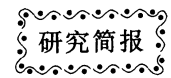


DOI: 10.3724/SP.J.1006.2009.00375



## 开花结实期水稻叶际气态氮化物交换的初步研究

徐胜光<sup>1,2</sup> 陈能场<sup>1,\*</sup> 吴启堂<sup>2</sup> 周建民<sup>1</sup> 刘小林<sup>3</sup> 毕德<sup>1</sup> 卢维盛<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 广东省生态环境与土壤研究所, 广东广州 510650; <sup>2</sup> 华南农业大学资源环境学院, 广东广州 510642; <sup>3</sup> 江西宜春学院, 江西宜春 336000

**摘要:** 在气候箱及温室试验基础上, 用密闭箱法研究了开花结实期水稻叶际各种氮化物(NH<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O、NO 和 NO<sub>2</sub>) 的交换及其规律。结果表明: (1)在气候箱控制、白昼有相对良好光照条件下, 开花结实期水稻未有显著净挥发 NH<sub>3</sub> 效应; (2)同一时期水稻叶际 NO 平均交换速率白天 15:00—18:00 为 -7.42 μg pot<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, 夜间 20:00—23:00 为 -4.012 μg pot<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, 且有、无水稻完整植株处理间培养箱中抽出气流的 NO 浓度差异显著( $P < 0.05$ ), 水稻表现有明显净吸收 NO 效应; 随着环境空气 NO 浓度升高, 水稻 NO 吸收作用明显增强; (3)水稻有净吸收空气 NO<sub>2</sub> 的明显效应, NO<sub>2</sub> 吸收速率相当于同时期白天和晚上水稻 NO 吸收速率的 5.6%和 3.9%; (4)在气候箱控制条件下, 白昼长时间适度光照(10 h, 165 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)有抑制水稻 N<sub>2</sub>O 挥发效应; 在温室自然光暗条件下, 19:00 一次日早 9:00 时段水稻平均 N<sub>2</sub>O 挥发速率为 5.04 μg pot<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, 有净挥发 N<sub>2</sub>O 现象, 但白昼长时间光照条件下水稻未有从空气吸收 N<sub>2</sub>O 的明显作用。从本试验结果看, 开花结实期水稻从空气中吸收的主要氮化物是 NO, 向空气释放的主要氮化物是 N<sub>2</sub>O。

**关键词:** 水稻; 叶际; 气体氮化物; 挥发; 吸收; 氮素损失

## Preliminary Study on the Exchange of Gaseous Nitrogenous Compounds in Phyllosphere of *Oryza sativa* L. at Flowering and Seed Setting Stages

XU Sheng-Guang<sup>1,2</sup>, CHEN Neng-Chang<sup>1,\*</sup>, WU Qi-Tang, ZHOU Jian-Min<sup>1</sup>, LIU Xiao-Lin<sup>3</sup>, BI De<sup>1</sup>, and LU Wei-Sheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Guangdong Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China; <sup>2</sup> College of Natural Resource and Environmental Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; <sup>3</sup> Yichun University, Yichun 336000, China

**Abstract:** The exchange of gaseous nitrogenous compounds (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, and NO<sub>2</sub>) in phyllosphere of rice (*Oryza sativa* L.) at the flowering and seed setting stages was measured conducted with growth chamber and greenhouse. The results showed as follows: (1) There was no significant emission of NH<sub>3</sub> from rice leaves under the favorable illumination in growth chamber during the daytime. (2) There was the obvious uptake of NO by rice leaves; the mean exchange rate of NO in rice phyllosphere was -7.42 μg pot<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> from 15:00 pm to 18:00 pm and -4.012 μg pot<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> from 20:00 to 23:00 at night. Further more, there was the significant difference of NO content in air flux deflated from chamber between the treatments with and without rice plant ( $P < 0.05$ ), showing the obvious net NO absorption of rice leaves from the ambient air. As a result, the mean exchange rate of NO was significantly increased accordingly with the increasing of NO content in ambient air. (3) NO<sub>2</sub> was also obviously uptaked by rice plant, and the net absorption rates of NO<sub>2</sub> in rice phyllosphere were only about 5.6 % of net NO uptake in the day and about 3.9% of net NO uptake at night, respectively. (4) N<sub>2</sub>O emission from leaves was inhibited evidently by long time of appropriate illumination (10 h, 165 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) in growth chamber with light density regulated or in greenhouse without regulated light during daytime, but, there was obvious N<sub>2</sub>O emission in rice phyllosphere under the weak light from 19:00 to 9:00 of next day without the control of light in greenhouse, with the mean exchange rate of 5.04 μg pot<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>. However, with long time of appropriate light illumination, the net N<sub>2</sub>O uptake was not occurred significantly in the course of N<sub>2</sub>O exchange between rice plant and ambient air. It can be seen from the experimental results that one NO was the main one uptaked by rice leaves from air, and N<sub>2</sub>O was the main one in gaseous nitrogenous compounds, released from leaves at the rice flowering and seed setting stages.

