

模拟氮沉降对水稻生长、产量 及光合特性的影响

廖迎春^{1,2}, 王辉民², 樊后保^{1*}, 沈芳芳¹, 郭虎波³, 袁颖红¹, 刘文飞¹, 杨风亭²

(1. 南昌工程学院 生态与环境科学研究所, 江西 南昌 330099; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室千烟洲生态站, 北京 100101; 3. 江西农业大学 园林与艺术学院, 江西 南昌 330045)

摘要: 田间试验研究 4 种水平的模拟氮沉降(即 N0、N1、N2、N3、N4, 施氮量分别为 0、3、6、12、24 g/(m²·a)) 对早稻品种“岳优 463”不同生长发育阶段的影响。结果表明, 氮沉降对水稻的生长、产量及光合作用有一定的促进作用。经高氮沉降(N4)处理, 水稻株高、光合速率在分蘖期分别比对照(N0)增加了 45.6% 和 49.5%, 在乳熟期比对照增加了 6.4% 和 28.9%。氮沉降对水稻叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素(a+b)含量均表现为促进作用。乳熟期 N1、N2、N3、N4 的叶绿素(a+b)比 N0 增加了 34.9%、51.5%、111.3% 和 143.6%。中高氮处理(N3、N4)对水稻产量的促进作用较为显著, N1、N2、N3、N4 的产量分别比 N0 增加了 1.3%、6.2%、13.0% 和 42.6%。随施氮水平的增加, 秕谷率也增加, 而产量指数和籽粒大小呈下降趋势。

关键词: 模拟氮沉降; 水稻; 生长; 产量

中图分类号: S511; Q948.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2012)01-0010-06

Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Growth, Yield and Photosynthesis of Rice (*Oryza sativa* L.)

LIAO Ying-chun^{1,2}, WANG Hui-ming², FAN Hou-bao^{1*}, SHEN Fang-fang¹,
GUO Hu-bo³, YUAN Ying-hong¹, LIU Wen-fei¹, YANG Feng-ting²

(1. Research Institute of Ecology & Environmental Sciences, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. Qianyanzhou Integrated Ecological Station of Red Soil Hilly Land, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: To study the impact of nitrogen deposition on rice, early rice YUE-YOU 463 seedlings were transplanted in April, 2009 on field conditions (hydromorphic paddy soil). The experiment started in April and lasted till July. Ammonium nitrate solutions were sprayed on the seedlings every 10 days at four doses during growing season. The simulated elevated N depositions were equivalent to N0 (0), N1 (3 g/(m²·a)), N2 (6 g/(m²·a)), N3 (12 g/(m²·a)) and N4 (24 g/(m²·a)) with three replicates for each treatments. The results indicated that N treatments enhanced growth, yield and photosynthesis. The height and the

收稿日期: 2011-07-01 修回日期: 2011-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30771714、30370259)、江西省教育厅青年科学基金项目(GJJ09614)和江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ08536)

作者简介: 廖迎春(1977—), 女, 讲师, 硕士, 主要从事植物生理研究, E-mail: liaoyingc@163.com; * 通讯作者: 樊后保, 教授, 博士, Email: hbfan@nit.edu.cn。

highest photosynthetic rate of N4 increased by 8.9% and 49.5% at tillering stage, 6.4% and 28.9% at milking stage. N additions increased Chl a, Chl b and Chl (a + b). At milking stage, Chl (a + b) in treatments N1, N2, N3, N4 increased by 34.9%, 51.5%, 111.3% and 143.6%, respectively. High N additions increased yield of rice. The yield of N1, N2, N3, N4 increased by 1.3%, 6.2%, 13.0% and 42.6%, respectively. N additions also increased the percentage of non-fully filled grains, decreased harvest index and grain sizes.

