研究中心,上海 201415)

**摘要:**为明确上海地区稻-麦轮作模式下稻季最佳施氮量,以8年田间定位试验点的稻田土壤为对象,研究了不同施氮水平对水稻产量、AMF 侵染状况及根际土壤理化性状和微生物的影响。结果表明:在0—200 kg/hm<sup>2</sup>时,增施氮肥可显著促进水稻增产,施氮水平与产量呈正相关( $r=0.923$ ),超过200 kg/hm<sup>2</sup>后,增产效应不再显著;在0—300 kg/hm<sup>2</sup>时,随施氮水平的增加,水稻根际土壤pH、有效P和速效K含量降低,有机质含量增加,施氮水平与土壤pH、有效P和速效K含量均呈显著负相关( $r$ 分别为-0.984、-0.979和-0.952);在氮磷钾养分分配不平衡时,土著AMF的侵染性能提高,帮助水稻根系从土壤中吸取更多养分以应对逆境;增施氮肥可促进水稻根际土壤细菌和放线菌增殖,施氮水平与细菌和放线菌数量均呈正相关( $r$ 分别为0.945和0.820);施氮200 kg/hm<sup>2</sup>处理的水稻根际土壤细菌种群比例(B/T)最高,真菌种群比例(F/T)最低,放线菌与真菌数量比(A/F)和细菌与真菌数量比(B/F)均最高,根际土壤微生物碳源综合代谢能力最强,生物多样性指数较高。综上,在上海地区单季粳稻种植过程中氮肥施用量以200 kg/hm<sup>2</sup>为宜,有利于减缓耕作土壤酸化,保护土壤微生态结构平衡和物种多样性。

**关键词:**施氮水平;水稻产量;丛枝菌根真菌;土壤微生物;土壤理化性状

**中图分类号:**S511.062;S154.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3924(2021)03-035-07

## Effects of nitrogen application levels on rice yield, AMF infection and rhizosphere soil properties

ZHOU Deping, SUN Huifeng, CHU Changbin, ZHAO Zheng, ZHOU Sheng, WU Shuhang\*

(Eco-Environmental Protection Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; Shanghai Engineering Research Centre of Low-carbon Agriculture, Shanghai 201415, China)

**Abstract:** In order to determine the optimal nitrogen application rate in rice season under rice-wheat rotation in Shanghai, the effects of different nitrogen application levels on rice yield, AMF infection status and rhizosphere soil physicochemical properties and soil microorganism were studied in paddy soil of 8-year field experiment site. The results showed that in the range of 0—200 kg/hm<sup>2</sup>, increasing nitrogen application could significantly promote the rice yield, and there was a positive correlation between nitrogen application level and yield ( $r=0.923$ ). When the nitrogen application level was more than 200 kg/hm<sup>2</sup>, the yield increasing effect was no longer significant. In the range of 0—300 kg/hm<sup>2</sup>, with the increase of nitrogen application level, the pH, available P content and available K content of rice rhizosphere soil decreased, while the organic matter content increased. There was a significant negative correlation between nitrogen application level and soil pH, available P content and available K content ( $r = -0.984, -0.979$  and  $-0.952$ , respectively). When the ratio of N, P and K was unbalanced, the infection ability of aboriginal AMF was improved to help rice roots absorb more nutrients from the soil to cope with the adversity. Increasing nitrogen application could promote the proliferation of bacteria

收稿日期:2019-07-03

基金项目:农业基础性长期性科技项目(ZX07S1001);上海市种业发展项目[沪农科种字(2017)第1-3号]

作者简介:周德平(1976—),女,硕士,副研究员,主要从事农业微生物与土壤生态研究。E-mail:zhoudeping919@163.com

\*通信作者, E-mail:wushuhang88@163.com

and actinomycetes in rice rhizosphere soil, and the nitrogen application level was positively correlated with the number of bacteria and actinomycetes ( $r = 0.945$  and  $0.820$ , respectively). The treatment of  $200 \text{ kg/hm}^2$  nitrogen application had the highest proportion of bacterial population (B/T), the lowest proportion of fungal population (F/T), the highest ratio of actinomycetes to fungi (A/F) and the highest ratio of bacteria to fungi (B/F), the strongest ability of comprehensive metabolism of carbon source and higher biodiversity index. In conclusion,  $200 \text{ kg/hm}^2$  of nitrogen fertilizer should be applied to single cropping *Japonica* rice in Shanghai, which is beneficial to slow down the acidification of cultivated soil and protect the balance of soil micro ecological structure and species diversity.