**Keywords:** *Oryza sativa* L.; Phyllosphere; Gaseous nitrogen compounds; Volatilization; Uptake; Nitrogen losses

本研究由国家自然科学基金项目(30571117), 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目, 江西省教育厅科技基金项目资助。

\* 通讯作者(Corresponding author): 陈能场, E-mail: ncchen@soil.gd.cn

第一作者联系方式: E-mail: sgxu@soil.gd.cn; Tel: 020-37242676, 13678930934

Received(收稿日期): 2008-01-18; Accepted(接受日期): 2008-09-05.

大量试验研究表明<sup>[1-8]</sup>, 气态氮化合物可从植物体挥发损失, 损失形态包括  $\text{NH}_3$ <sup>[3]</sup>、 $\text{N}_2\text{O}$ <sup>[9]</sup>、 $\text{NO}$ <sup>[10]</sup>、 $\text{NO}_2$ <sup>[11]</sup>和  $\text{N}_2$ <sup>[6]</sup>, 主要氮素损失发生在植物生育后期。但植物体亦可从空气吸收  $\text{NH}_3$ <sup>[12]</sup>、 $\text{N}_2\text{O}$ <sup>[13]</sup>、 $\text{NO}$ 和  $\text{NO}_2$ <sup>[14]</sup>, 且研究表明<sup>[15]</sup>植物冠层对  $\text{NH}_3$  吸收是不可忽略的交换过程。因此, 单纯研究植物气态氮化物挥发还难以正确评估植物氮素损失。迄今为止, 还少见报道植物叶际各种气态氮化物( $\text{NH}_3$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ )交换的研究, 开花结实期水稻叶际气态氮化物交换更是罕见报道。本研究旨在探讨开花结实期水稻叶际  $\text{NH}_3$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}$ 和  $\text{NO}_2$  交换作用及其机制, 为正确评估这一时期水稻叶片氮素损失提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料和仪器

水稻 (*Oryza sativa* L.) 品种粤航 8 号, 由华南农业大学提供。培养液用木村配方<sup>[16]</sup>, 其 N、P、K、Ca、Mg 浓度分别为 20、2.2、8.3、6.0 和 7.1  $\text{mg L}^{-1}$ 。试验用透明有机玻璃培养箱(30 cm × 30 cm × 100 cm)底座高 0.6 m (有凹槽), 罩高 0.4 m, 底座一侧距底面 5 cm 处有 2 个进气孔, 对应一侧距底面 50 cm 处有一采气孔, 离罩上顶面 5 cm 处有 1 出气孔。水培用 PVC 桶直径 20 cm, 容量 7.0 L, 用同内径泡沫板作定植板。主要仪器是 MGC-300H 型气候箱(上海一恒科技有限公司), U 型平板玻璃吸收器(广州梓兴化玻仪器公司), 5 mL 型真空采血管(广州医疗器械设备公司), 722S 型分光光度计(上海棱光技术有限公司), 42C 型  $\text{NO-NO}_2\text{-NO}_x$  分析仪(美国热电电子公司), HP-5890 型气相色谱仪(美国惠普公司)。

### 1.2 水稻试验用苗培养

2006 年 4 月 6 日用土培法育苗, 4 月 27 日移栽(每盆 3 株), 7 d 换一次营养液(6 L)。在本所温室培养, 至 7 月 17 日, 试验用苗实际苗龄 100 d, 高 1 m 以上, 水稻处于开花结实阶段。

### 1.3 水稻叶际 $\text{NO}$ 和 $\text{NO}_2$ 交换观测

于 2006 年 7 月 20 日至 28 日观测。设营养液空白(CK)、保留水稻根系(R, 去除离根系 5 cm 以上的茎叶)、完整水稻植株(T)等处理。7 月 19 日实施处理时, 重新更换各处理营养液, 并将水稻植株洗净, 吹干, 装箱后, 密封培养箱底座和罩结合部位后, 放入气候箱。气候箱内 25°C, 空气湿度 70%, 光、暗时间比 12 h/12 h, 光强 165  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。在培养箱进气孔保持通气条件下, 用  $\text{NO}_x$  分析仪通过出气孔自动抽气检测, 流量 0.638  $\text{L min}^{-1}$ , 5 s 检测一次并自动电脑保存测量值。每天在光(15:00—18:00)和暗(20:00—23:00)时段各观测 1 次, 每次在数据基本稳定下持续观测 30 min。