Key words: nitrogen deposition; rice; growth; yield

人类活动在全球范围内极大地改变着氮素从大气向陆地生态系统输入的方式和速率,人为固定的氮素正在不断积累,并对生态系统的结构和功能产生显著影响^[1]。随着化学肥料的使用^[2]、矿物燃料的燃烧^[3]和生物质的燃烧^[4]数量在欠发达地区的迅速增加,人类活动的氮来源与分布,已经扩展到全球范围内^[5]影响着氮循环和改变氮沉降速率^[6]。自 1860 年工业革命以来,全球范围的氮沉降已经由 1 Tg/a 增加到 2000 年的 25 Tg/a^[7]。目前,我国已成为继欧洲和北美之后世界第三大氮沉降区,许多地区存在高氮沉降现象。

在欧美的一些地区,氮沉降已造成许多陆地和水域生态系统氮饱和,给生态环境带来影响^[8]。研究发现植物从大气直接吸收的沉降氮($\text{NH}_x + \text{NO}_x$)的数量高达 $\text{N}(64 \pm 11) \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[9-10]。作为营养源与酸源,一定的氮沉降是补偿土壤氮损失的重要途径;但过量的氮沉降不仅降低植物生产力还将导致土壤氮饱和,增加 NO_3^- 淋失,产生土壤酸化和土壤水富营养化等问题^[11]。目前国内外针对氮沉降对森林生态系统影响的研究较多,对农作物影响的研究仍然缺乏。

我国是一个农业大国,水稻是我国第一大农作物,在我国南方红壤丘陵区广泛种植,是该区农田生态系统的主要组分。因此探明大气氮沉降对水稻生长、产量及光合特性的影响,对合理利用氮素资源(包括土壤、肥料和环境氮),减少氮肥的过量投入,农业生态系统的综合管理具有一定的理论和实践意义,对估计人类活动对农业生产带来的影响提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

选取当地广泛种植的早稻品种“岳优 463”为实验材料。研究地点位于江西省泰和县灌溪镇中国科学院千烟洲红壤丘陵综合开发试验站(115°14'13"E, 26°44'48"N),实验田土壤类型为潴育水稻土,母质为河流冲积物。

1.2 实验设计

为尽可能减少人为干扰,本研究采用大田实验,除了施加作为氮源的 NH_4NO_3 ,不施加其它任何肥料,按常规措施进行管理。水稻田在插秧之前进行充分犁田,利用田埂将实验田分隔为 15 个面积为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 实验小区,为防止各小区相互造成干扰,小区与小区之间留有间距为 3 m 的保护带。根据当地大气氮沉降量(只考虑湿沉降,约为 $30 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)以及当地水稻正常施氮量($15.0 \sim 22.5 \text{ g}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$)实验从低到高设置了 5 种氮处理水平,分别为 $\text{N0}(0)$ 、 $\text{N1}(3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}))$ 、 $\text{N2}(6 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}))$ 、 $\text{N3}(12 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}))$ 和 $\text{N4}(24 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}))$ (不包括大气沉降的氮量),每处理 3 次重复。2009 年 4 月,在水稻插秧期,将水稻秧苗插秧于实验田,行间距为 30 cm。水稻插秧后 10 d 开始进行氮处理,每 10 d 对水稻植株喷施 NH_4NO_3 溶液,施氮量根据当地 1982—2008 年平均年降水量在各月的分配来确定,经计算当地 1—12 月平均降水量分别为 56.1、101.5、150.9、224.3、253.0、282.0、122.4、103.3、75.2、57.5、54.5、40.5 mm。根据平均降水量计算出早稻整个生长季(4—7 月) N0 、 N1 、 N2 、 N3 和 N4 的总施氮量分别为 0、1.06、2.11、4.22 和 $8.44 \text{ g}/\text{m}^2$ 。

1.3 实验方法

生长指标测定:在水稻生长的返青期、分蘖期和乳熟期测量水稻株高。水稻插秧后每 10 d 观察 1 次分蘖数,每小区重复 6 次。

光合速率测定:在水稻生长的分蘖期和乳熟期,选择在晴朗无云或少云的天气,用 LI-6400 便携式光合作用测定仪测定光合响应曲线。使用 LI-6400(2 cm × 3 cm 叶室)和 LI-6400-02B 的 LED 光源

测定各处理水稻第一片叶或旗叶的净光合速率(P_n)对光合有效辐射通量密度($PPFD$)的响应,测定时尽量选择长势较好的成熟叶片。从 $2000 \sim 0 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 设置 11 个递减的光照强度,测定 $P_n - PAR$ 响应曲线。测定时温度控制在 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 相对湿度 $(70\% \pm 5\%)$, 大气 CO_2 浓度 $(400 \pm 10) \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。每个处理重复 3 次,均在每天 09:00 ~ 11:30 完成。