**Key words:** Nitrogen application level; Rice yield; AMF; Soil microorganism; Soil physic-chemical properties

氮肥施用对保障水稻高产稳产有着至关重要的作用,但过量施用则会导致土壤酸化、病虫害加重、农业面源污染负荷增加等诸多负面效应<sup>[1-3]</sup>。在我国的一些主要粮食产区,常规措施下典型的一年两熟轮作体系氮肥年施用量高达  $600 \text{ kg/hm}^2$ ,但氮肥只有 38% 左右的作物利用率,相当一部分氮肥通过不同途径损失到环境中,造成了大气、水体和土壤环境质量的退化<sup>[4-5]</sup>。如何在保障水稻产量的基础上合理施用氮肥以兼顾粮田土壤保育和面源污染防控成为农业生产与科研关注的热点。

华东地区是我国重要的稻米产区,本试验利用上海市农业科学院庄行试验站的稻田长期定位试验基地,研究不同施氮水平下水稻‘沪早 61’的产量、根系 AMF 侵染状况、土壤理化性状、养分含量及微生物种群区系的差异,以明确其种植过程中最佳氮肥施用量并探寻相关土壤保育机制,为稻田氮肥管理和土壤生态保育的协调发展提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

田间长期定位试验点位于上海市低碳农业工程技术研究中心 ( $121^{\circ}23'E, 30^{\circ}53'N$ ),该中心年均气温  $16^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量约  $1200 \text{ mm}$ ,黏壤土质,0—20 cm 深度土壤 pH 为 6.7 左右。长期定位试验开始于 2011 年,设 4 个施氮水平处理:不施氮肥 (N0)、施氮  $100 \text{ kg/hm}^2$  (N100)、施氮  $200 \text{ kg/hm}^2$  (N200) 和施氮  $300 \text{ kg/hm}^2$  (N300),每个处理 3 次重复,共 12 个试验小区,采用完全随机区组设计,小区面积均为  $56 \text{ m}^2$  ( $8 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ ),四周垂直埋入 1.2 m 防渗膜,小区之间设置宽 30 cm 的水泥田埂。试验地种植模式为稻麦轮作,各处理间除稻季施氮水平不同外,麦季施肥及其他管理措施均保持一致。

### 1.2 供试材料

试验所用 N 肥为尿素 ( $N \geq 46.4\%$ ),P 肥为过磷酸钙 ( $P_2O_5 \geq 12.0\%$ ),K 肥为氯化钾 ( $K_2O \geq 60\%$ )。麦季施肥量为  $N 225 \text{ kg/hm}^2$ 、 $P_2O_5 90 \text{ kg/hm}^2$ 、 $K_2O 200 \text{ kg/hm}^2$ 。稻季 N 肥用量以基肥:蘖肥:穗肥 = 5:3:2 的比例施用;P 肥全部基施,用量为  $P_2O_5 100 \text{ kg/hm}^2$ ;K 肥用量以基肥:穗肥 = 11:14 的比例施用,用量为  $K_2O 225 \text{ kg/hm}^2$ 。

供试水稻品种为‘沪早 61’ (沪审稻 2016005),采用二段育秧和人工移栽法进行小区种植试验。2018 年 5 月中旬开始育苗;6 月中旬移栽,行株距为  $25 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ ,种植密度为  $20 \text{ 穴/m}^2$ ;10 月 31 日收割。

### 1.3 样品采集与前处理

田间植株与土壤样品的采集于 2018 年 9 月 26 日水稻接近成熟时进行。采用对角线法每区选 3 穴,沿植株根系周围向下挖掘,尽量将整株植物根系及根围土壤挖出,装入干净塑料袋内,带回实验室进行根围土壤剥离、混匀、四分法留样后,取部分鲜样用于微生物分析,剩余部分摊晾、风干后用于 AMF 孢子计数<sup>[6]</sup>和土壤理化分析;水稻根系及时用流水清洗,选取新鲜、坚韧的根,用自来水清洗干净,吸干水分,剪成 1 cm 根段,然后用 FAA 固定,经透明、酸化、墨水醋染色后,制片观察<sup>[7]</sup>。