依据气流的  $\text{NO}_x$  浓度, 计算有、无水稻植株处理间的单位时间抽出气流的  $\text{NO}_x$  质量差值, 以此表征水稻叶际  $\text{NO}_x$  交换速率( $\mu\text{g pot}^{-1} \text{h}^{-1}$ ), 负数表示吸收, 正数表示释放。

### 1.4 水稻 $\text{NH}_3$ 挥发回收试验

试验处理和气候箱参数设置同 1.3, 但培养箱出气口先接有硼酸(20  $\text{g L}^{-1}$ )的 U 型平板玻璃吸收器, 使由进气孔导入、经水稻冠层抽出气流的氨被硼酸吸收。用水杨酸比色法测定硼酸  $\text{NH}_4^+$  浓度, 参照李生秀等<sup>[3]</sup>的方法控制流量, 1 d 更换 2 次吸收液。试验日期为 7 月 18 日、7 月 20 日、7 月 21 日和 7 月 24 日。

根据硼酸  $\text{NH}_4^+$  浓度和试验持续时间, 计算有、无水稻植株处理的回收  $\text{NH}_3$  速率差值, 并以此表征水稻叶际  $\text{NH}_3$  氨交换速率( $\mu\text{g pot}^{-1} \text{h}^{-1}$ ), 负数表示吸收, 正数表示挥发。

### 1.5 水稻 $\text{N}_2\text{O}$ 释放观测试验

1.5.1 气候箱试验 试验处理和气候箱参数设置同 1.3, 在有光下封箱 10 h 聚积  $\text{N}_2\text{O}$ (其余时间只密封培养箱底座和罩结合部位), 用注射器采气样注入真空采血管保存(每处理 3 个样), 用气相色谱法测  $\text{N}_2\text{O}$ 。实施时间为 7 月 15 日、16 日和 17 日。

依据封闭 10 h 后有、无水稻植株处理的培养箱空气  $\text{N}_2\text{O}$  浓度差和培养箱容积(扣除 6.0 L 营养液体积), 计算水稻挥发或吸收  $\text{N}_2\text{O}$  速率( $\mu\text{g pot}^{-1} \text{h}^{-1}$ ), 负数表示吸收, 正数表示释放。

1.5.2 温室培养箱试验 以 N1、N2 和 N3 表示 20、40、80  $\text{mg L}^{-1}$  的氮浓度, M1、M2 和 M3 表示硝态氮分别占铵态氮总量的 25%、50%和 75%, 搭配成 N1M1、N1M2、N1M3、N2M1、N2M2、N2M3、N3M1、N3M2 和 N3M3 等处理。各处理均植 3 株水稻苗, 在温室封箱 22 h(7 月 8 日 19:00 至 7 月 9 日 17:00)。期间, 于 7 月 9 日 9:00 和 17:00 分别采气样分析, 并以封箱前温室气样(CK) $\text{N}_2\text{O}$  为初始浓度, 计算封箱至 7 月 9 日 9:00 培养箱空气  $\text{N}_2\text{O}$  增减速率( $\mu\text{g pot}^{-1} \text{h}^{-1}$ ), 以此表征这一时段水稻叶际  $\text{N}_2\text{O}$  交换速率。9:00—17:00 时段则以 9:00 采气的  $\text{N}_2\text{O}$  为初始浓度, 计算水稻叶际  $\text{N}_2\text{O}$  的交换速率。

### 1.6 培养箱气密性检测方法

封箱前, 注水检测箱体密封性。封箱后, 培养箱出气孔通过胶管连接至水中, 水浴加热(40°C)使培养箱空气受热膨胀, 观察是否有气泡来判断密封性。

### 1.7 数据处理方法

经 Excel 软件整理数据、作图, 用 SPSS 进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 开花结实期水稻叶际 $\text{NO}$ 和 $\text{NO}_2$ 的交换作用

由图 1 可见, 多数日期从保留水稻根系(R)处理培养箱中抽出气流的  $\text{NO}$  浓度低于营养液空白(CK), 但处理间差异不显著, 而有完整水稻植株处理(T)培养箱中抽出气流的  $\text{NO}$  浓度较 CK 处理显著下降( $P < 0.05$ )。这说明, 根系对液气界面  $\text{NO}$  交换影响小( $P > 0.05$ ), T 处理气流  $\text{NO}$  浓度显著下降主要是由于水稻冠层吸收空气  $\text{NO}$  的结果。