对于描述光合速率对光的依赖关系,在水稻生长的分蘖期和乳熟期可利用实测的不同氮处理水稻叶片净光合速率(P_n)对光合有效辐射通量密度($PPFD$)响应曲线(图 1)来表示。通过函数模型 $y = A + B \ln x$ (y 指 P_n , x 指 $PPFD$) 计算叶片的光补偿点 $PPFD = e - A/B$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); 由抛物线模型 $y = ax^2 + bx + c$ 求得光饱和点^[12]。

叶绿素含量测定:叶绿素是植物进行光合作用的主要色素。在水稻生长的分蘖期和乳熟期,选择在测定光合速率的同时,选取与测定光合速率相同位置和相同成熟度的叶片,用 80% 丙酮提取,在日本岛津 UV2401PC 型紫外分光光度计上读出 663 nm、645 nm 处提取液的光密度值,计算出叶绿素 a (chl a)、叶绿素 b (chl b)、总叶绿素含量 $\text{Chl} (a + b)$ 。每个处理重复 3 次,取平均值。计算公式如下:

$$\text{Chl a} = (12.7 \times D_{663} - 2.69 \times D_{645}) \times V/m \quad (1)$$

$$\text{Chl b} = (22.9 \times D_{645} - 4.68 \times D_{663}) \times V/m \quad (2)$$

$$\text{Chl} (a + b) = (20.2 \times D_{645} + 8.02 \times D_{663}) \times V/m \quad (3)$$

式中: Chl a ——叶绿素 a 含量 mg/kg ; Chl b ——叶绿素 b 含量 mg/kg ; $\text{Chl} (a + b)$ ——叶绿素总含量 mg/kg ; D_{645} ——在 645 nm 波长下,叶绿素提取液的光密度读数; D_{663} ——在 663 nm 波长下,叶绿素提取液的光密度读数; V ——提取液的总体积 ml ; m ——鲜样重 g 。

生物量及产量测定:水稻成熟后,每个实验小区收割水稻植株 10 株,晾干,测定水稻根、茎(包括叶、秆和籽粒)、穗、秕谷的干重以及千粒重、每穗穗粒重、每株有效穗数和穗长。