### 1.4 测定指标与方法

#### 1.4.1 土壤理化性状

pH 按水土比 2.5:1、EC 值按水土比 5:1 电位法测定;有机质含量测定采用重铬酸钾氧化法(外加热

法);碱解氮含量测定采用碱解扩散法;速效 P 含量测定采用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法;速效 K 含量测定采用乙酸铵浸提-火焰光度法<sup>[8]</sup>。

#### 1.4.2 水稻测产

每小区单独收割晒干后称重,留取稻谷样品烘干测实际含水率,计算不含水的绝对干重,然后按国家标准粳稻含水率 14.5% 折算成标准产量。

#### 1.4.3 AMF 侵染频度、侵染密度及孢子计数

丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhiza fungi, AMF)是最重要的植物共生菌之一,存在于超过 80% 以上的维管植物中,湿地环境中也普遍存在<sup>[9-10]</sup>,与共生植物间存在着养分交换关系,可增加作物养分供给,增强抗逆性<sup>[11-13]</sup>。选取 30 条染色好的根段制片、镜检。据根段中 AMF 侵染强度分级标准 0、<1%、<10%、<50%、>50% 和 >90% 定义并记录每一根段,用以计算整个根系中 AMF 的侵染频度(F)和侵染密度(M)。根围土壤中 AMF 孢子利用三层湿筛分离后显微计数<sup>[14-15]</sup>。

侵染频度(F) = (侵染根段数/全部根段数) × 100% ;

侵染密度(M) = (0.95 × N<sub>5</sub> + 0.70 × N<sub>4</sub> + 0.30 × N<sub>3</sub> + 0.05 × N<sub>2</sub> + 0.01 × N<sub>1</sub>) / 镜检总根段数 × 100% 。

其中 0.95、0.70、0.30、0.05、0.01 分别代表各级所占的权重, N<sub>5</sub>、N<sub>4</sub>、N<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>1</sub> 分别代表各级根段数之和。

#### 1.4.4 土壤可培养微生物

采用梯度稀释平板培养法测定土壤细菌、放线菌、真菌及溶磷解钾微生物种群数量。所用培养基分别为牛肉膏蛋白胨琼脂培养基、改良高氏一号、PDA、蒙金娜有机磷、PKO 无机磷和解钾培养基,具体配方见文献[16]。因细菌、放线菌和真菌种群数量差异呈数量级变化,为便于分析,将所得微生物数量[单位为 cfu/(g 土)]记为 A,取常用对数(lgA)后再作图。

#### 1.4.5 土壤微生物代谢活性及多样性分析

利用 Biolog-Eco 系统进行土壤微生物的代谢活性和多样性分析,计算 AWCD 值(平均每孔光密度)、碳源利用种类(S)、Shannon 指数和均匀度<sup>[17-19]</sup>。

### 1.5 数据分析

采用 Excel 2010 软件进行数据的整理、作图,使用 SPSS 19.0 统计软件对平均数用 Duncan 新复极差法进行多重比较和显著性检验(P < 0.05)。多样性指数及聚类分析利用 DPS 7.05 软件的数学生态学和模糊聚类分析模块完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮水平对水稻产量与稻田土壤理化性状的影响

由表 1 可见,施用氮肥可显著影响水稻产量,但增产效应随施氮量增加逐渐减小。N100 处理的水稻产量较 N0 处理增加 47.1%, N200 处理较 N100 处理增产 13.2%, 而 N300 处理较 N200 处理增产仅为 2.6%。随施氮量增加,稻田土壤有机质含量增加,pH 降低,土壤有效 P 和速效 K 含量逐渐减少。不同施氮水平下稻田土壤 EC 值差异不显著,N200 和 N300 处理土壤碱解氮含量相对较高。

表 1 施氮水平对水稻产量与土壤理化性状的影响

Table 1 Effects of nitrogen application level on rice yields and soil physicochemical properties