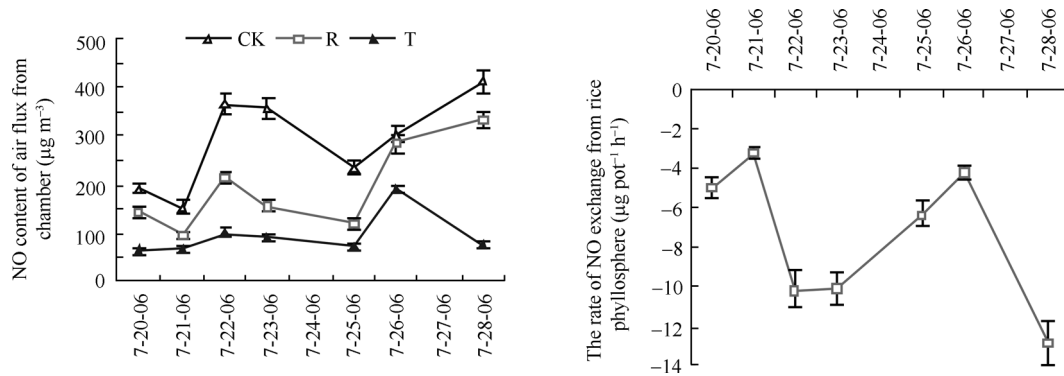


图 1 从不同处理培养箱抽出气流的 NO 浓度(左)和水稻叶际 NO 的交换速率(右)(测定时间:15:00—18:00)

Fig. 1 NO content of the air flows through the chambers in different treatments (left) and the NO exchange rate in rice phyllosphere (right)

CK: 营养液空白; R: 营养液中保留水稻根系处理; T: 营养液中完整水稻植株处理。

CK: only nutrient solution; R: reserve only rice roots in nutrient solution; T: the whole plant of rice in nutrient solution. (Determining time: 15:00—18:00)

在空气 NO 浓度波动条件下, T 处理培养箱抽出气流的 NO 浓度波动最小(图 1), 说明环境空气 NO 浓度相对较高时段, 水稻 NO 吸收效应会相应增强。白昼 15:00—18:00 水稻 NO 净吸收速率  $7.42 \mu\text{g pot}^{-1} \text{h}^{-1}$ , 高于夜间 20:00—23:00 时段( $4.012 \mu\text{g pot}^{-1} \text{h}^{-1}$ ), 白昼光有促进水稻 NO 吸收的明显作用。同步试验表明(图 2), 水稻叶际  $\text{NO}_2$

平均交换速率  $-0.404 \mu\text{g pot}^{-1} \text{h}^{-1}$ , 白昼、夜间水稻平均  $\text{NO}_2$  吸收速率为同时间水稻 NO 吸收速率的 5.6%和 3.9%, 水稻吸收  $\text{NO}_2$  作用相对较弱。

2.2 开花结实期水稻叶际  $\text{NH}_3$  交换作用

试验发现(表 1), T 和 CK 处理间  $\text{NH}_3$  平均回收速率差异不显著( $P>0.05$ ), 显示本试验气候箱良好光控条件下,

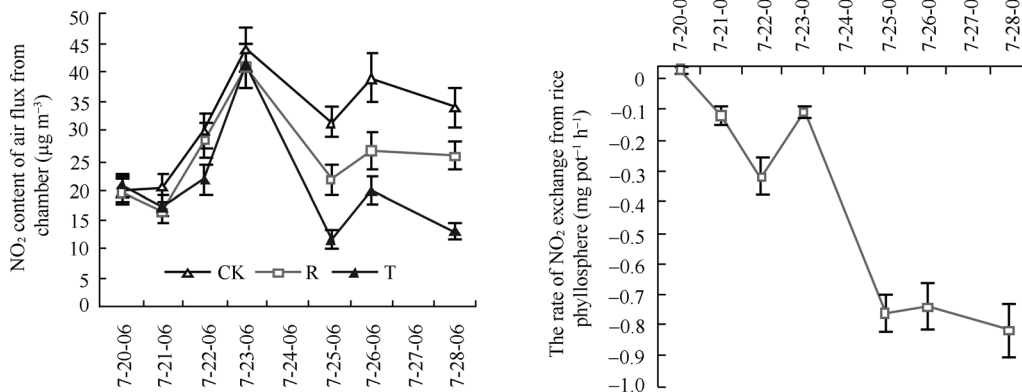


图 2 从不同处理培养箱中抽出气流的  $\text{NO}_2$  浓度(左)和水稻叶际  $\text{NO}_2$  的交换速率(右)(测定时间: 15:00—18:00)

Fig. 2  $\text{NO}_2$  content of the air flow through the chamber in different treatments (left) and the  $\text{NO}_2$  exchange rate (right) of rice phyllosphere (Determining time: 15:00—18:00)

CK: 营养液空白; R: 营养液中保留水稻根系处理; T: 营养液中完整水稻植株处理。

CK: only nutrient solution; R: reserve only rice roots in nutrient solution; T: the whole plant of rice in nutrient solution.