1.4 统计分析

采用 ANOVA 方法对数据进行分析,处理间的差异显著性利用 SPSS 软件来实现。

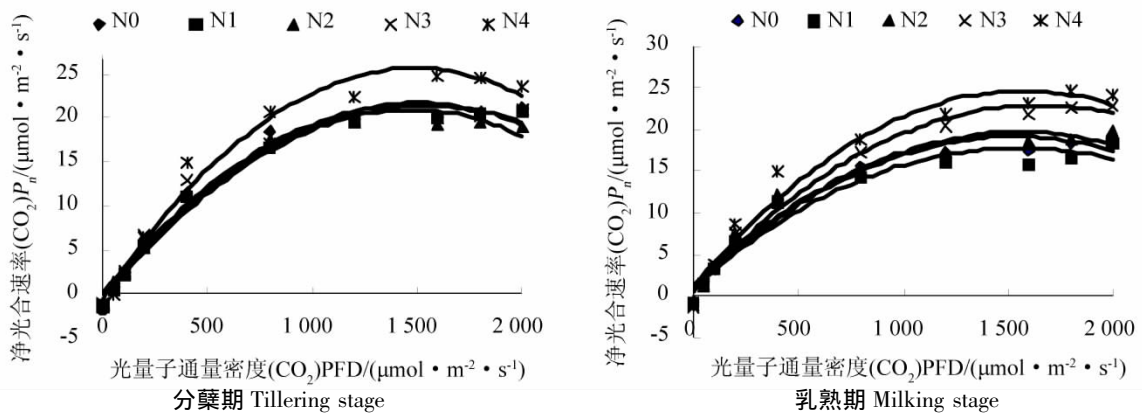


图 1 水稻叶片光响应曲线

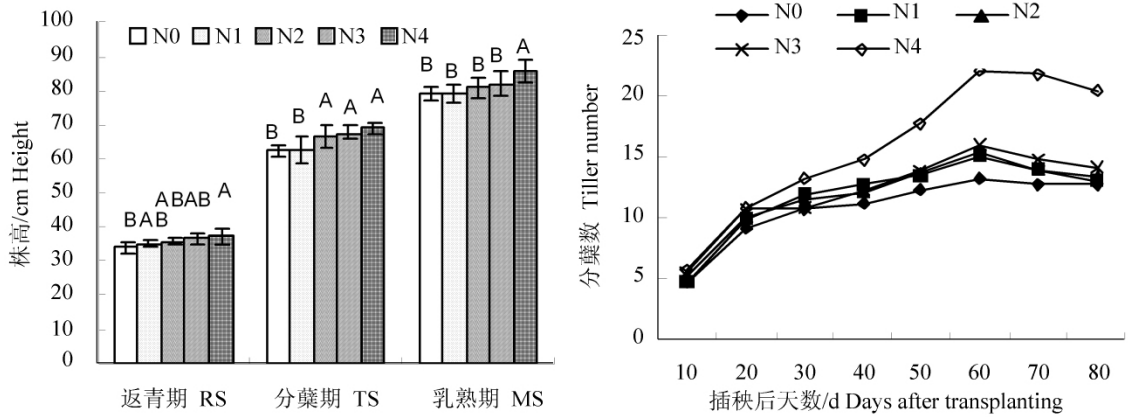
Fig. 1 Response curves of the rice leaves to different N loads

2 结果与分析

2.1 施氮对水稻株高和分蘖数的影响

由图 2 可知,施氮对水稻株高有促进作用。在水稻生长各时期,N1、N2、N3 和 N4 处理的株高分别比对照(N0)增加为:返青期(RS):2.8%、4.1%、6.8%和 8.9%;分蘖期(TS):0.1%、6.2%、8.2%和 10.6%;乳熟期(MS):0.3%、2.2%、3.5%和 8.7%。

水稻是一种分蘖性很强的作物,水稻的分蘖特性是影响水稻产量的一项重要生物学特性。施氮对水稻分蘖有促进作用(图 1),高氮处理(N4)表现更为显著。在水稻插秧后 60 d,各处理水稻分蘖数达到最多,N1、N2、N3 和 N4 的分蘖数分别比对照增加了 15.3%、17.3%、21.9%和 68.8%。



图中大写字母表示不同处理间在 $P=0.01$ 水平上差异显著。

Different capital letters indicate significant difference at 0.01 level.

图 2 施氮对水稻株高及分蘖数的影响

Fig.2 Effects of simulated nitrogen deposition on height and tiller number of rice paddies