施氮水平	水稻产量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	有机质 含量/%	pH	EC/ (μS·cm <sup>-1</sup> )	碱解氮含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效 P 含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效 K 含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
N0	5.8 c	2.5 c	6.7 a	190.7 a	121.7 b	26.4 a	360.0 a
N100	8.8 b	2.8b	6.5 b	178.1 a	112.3 b	19.5 b	344.0 a
N200	9.6 a	2.8 b	6.2 c	186.0 a	131.0 a	17.6 b	273.7 b
N300	9.9 a	3.0 a	6.1 c	187.1 a	139.7 a	10.5 c	162.7 c

注:表中数据为平均值,同列数值后不同小写字母表示在 0.05 水平下差异显著。

### 2.2 施氮水平对水稻根系 AMF 侵染状况的影响

如图 1 所示,不同施氮水平处理间水稻‘沪早 61’根系 AMF 的侵染频度(F)差异较小,侵染频度最小的 N200 处理只比侵染频度最高的 N0、N300 处理低 2%。氮磷钾三元素养分相对平衡度最高的 N200 处理的 AMF 侵染频度最低,其次为 N100 处理,不施氮肥的 N0 处理和施氮最多的 N300 处理的 AMF 侵染频

度则相对较高。N0 处理的 AMF 侵染密度(M)显著低于 N100 和 N300 处理,N300 处理的 AMF 侵染密度最大(18%),其次为 N100 处理(16%),氮磷钾平衡施用的 N200 为施氮处理中 AMF 侵染密度最小者。N200 处理的土壤 AMF 孢子数量也最少,数量最多的 N100 处理与其他处理间的差异达显著水平。由此可见,平衡施肥影响着水稻根系的 AMF 侵染状况,在氮磷钾养分配比不平衡时,AMF 的侵染性能提高,以帮助水稻根系从土壤中吸取更多所需养分,成为水稻应对逆境的一种调节功能。但养分失衡过于严重时则不利于 AMF 对水稻根系的侵染,如无氮肥的 N0 处理 AMF 侵染性能较弱,其 AMF 侵染密度(M)仅为 N300 处理的 44.4%,为 N100 处理的 50%,为 N200 处理的 57.1%。

### 2.3 施氮水平对水稻根际土壤可培养微生物数量与区系结构的影响

根际土壤微生物的种类和数量直接影响土壤的生物化学活性及养分组成和转化,其区系组成与植物根系生长发育和土壤健康状况密切相关,影响着植物的生长<sup>[20]</sup>。由图 2 可见,与 N0 处理相比,N100 和 N300 处理水稻根际土壤细菌、真菌、放线菌和可培养微生物总数均有所增加,细菌数量分别为 N0 处理的 1.46 倍和 1.73 倍,真菌数量分别为 N0 处理的 2.69 倍和 1.20 倍,放线菌数量分别为 N0 处理的 1.50 倍和 1.64 倍,可培养微生物总数分别为 N0 处理的 1.48 倍和 1.70 倍。N200 处理土壤细菌、放线菌和可培养微生物总数也呈增加趋势,分别为 N0 处理的 1.52 倍、1.33 倍和 1.45 倍;真菌数量减少,约为 N0 处理的 81%。可见,氮肥施用可刺激水稻根际土壤微生物增殖,根际土壤细菌和放线菌数量会随施氮水平的增加而显著增加。

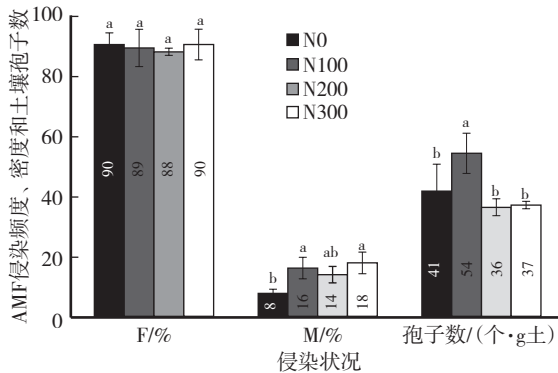


图 1 施氮水平对水稻根系 AMF 侵染状况的影响

Fig.1 Effects of nitrogen application level on AMF infection in rice roots

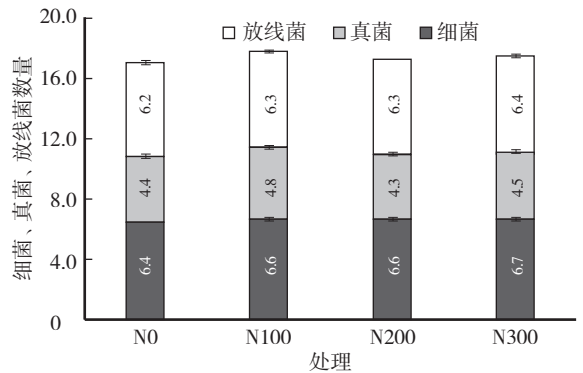


图 2 施氮水平对水稻根际土壤可培养微生物数量的影响

Fig.2 Effects of nitrogen application level on the number of culturable microorganisms in rice rhizosphere soil