表 1 不同处理回收  $\text{NH}_3$  速率以及水稻根系、叶际  $\text{NH}_3$  交换速率的日变化

Table 1 The diurnal variation of the recovery rate of  $\text{NH}_3$  in different treatments and the  $\text{NH}_3$  exchange rate from rice root system and phyllosphere

处理 Treatment	$\text{NH}_3$ 回收速率 The recovery rate of $\text{NH}_3$ ( $\mu\text{g pot}^{-1} \text{h}^{-1}$ )					$\text{NH}_3$ 交换速率 $\text{NH}_3$ exchange rate ( $\mu\text{g pot}^{-1} \text{h}^{-1}$ )				
	06-7-18 †	06-7-20	06-7-21	06-7-24	平均 Average	06-7-18 †	06-7-20	06-7-21	06-7-24	平均 Average
CK	0.51±0.06	0.64±0.08	1.13±0.15	0.623±0.12	0.73±0.14 B					
R	4.20±0.21	5.74±0.32	2.59±0.22	4.666±0.56	4.30±0.65 A	3.69±0.44	5.10±0.58	1.47±0.21	4.04±0.44	3.58±0.76 a
T	0.19±0.04	0.63±0.06	1.08±0.31	2.718±0.48	1.16±0.55 B	-0.3±0.06	-0.01±0.01	-0.05±0.02	2.10±0.32	0.43±0.56 b

同一列中标明数据不同字母的数值表示差异达显著水平。CK: 营养液空白; R: 营养液中保留水稻根系处理; T: 营养液中完整水稻植株处理。† 试验时间: 年-月-日。

Values followed by a different capital and small letter within a column are significantly different at 0.01 and 0.05 probability levels. CK: only nutrient solution; R: reserve only rice roots in nutrient solution; T: the whole plant of rice in nutrient solution. † Date of experiment: year-month-day.

水稻未有 NH<sub>3</sub> 的明显净挥发。但 R 处理平均 NH<sub>3</sub> 回收速率要明显高于营养液空白(P<0.01), 不排除部分 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>经根系输送至水稻残茎部位后, 因难以同化而有部分以 NH<sub>3</sub> 形态挥发损失。水稻根系输送至叶片的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, 可通过氮同化途径固定; 良好光照(12 h d<sup>-1</sup>, 165 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) 对促进氮同化也会有一定效果, 表现在 4 d 的 NH<sub>3</sub> 回收试验中, 有 3 d 净吸收效应较明显, 平均 NH<sub>3</sub> 吸收速率 0.12 μg pot<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>。显然, 气候箱良好光控条件是这一时期水稻还从空气中吸收 NH<sub>3</sub> 的重要原因之一。

2.3 开花结实期水稻叶际 N<sub>2</sub>O 交换的初步研究

2.3.1 气候箱试验 试验发现(表 2), 白昼连续 10 h 光照后, CK、T、R 处理间培养箱空气 N<sub>2</sub>O 浓度差异不显著, 水稻未有明显的 N<sub>2</sub>O 净挥发, 说明气候箱控光条件下的白昼良好光照有效抑制了水稻 N<sub>2</sub>O 挥发。这是因为植物光反应提供了光合氮代谢所需的碳源和还原力(ATP、NADH、FAD), 故适度光照对氮同化的促进作用有反馈抑制水稻 N<sub>2</sub>O 挥发的作用。但在白昼连续 10 h 光照条件下 T 处理培养箱空气 N<sub>2</sub>O 浓度未显著下降, 说明白昼光对促

进水稻 N<sub>2</sub>O 吸收作用并不明显。

2.3.2 温室培养箱试验 尽管 9 盆水稻的供氮浓度和形态配比不同(N1M1、N1M2、N1M3、N2M1、N2M2、N2M3、N3M1、N3M2 和 N3M3), 但各处理 7 月 8 日 19:00 至 9 日 9:00 封箱时段采样的 N<sub>2</sub>O 浓度明显高于封箱持续至 17:00 采气样的 N<sub>2</sub>O 浓度(图 3, P<0.01), 这一时段水稻 N<sub>2</sub>O 平均交换速率为 5.04 μg pot<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, N<sub>2</sub>O 净挥发明显; 9:00—17:00 时段水稻平均 N<sub>2</sub>O 交换速率-10.63 μg pot<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, 不排除期间水稻吸收空气 N<sub>2</sub>O 可能。N<sub>2</sub>O 相对稳定, 培养箱空气 N<sub>2</sub>O 浓度变化如此之大, 应归结为水稻叶片的作用而不是根系。显然, 在弱光和无光时(L0 表示, 7 月 8 日 19:00 至 9 日 9:00, 图 3)水稻明显挥发 N<sub>2</sub>O。在白昼光照(L 表示, 7 月 9 日 9:00—17:00)时段培养箱空气 N<sub>2</sub>O 浓度显著下降, 这是在之前培养箱空气 N<sub>2</sub>O 浓度显著上升的特殊条件下出现的(图 3), 并不意味着一般情况下白昼光促进水稻 N<sub>2</sub>O 吸收。实际在气候箱光控 10 h 光照条件下, 白昼光对促进水稻 N<sub>2</sub>O 吸收作用并不明显。