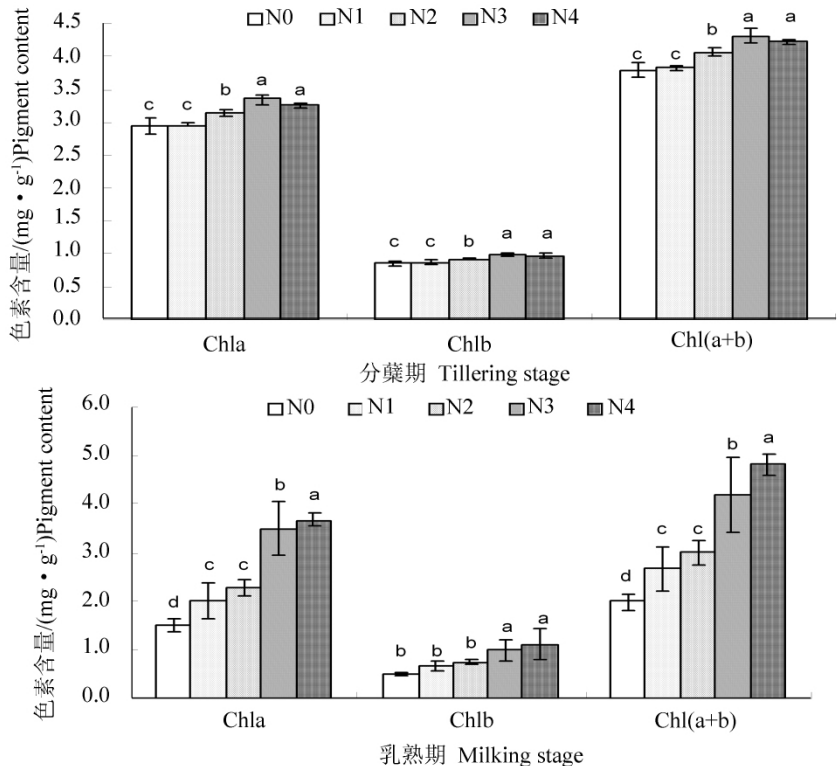
表 1 水稻叶片光响应曲线相关指标

Tab.1 Correlative parameters of light responses of Pn in rice paddies

处理 Treatments	分蘖期 Tillering stage			乳熟期 Milking stage		
	最大净光合速率 P_{max} $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	光补偿点 LCP $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	光饱和点 LSP $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	最大净光合速率 P_{max} $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	光补偿点 LCP $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	光饱和点 LSP $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
N0	20.2	15.7	1 430	18.37	14.8	1 494
N1	18.6	14.6	1 444	17.83	14.9	1 683
N2	19.8	14.4	1 575	19.92	16.4	1 626
N3	20.6	14.5	1 610	22.19	15.1	1 631
N4	30.2	14.3	1 740	23.67	14.9	1 505

2.2 施氮对水稻光合特性的影响

根据净光合速率 (P_n) 和光合有效辐射通量密度 (PPFD) 响应曲线拟合方程计算的分蘖期和乳熟期不同氮处理水稻叶片的最大光合速率, 光补偿点和光饱和点(表 1) 可以看出分蘖期 N1, N2, N3 和 N4 处理最大光合速率比 N0 增加了 -7.7%、-1.8%、2.0% 和 49.7%, 而在乳熟期增加了 -2.9%、8.4%、20.8% 和 28.9%。施氮对水稻叶片光补偿点和饱和点的影响在不同时期表现不一致, 在分蘖期, 各处理光补偿点随施氮量增加呈下降趋势, 高氮处理 (N4) 低于其他各处理, 而在乳熟期表现为先上升后下降趋势, 最大值为中氮处理 (N2)。光饱和点在分蘖期表现为随施氮量增加而升高,



小写字母表示不同处理间在 $P=0.05$ 水平上差异显著。

Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level.

图 3 氮沉降对水稻叶片叶绿素含量的影响

Fig.3 Effects of N loads on chlorophyll contents

最大值为 N4 处理 在乳熟期表现为中低氮处理(N1 ,N2 ,N3) > 高氮处理(N4) > 对照(N0)。

2.3 叶绿素含量

从水稻叶片在分蘖期和乳熟期叶片叶绿素含量变化情况(图 3) 可以看出 ,水稻叶片叶绿素含量在乳熟期高于分蘖期。分蘖期水稻叶片 Chl a、Chl b 和 Chl(a + b) 随施氮量增加表现为先增加后降低趋势 ,最大值均出现在 N3 和 N4 处理 ,显著高于其他各处理组($P < 0.05$)。乳熟期施氮对水稻叶片叶绿素含量的促进作用更为明显 ,N1、N2、N3 和 N4 处理叶绿素 a 的含量比 N0 增加了 35.2%、52.3%、111.4% 和 147.0% ; 叶绿素 b 的含量增加 33.9%、49.1%、111.0% 和 137.8% ; 叶绿素(a + b) 的含量增加 34.9%、51.5%、111.3% 和 143.6%。叶绿素 a/b 在各处理间差异不显著。

2.4 施氮对水稻生物量及产量的影响

从表 2 可知 随着施氮量的增加 ,水稻根、茎、穗粒、秕谷以及单株生物量均呈上升趋势 ,施氮量越高 ,上升趋势越显著($P < 0.05$,表 1) 。N1、N2、N3 和 N4 处理的单株生物量分别比 N0 升高了 0.3%、8.4%、15.5% 和 40.3%。根茎比随施氮量的增加也表现为上升趋势 ,最大值出现在 N2。由此可知 ,施氮能促进水稻的生物量及产量 ,并且对水稻根的促进作用大于对地上部分的促进作用。