如图 3 所示,与 N0 处理相比,N100 处理的土壤细菌种群比例减少约 1%,放线菌种群比例变化不明显,真菌种群上升约 0.4%;N200 与 N300 处理的细菌种群比例分别上升 3% 和 1%,放线菌种群比例分别减少 3% 和 2%,真菌种群比例分别减少 0.3% 和 0.2%。A/F、B/F 是土壤微生物区系结构的两个重要特征指标,放线菌中有许多能分泌抗生素的生防菌,对作物土传病害有一定的防控效应,而真菌种群变化往往与土传真菌病害密切相关。在 3 个施氮水平中,N200 处理的土壤细菌种群比例(B/T)最高、真菌种群比例(F/T)最低、放线菌和真菌比(A/F)与细菌与真菌比(B/F)均最高,更利于土壤微生物群落结构的稳定与健康<sup>[21-22]</sup>。

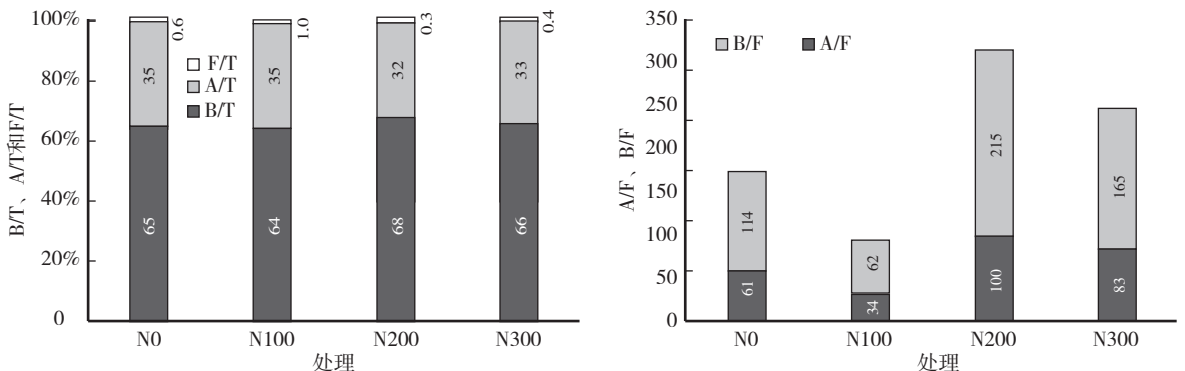


图 3 施氮水平对水稻根际土壤可培养微生物区系结构的影响

Fig.3 Effects of nitrogen application level on culturable microorganisms structure in rice rhizosphere soil

## 2.4 施氮水平对水稻根际土壤微生物代谢功能及生物多样性的影响

如图4所示,不同施氮水平下‘沪早61’根际土壤微生物碳源代谢的AWCD值差异不明显。N300处理的AWCD在延滞期、对数期和稳定期始终低于其他处理,N200处理的碳源综合代谢能力虽然在前期弱于N100处理,但在对数后期和稳定期赶超并稳定高于N100处理。以上结果表明:N200处理的水稻根际土壤微生物的碳源综合代谢能力最强,N300处理最弱。

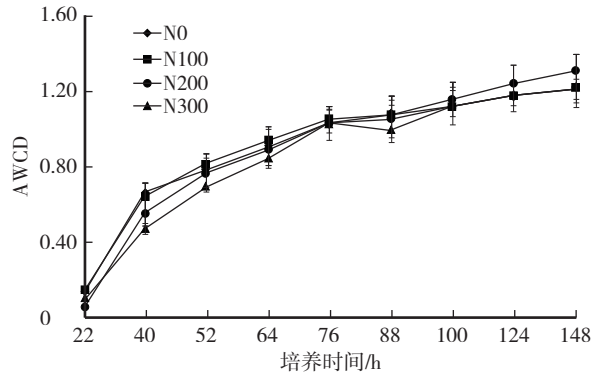


图4 施氮水平对水稻根际土壤微生物 AWCD 值的影响

Fig. 4 Effects of nitrogen application level on AWCD value of rice rhizosphere soil microorganism