表 2 不同处理培养箱空气 N<sub>2</sub>O 浓度及水稻根系、叶际 N<sub>2</sub>O 交换速率的日变化(光照时间为 10 h)  
Table 2 The diurnal variation of N<sub>2</sub>O content in chamber and N<sub>2</sub>O exchange rate in different treatments (illuminating time: 10 h)

处理 Treatment	培养箱空气的 N <sub>2</sub> O 浓度 N <sub>2</sub> O content in chambers (μg m <sup>-3</sup> )				N <sub>2</sub> O 交换速率 N <sub>2</sub> O exchange rate (μg pot <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )			
	2006-7-15 †	2006-7-16	2006-7-17	平均 Average	2006-7-15 †	2006-7-16	2006-7-17	平均 Average
CK	737.8±52.1	871.9±75.3	595.2±62.6	734.9±79.8 a				
R	795.2±38.5	581.7±44.6	591.8±37.5	656.3±69.5 a	0.46±0.06	-2.32±0.13	-0.03±0.01	-0.63±0.06 a
T	813.7±66.0	821.7±80.9	863.7±75.2	832.9±15.5a	0.61±0.05	-0.40±0.06	2.15±0.15	0.79±0.05 a

同一列中标明数据不同字母的数值表示差异达显著水平。CK: 营养液空白; R: 营养液中保留水稻根系处理; T: 营养液中完整水稻植株处理。† 试验时间: 年-月-日。

Values followed by a different capital and small letter within a column are significantly different at 0.01 and 0.05 probability levels. CK: only nutrient solution; R: reserve only rice roots in nutrient solution; T: the whole plant of rice in nutrient solution. † Date of experiment: Year-Month-Day.

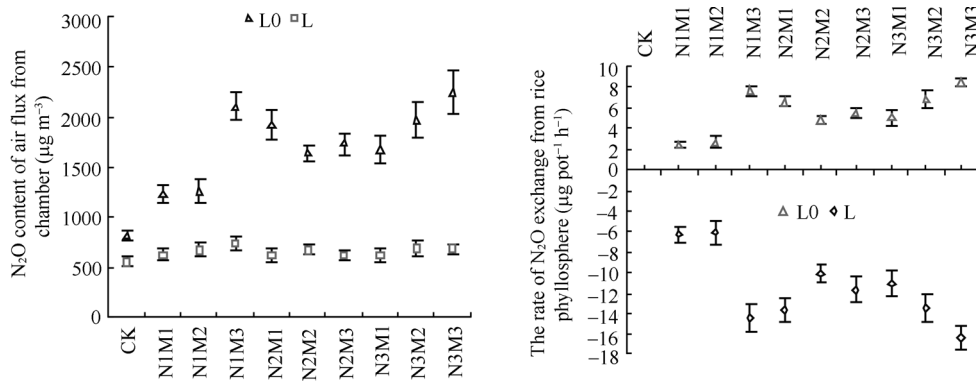


图 3 光暗对不同处理培养箱空气的 N<sub>2</sub>O 浓度(左)和水稻叶际 N<sub>2</sub>O 交换速率(右)的影响  
Fig. 3 Effect of light and dark on N<sub>2</sub>O content of the air in chambers in different treatments (left) and the N<sub>2</sub>O exchange rate (right) in rice phyllosphere

封箱时间: 2006-7-8, 19:00—2006-7-9, 17:00; 采样时间: 光照时段(L)为 2006-7-9, 17:00; 弱光和无光时段(L0)为 2006-7-9, 9:00;

N1、N2 和 N3 分别代表 20、40、80 mg L<sup>-1</sup> 的氮浓度, M1、M2 和 M3 表示硝态氮分别占硝、铵态氮总量的 25%、50%和 75%。

Chamber closed time: 2006-7-8 19:00—2006-7-9 17:00; Sampling time: illuminating time (L), 2006-7-9, 17:00; Poor light and dark time (L0), 2006-7-9, 9:00. N concentration of N1, N2, and N3 was 20, 40, and 80 mg L<sup>-1</sup>, respectively, and the percentage of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in M1, M2, and M3 was 25%, 50%, and 75% of total N in solution contained NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, respectively.