施氮对穗长和单株有效穗数表现为促进作用 ,对水稻产量、产量指数、秕谷率、千粒重也有影响: N1、N2、N3 和 N4 处理的产量比 N0 增加 1.3%、6.2%、13.0% 和 42.6% ; 产量指数和千粒重随施氮量的增加表现为下降趋势 ,且中低氮处理(N1 ,N2) 和对照(N0) 高于中高氮处理(N3 ,N4) 。同时 ,施氮也会造成水稻秕谷率增加 ,N1、N2、N3 和 N4 的秕谷率分别比 N0 增加 0.8%、7.2%、26.7% 和 40.0%。

表 2 模拟氮沉降对水稻单株生物量及产量指标的影响

Tab.2 The average per – seedling biomass and yield under the treatments N0 – N4

	N0	N1	N2	N3	N4
根重 /g Root	8.4 + 1.0c	9.0 + 1.8bc	11.1 + 2.1ab	11.3 + 0.2ab	13.6 + 1.1a
茎重 /g Shoot	14.8 + 0.8c	14.7 + 0.6c	15.5 + 0.2bc	16.0 + 0.2b	17.9 + 0.3a
全株生物量 /g Whole plant weight	46.1 + 2.7c	46.2 + 3.3c	50.0 + 3.8bc	53.3 + 2.6b	64.7 + 3.8a
根茎比 Root/shoot ratio	0.22	0.24	0.29	0.27	0.27
单株穗粒重 /g Filled grain weight per panicle	22.3 + 1.1b	22.6 + 1.9b	23.7 + 1.3b	25.2 + 2.5b	31.8 + 3.4a
单株秕谷重 /g Blighted grain weight	0.56 + 0.04b	0.45 + 0.12b	0.57 + 0.07b	0.79 + 0.19b	1.32 + 0.46a
产量 / (kg · hm ⁻²) Yield	2 006.1 + 97.2b	2 032.7 + 173.7b	2 131.7 + 115.2b	2 267.1 + 228.6b	2 861.4 + 302.2a
产量指数 Harvest index	0.492 + 0.001	0.477 + 0.027	0.465 + 0.004	0.462 + 0.026	0.442 + 0.029
秕谷率 /% Thepercentage of non – fully filled grains	13.6 + 0.6b	13.7 + 1.4b	14.6 + 1.9b	17.2 + 1.4ab	19.0 + 2.2a
千粒重 /g 1000 – grain weight	26.5 + 0.5	26.1 + 0.4	25.7 + 1.0	25.4 + 0.5	24.7 + 0.3
穗长 /cm Panicle length	18.6 + 2.2	18.3 + 2.4	18.4 + 2.5	18.7 + 2.7	18.9 + 2.9
单株有效穗数 Effective panicle number	12.4 + 0.9c	12.8 + 0.8c	13.6 + 0.5bc	15.0 + 1.9b	18.6 + 0.9a

小写字母表示不同处理间在 $P = 0.05$ 水平上差异显著。

Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level.

3 讨 论

研究结果表明 在大田栽培条件下 经过一个生长季的处理 ,施氮对供试水稻品种生长、分蘖数、单株生物量、产量均表现为促进作用 ,且施氮量越高 ,促进作用越明显。同时 ,本研究发现 ,施氮在促进水稻生长和产量的同时 ,水稻产量指数降低 ,籽粒有减小的趋势 ,过高的施氮量会导致水稻秕谷率上升。

研究中 ,水稻叶片最大光合速率随施氮量增加而升高的趋势表明水稻在分蘖期和乳熟期 ,对氮的需求量较大 ,因此施氮能促进水稻的光合作用。这可能是氮增加引起了 Rubisco 浓度和活性以及叶绿素含量增加 ,从而导致光合速率增加^[13-15]。分蘖期光饱和点升高和光补偿点降低的变化趋势表明施氮能促进水稻叶片对强光及弱光的利用。光饱和点和光补偿点在乳熟期呈先上升后下降趋势 ,说明一定的施氮可以促进叶片对强光的利用而抑制对弱光的利用 ,而当施氮量过高时 ,对强光的利用反而会降低 ,对弱光的利用增加。这可能与过量的氮引起植物体内营养失衡 ,引发一系列不良生理生态反应有关^[14]。

氮沉降一定程度上会增加土壤有效氮水平 ,因而 ,氮沉降率的增加在短期之内会促进植物生产力^[13] ,尤其是植物生长受氮限制时 ,氮沉降对植物促进作用表现更为明显。但是当生态系统处于氮饱和