取 Biolog-Eco 微平板培养 124 h 的数据,分析不同施氮水平间根际土壤微生物碳源代谢多样性指数的差异(表2),并对各处理间 31 种所试碳源代谢特征谱进行聚类分析(图5)。由表2可见,施氮水平对水稻根际土壤微生物碳源代谢多样性无显著影响。N200 处理的碳源代谢种类、Shannon 指数及均匀度均最高;N100 处理的 Shannon 指数及均匀度均最低;N300 处理的碳源代谢种类最少,Shannon 指数和均匀度低于 N200 处理,高于 N0 和 N100 处理。碳源代谢特征聚类分析结果显示:N200 处理的碳源代谢特征与其他施氮处理间差异较大,自成一支;N300 处理与 N0 处理间碳源代谢谱相似度较高。由此可见,N200 处理的根际土壤微生物的碳源代谢多样性高于 N100 和 N300 处理,养分较为均衡,更利于维护稻田土壤微生物种群的物种多样性。

表2 不同施氮水平下水稻根际微生物代谢多样性指数差异

Table 2 Metabolic diversities of rice rhizosphere soil microorganisms under different nitrogen application levels

处理	碳源利用种类	Shannon 指数	均匀度
N0	31 a	4.847 a	0.978 a
N100	31 a	4.838 a	0.976 a
N200	31 a	4.888 a	0.987 a
N300	30 a	4.851 a	0.989 a

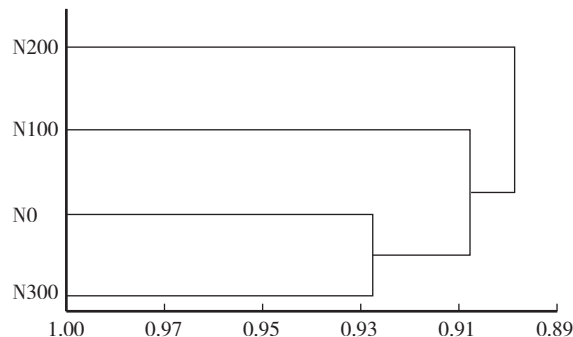


图5 基于 Biolog-Eco 系统的碳源代谢特征聚类

Fig. 5 Clustering of carbon source metabolism characteristics based on Biolog-Eco system

## 2.5 施氮水平与水稻根际土壤理化性状及微生态因子间的相关性分析

水稻产量、土壤有机质含量、碱解氮含量、细菌数量、放线菌数量及 AMF 侵染密度均与氮肥施用量呈不同程度的正相关,其中以细菌数量对氮肥施用量的响应最敏感( $r = 0.945$ ),其次为土壤有机质含量( $r = 0.939$ )和水稻产量( $r = 0.923$ );土壤 pH、有效 P 和速效 K 含量均与氮肥施用量呈显著负相关,其中 pH 对氮肥施用量的响应最敏感( $r = -0.984^*$ ),其次为有效 P( $r = -0.979^*$ )和速效 K( $r = -0.952^*$ )。