### 3 讨论

#### 3.1 开花结实期水稻叶际 $\text{NH}_3$ 的交换作用

植物与环境空气间存在着明显的  $\text{NH}_3$  交换作用, 表现为植物对  $\text{NH}_3$  净挥发<sup>[17,19-21]</sup>或净吸收  $\text{NH}_3$ <sup>[12]</sup>, 关键取决于植物  $\text{NH}_3$  补偿点<sup>[15]</sup>。在植物生育后期, 随着氮同化能力显著下降,  $\text{NH}_3$  补偿点成倍增加<sup>[22]</sup>,  $\text{NH}_3$  挥发效应显著。水稻开花结实期不属于生育后期阶段, 氮同化能力仍相对较强, 这与这一时期水稻未有  $\text{NH}_3$  显著净挥发有关。此外,  $\text{NH}_4^+$  同化需要碳源和能量, 故适度光反应对促进植物吸收空气  $\text{NH}_3$  有明显效果<sup>[23]</sup>。在本试验严密光控下, 白昼相对良好的光照对促进氮同化、抑制水稻氨挥发也应有了一定效果。水稻生育后期  $\text{NH}_3$  挥发效应显著(另文发表), 这和国内外相关研究结果基本一致。

#### 3.2 开花结实期水稻叶际 $\text{NO}$ 和 $\text{NO}_2$ 的交换作用

植物通过硝酸还原酶(NR)催化还原  $\text{NO}_2^-$  内源形成  $\text{NO}$  的途径, 已在完整植株<sup>[11]</sup>、叶片<sup>[24]</sup>和根<sup>[18]</sup>中广泛被观察到, 但 NR 催化亚硝酸盐单电子还原形成  $\text{NO}$  的能力相对较弱<sup>[25]</sup>,  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) 能否从叶片挥发一直存在争议<sup>[26]</sup>。研究发现<sup>[27]</sup>, 植物也有  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) 补偿点(compensation point), 而迄今为止, 仅在环境空气  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) 浓度极低( $\text{NO}$ ,  $<1.34 \mu\text{g m}^{-3}$ ;  $\text{NO}_2$ ,  $<2.05 \mu\text{g m}^{-3}$ ) 情况下观测到部分植物有  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) 净挥发<sup>[10,11,14]</sup>。试验表明开花结实期水稻有净吸收  $\text{NO}_x$  的作用, 且水稻  $\text{NO}$  吸收因环境空气  $\text{NO}$  浓度升高而增强, 暗示环境空气  $\text{NO}_x$  分压高于水稻  $\text{NO}_x$  补偿点, 确实是水稻吸收  $\text{NO}_x$  的主要原因。此外, 气候箱控制下白昼良好光照对氮同化的促进作用, 对促进水稻  $\text{NO}_x$  吸收也应有一定效果。

#### 3.3 开花结实期水稻叶际 $\text{N}_2\text{O}$ 的交换作用

植物  $\text{N}_2\text{O}$  释放已有较多文献报道<sup>[8-9,13,28]</sup>。根据 David 等<sup>[28]</sup>的  $^{15}\text{N}$  标记试验, 亚硝酸还原酶(NiR)异化还原  $\text{NO}_2^-$ -N 是植物体内源形成  $\text{N}_2\text{O}$  的主要机制, 有少量溶在水中的  $\text{N}_2\text{O}$  也可通过蒸腾输送机制挥发<sup>[29]</sup>。C、N 不平衡是植物  $\text{N}_2\text{O}$  挥发的主要原因<sup>[13]</sup>, 用光合抑制剂溴苯腈(Bromoxynil)喷洒大豆(*Glycine max* L.)幼苗,  $\text{N}_2\text{O}$  排放显著增长<sup>[30]</sup>。显然, 适当光照有促进氮同化、抑制  $\text{N}_2\text{O}$  挥发作用。从本试验结果看, 白昼良好光照(10 h)时段水稻未有明显挥发  $\text{N}_2\text{O}$  显著效应, 温室弱光和无光时段水稻有明显的  $\text{N}_2\text{O}$  净挥发, 该结果支持了光调控植物  $\text{N}_2\text{O}$  挥发<sup>[13]</sup>的观点。但在白昼长时间光照下水稻未有净吸收  $\text{N}_2\text{O}$  的显著效应, 显示适度光照不一定必然导致水稻从空气中净吸收  $\text{N}_2\text{O}$ , 这有待进一步研究证实。