状态,也就是从大气干湿沉降输入生态系统的氮超出植物和微生物等的需求时,氮沉降就会减少生产力^[15]。

尽管本实验模拟氮沉降对水稻的生长和产量表现为促进作用,但大气氮沉降对植被和生态系统带来的影响却是不可忽视的。在模拟氮沉降实验中,人为施加氮肥只是短期行为,而大气中的氮沉降是长期存在的,对植物的影响也是长期的。大气中长期的氮沉降,不仅对植被有影响,还会导致河流中硝酸盐、铝以及氢的含量增加,使水质恶化;使土壤中阳离子及硝酸盐流失量增加,导致土壤肥力下降和土壤酸化^[16]。此外,氮沉降对植物影响的另一方面是过量活化氮沉降与工业废气中的 SO₂ 一起形成酸雨直接危害植物。

为进一步研究大气氮沉降对农业生态系统的影响,还应加强大气氮沉降对多种农作物影响的研究以及长期实验。研究在全球大气氮含量升高的背景下,是否应根据土壤的理化性质以及大气氮沉降来重新确定对农作物的合理施氮量,以使农作物达到增产的目的。

参考文献:

- [1] 吕超群,田汉勤,黄耀. 陆地生态系统氮沉降增加的生态效应[J]. 植物生态学报, 2007, 31(2): 205-218.
- [2] MATTHEWS E. Nitrogenous fertilizers: global distribution of consumption and associated emissions of nitrous oxide and ammonia[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1994, 8: 411-439.
- [3] GALLOWAY J N, LEVYLL H, Kasibhatla P. Year 2020: consequences of population growth and development on deposition of oxidized nitrogen[J]. Ambio, 1994, 23: 120-123.
- [4] CRUTZEN P J, ANDREAE M O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles[J]. Science, 1990, 250: 1669-1678.
- [5] GALLOWAY J N, COWLING E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change[J]. Ambio, 2002, 31: 64-71.
- [6] CURRIE W S, NADELHOFFER K. Dynamic redistribution of isotopically labeled cohorts of nitrogen inputs in two temperate forests[J]. Ecosystems, 1999, 2: 4-18.
- [7] SEFCIK L T, ZAK D R, ELLSWORTH D S. Seedling survival in a northern temperate forest understory is increased by elevated atmospheric carbon dioxide and atmospheric nitrogen deposition[J]. Global Change Biology, 2007, 13: 132-146.
- [8] VITOUSEK P M, ABER J D, HOWARTH R W, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences[J]. Ecological Applications, 1997, 7(3): 737-750.
- [9] MEHLERT S, SCHMIDT G, RUSSOW R. Measuring of the integral airborne nitrogen - input into a soil - plant system by the 15N - isotope dilution method[J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 1995, 31: 377-383.
- [10] BöhME F, RUSSOW R, NEUE H - U. Airborne nitrogen input at four locations in the German state of Saxony - Anhalt - Measurements using the 15N - Based ITNI system[J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2002, 38: 95-102.
- [11] ABER J D, GOODALE C L, OLLINGER S V, et al. Is nitrogen deposition altering the nitrogen status of northeastern forests[J]. Bioscience, 2003, 53: 375-378.
- [12] 黄丛林, 张大鹏. 葡萄叶片光合速率日间降低内外因调控的研究[J]. 园艺学报, 1996, 23(2): 128-132.
- [13] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 氮沉降对森林植物的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1891-1900.
- [14] NAKAJI T, FUKAMI M, DOKIYA Y, et al. Effects of high nitrogen load on growth, photosynthesis and nutrient status of *Cryptomeria japonica* and *Pinus densiflora* seedlings[J]. Trees, 2001, 15: 453-461.
- [15] NAKAJI T, TAKENAGA S, KUROHA M, et al. Photosynthetic response of *Pinus densiflora* seedlings to high nitrogen load[J]. Environmental Sciences, 2002, 9(4): 269-282.
- [16] ABER J D, MCDOWELL W, NADELHOFFER K J, et al. Nitrogen saturation in Northern forest ecosystems, hypotheses revisited[J]. Bioscience, 1998, 48: 921-934.