### 3 讨论

氮肥施用对水稻增产效果显著,但随施氮量的增加,氮肥的农学效率和偏生产力呈逐渐下降的趋势,地上部氮肥回收率在施氮量  $200 \text{ kg/hm}^2$  时达到峰值<sup>[3]</sup>。苏荣瑞等<sup>[23]</sup>在江汉平原单季稻上的研究显示: $210 \text{ kg/hm}^2$ 施氮量能保证水稻高产且温室气体排放量较低,可实现低碳高产的水稻生产。本研究显示:氮肥施用对水稻增产至关重要,施氮水平与水稻产量呈正相关( $r = 0.923$ ),在  $0-200 \text{ kg/hm}^2$  范围内,增施氮肥可显著促进水稻增产,但超过  $200 \text{ kg/hm}^2$  后,增产效应不再显著,与前人研究结果一致。土壤 pH 与施氮水平呈显著负相关, $r$  值为  $-0.984^*$ 。在 8 年定位研究期间,N300 处理的土壤 pH 较 N0 降低了 0.6,较 N100 处理降低了 0.4,较 N200 处理降低了 0.1,可见合理施用氮肥能在一定程度上减缓耕地土壤酸化进程。时亚南<sup>[24]</sup>对稻田土壤微生物的动态监测发现:微生物生物量碳和土壤总氮之间呈正相关,氮肥是影响微生物生物量碳的主导因素。本研究表明,氮肥施用可刺激水稻根际土壤可培养微生物增殖。在  $0-300 \text{ kg/hm}^2$  时,增施氮肥可促进水稻根际土壤细菌和放线菌种群增殖,施氮水平与细菌、放线菌数量均呈正相关, $r$  值分别为 0.945 和 0.820。但  $200 \text{ kg/hm}^2$  施氮量处理的水稻根际土壤细菌种群比例(B/T)最高、真菌种群比例(F/T)最低、放线菌和真菌比(A/F)与细菌和真菌比(B/F)均最高,碳源综合代谢能力最强,生物多样性更为丰富,对土壤微生物生态系统的平衡稳定更为有利。

AMF 是一类寄生在植物根系内的真菌,分布广泛,能够在土壤结构和肥力条件贫瘠的逆境下通过其侵染根系形成的庞大菌丝网络提高植物对土壤矿质养分的吸收<sup>[25]</sup>。有研究表明,在氮素含量受限的土壤中植物会较大比例地利用来自菌根的氮素<sup>[26]</sup>。张淑娟<sup>[27]</sup>研究表明:丛枝菌根的应用在保证水稻经济产量的基础上实现了稻田氮磷投入量和流失量的双重削减,具有显著的经济效益和环境效益。本研究表明:在施氮量  $0-300 \text{ kg/hm}^2$  时,AMF 侵染状况对施氮水平的响应无明显规律性,对氮磷钾三元素平衡施用的响应则较为明显。在氮磷钾养分配比不平衡时,AMF 的侵染性能提高,以帮助根系从土壤中吸取更多所需养分,成为作物应对逆境的一种调节功能,试验中低氮(N100)和高氮(N300)处理的 AMF 侵染频度、侵染密度和孢子数均高于 N200 处理。但养分失衡过于严重时则不利于 AMF 对水稻根系的侵染,如无氮肥(N0)处理的 AMF 侵染性能较弱,其 AMF 侵染密度(M)仅为 N300 处理的 44.4%,为 N100 处理的 50%,为 N200 处理的 57.1%。养分平衡度相对较高时,AMF 对水稻根系的侵染减弱,试验中氮磷钾三元素相对平衡的 N200 处理 AMF 侵染频度最低,孢子数最少,侵染密度也是施氮处理中的最低者。

### 4 结论

在上海地区稻-麦轮作模式下单季粳稻的种植过程中, $200 \text{ kg/hm}^2$  施氮量可以保障水稻‘沪早 61’的高产稳产,此时水稻根际土壤细菌种群比例(B/T)最高、真菌种群比例(F/T)最低、A/F 与 B/F 值均最高,碳源综合代谢能力最强,生物多样性更为丰富,对土壤微生物生态系统的平衡稳定更为有利;与  $300 \text{ kg/hm}^2$  施氮量处理相比,可减缓耕作土壤的酸化进程,利于耕地保育。即使氮肥稍微亏缺,土著 AMF 对水稻根系的侵染会增强,以帮助植株从土壤中转化和吸收养分。因此,从绿色可持续发展农业的角度出发,上海及长三角地区稻-麦轮作模式下单季粳稻‘沪早 61’的施氮量应以  $200 \text{ kg/hm}^2$  左右为宜。

### 参 考 文 献

- [1] 周晓阳,周世伟,徐明岗,等. 中国南方水稻土酸化演变特征及影响因素[J]. 中国农业科学,2015,48(23):4811-4817.
- [2] 吕仲贤,SYLVIA V,俞晓平,等. 氮肥对稻株含水量和伤流液的影响及其与对褐飞虱为害耐性的关系[J]. 中国水稻科学,2004,18(2):161-166.
- [3] 曹彦圣,付子轼,孙会峰,等. 施氮水平对水稻氮肥利用率和径流负荷的影响[J]. 土壤,2016,48(5):868-872.
- [4] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science,2010,327(5968):1008-1010.
- [5] LIU X J, ZHANG Y, HAN W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature,2013,494(7438):459-462.
- [6] 张淑彬,王幼珊,殷晓芳,等. 不同施磷水平下 AM 真菌发育及其对玉米氮磷吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(3):649-657.
- [7] VIERHEILIG H, COUGHLAN A P, WYSS U, et al. Ink and vinegar, a simple staining technique for arbuscular-mycorrhizal fungi[J]. Applied and Environmental Microbiology,1998,64(12):5004-5007.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2018.

- [ 9 ] SMITH S E, READ D J. Mycorrhizal Symbiosis[M]. 3rd edition. Cambridge, UK: Academic Press, 2010; 126-160.
- [ 10 ] BRUNDRETT M C, TEDERSOO L. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity[J]. *New Phytologist*, 2018, 220(4): 1108-1115.
- [ 11 ] BRAVO A, BRANDS M, WEWER V, et al. Arbuscular mycorrhiza-specific enzymes FatM and RAM2 fine-tune lipid biosynthesis to promote development of arbuscular mycorrhiza[J]. *New Phytologist*, 2017, 214(4): 1631-1645.
- [ 12 ] KEYMER A, PIMPRIKAR P, WEWER V, et al. Lipid transfer from plants to arbuscular mycorrhiza fungi[J]. *Elife*, 2017, 6: e29107.
- [ 13 ] BAO X Z, WANG Y T, OLSSON P A, et al. Arbuscular mycorrhiza under water: Carbon-phosphorus exchange between rice and arbuscular mycorrhizal fungi under different flooding regimes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 129: 169-177.
- [ 14 ] 王幼珊, 张淑彬, 张美庆. 中国丛枝菌根真菌资源与种质资源[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012; 165-170.
- [ 15 ] 刘润进, 李晓林. 丛枝菌根及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000; 90-194.
- [ 16 ] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006; 180-190.
- [ 17 ] 周德平, 褚长彬, 范洁群, 等. 不同种植年限设施芦笋土壤微生物群落结构与功能研究[J]. *土壤*, 2014, 46(6): 1076-1082.
- [ 18 ] ZHANG H F, LI G, SONG X L, et al. Changes in soil microbial functional diversity under different vegetation restoration patterns for Hulunbeier Sandy Land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 38-44.
- [ 19 ] WEI Y, YU L F, ZHANG J C, et al. Relationship between vegetation restoration and soil microbial characteristics in degraded karst regions: A case study[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(1): 132-138.
- [ 20 ] WIEHE W, HÖFLICH G. Survival of plant growth promoting rhizosphere bacteria in the rhizosphere of different crops and migration to non-inoculated plants under field conditions in north-east Germany[J]. *Microbiological Research*, 1995, 150(2): 201-206.
- [ 21 ] 马云华, 王秀峰, 魏珉, 等. 黄瓜连作土壤酚酸类物质积累对土壤微生物和酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 2149-2153.
- [ 22 ] 尚双华. 设施土壤氮素积累条件下番茄枯萎病发生的微生态机制研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016; 45-102.
- [ 23 ] 苏荣瑞, 刘凯文, 王斌, 等. 江汉平原施氮水平对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放及水稻产量的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2016, 18(5): 118-125.
- [ 24 ] 时亚南. 不同施肥处理对水稻土微生物生态特性的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [ 25 ] HIRUMA K, GERLACH N, SACRISTÁN S, et al. Root endophyte *Colletotrichum tofieldiae* confers plant fitness benefits that are phosphate status dependent[J]. *Cell*, 2016, 165(2): 464-474.
- [ 26 ] SCHMIDT S, STEWART G R.  $\delta^{15}\text{N}$  values of tropical savanna and monsoon forest species reflect root specialisations and soil nitrogen status[J]. *Oecologia*, 2003, 134(4): 569-577.
- [ 27 ] 张淑娟. 丛枝菌根-稻田生态系统对氮磷的削减功能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014; 45-100.

(责任编辑: 闫其涛)