### References

- [1] Li Z-R (李宗让), Li S-X (李生秀). Nitrogen loss from plants by volatilization: Ammonia loss from soybean during its growth. *J Northwest Sci-Tech Univ Agric For* (西北农林科技大学学报), 1992, 20(suppl): 12-17 (in Chinese with English abstract)
- [2] Li S-X (李生秀). Nitrogen loss from plants by volatilization: I. Nitrogen loss from aboveground parts of wheat during later period of growth. *J Northwest Sci-Tech Univ Agric For* (西北农林科技大学学报), 1992, 20(suppl): 1-6 (in Chinese with English abstract)
- [3] Li S-X (李生秀), Li Z-R (李宗让), Tian Y-H (田霄鸿), Wang C-H (王朝辉). Nitrogen loss from above-ground plants by volatilization. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 1995, 1(2): 19-25 (in Chinese with English abstract)
- [4] Francis D D, Schepers J S, Vigil M F. Post-anthesis nitrogen loss from corn. *Agron J*, 1993, 85: 659-663
- [5] Wetsellar R, Farquhar G D. Losses of nitrogen from the tops of plant. *Adv Agron*, 1980, 33: 263-302
- [6] Chen N C, Inanaga S. Nitrogen losses in relation to rice varieties, growth stages, and nitrogen forms determined with the  $^{15}\text{N}$  Technique. In: Hatch D J, Chadwick D R, Jarvis S C, Roked J S. Controlling Nitrogen Flows and Losses. New Haven: Wageningen Academic Publishers, 2004. pp 496-497
- [7] Farquhar G D, Wetselaar R, Firth P M. Ammonia volatilization from senescing leaves of maize. *Science*, 1979, 203: 1257-1258
- [8] Li Y-Y (李玥莹), Chen G-X (陈冠雄), Xu H (徐慧), Zhang Y (张颖), Zhang X-D (张旭东). The contribution of maize and soybean to  $\text{N}_2\text{O}$  emission from the soil. *Environ Sci* (环境科学), 2003, 24(6): 38-42 (in Chinese with English abstract)
- [9] Chen G-X (陈冠雄), Shang S-H (商曙辉), Yu K-W (于克伟), Yu A-D (禹阿东), Wu J (吴杰), Wang Y-J (王玉杰). Investigation on the emission of nitrous oxide by plant. *J Chin Appl Ecol* (应用生态学报), 1990, 1(1): 94-96 (in Chinese with English abstract)
- [10] Rockel P, Rockel A, Wildt J, Segschneider H J. Nitric oxide ( $\text{NO}$ ) emission by higher plants. In: Van Cleemput O, Hofmann G, Vermoesen A. Progress in Nitrogen Cycling Studies. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996. pp 603-606
- [11] Dean J V, Harper J E. Nitric oxide and nitrous oxide production by soybean and winged bean during in vivo nitrate reductase assay. *Plant Physiol*, 1986, 82: 718-723
- [12] Sommer S G, Jensen E S, Schjoerring J K. Leaf absorption of atmospheric ammonia emitted from pig slurry applied beneath the canopy of winter wheat. *Acta Agric Sect B Soil Plant Sci*, 1993, 43: 21-24
- [13] Chen G-X (陈冠雄), Xu H (徐慧), Zhang Y (张颖), Zhang X-J (张秀君), Li Y-Y (李玥莹), Yu K-W (于克伟), Zhang X-D (张旭东). Plant: A potential source of the atmospheric  $\text{N}_2\text{O}$ . *Quaternary Sci* (第四纪研究), 2003, 23(5): 504-511 (in Chinese with English abstract)
- [14] Daniel P, Hereid K. Nitrogen oxide fluxes between corn (*Zea mays* L.) leaves and the atmosphere. *Atmos Environ*, 2001, 35: 975-983
- [15] Li S-Q (李世清), Zhao L (赵琳), Shao M-A (邵明安), Zhang X-C (张兴昌), Shang-Guan Z-P (上官周平). Ammonia exchange between plant canopy and the atmosphere - a review. *J Northwest Acta Bot Sin* (西北植物学报), 2004, 24(11): 2154-2162 (in Chinese with English abstract)
- [16] Shanghai Institute of Plant Physiology and Ecology of Chinese Academy Science (上海植物生理学会). Plant Physiology Experiment Guide (植物生理学实验手册). Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1985. pp 526-533 (in Chinese)
- [17] Weiland R T, Omholt T E. Method for monitoring nitrogen gas exchange from plant foliage. *Crop Sci*, 1985, 32: 443-451
- [18] Harper J E. Evolution of nitrogen oxide(s) during in vivo nitrate re-

- ductase assay of soybean leaves. *Plant Physiol*, 1981, 68: 1488–1493
- [19] Hooker M L, Sander D H, Peterson G A, Daigger L A. Gaseous N losses from winter wheat. *Agron J*, 1980, 72: 789–792
- [20] Harper L A, Sharpe R R, Langdale G W, Giddens J E. Nitrogen cycling in a wheat crop: soil, plant, and aerial nitrogen transport. *Agron J*, 1987, 79: 965–973
- [21] Stutte C A, Da Silva R R F. Nitrogen volatilization from rice leave: I. Effects of genotype and air temperature. *Crop Sci*, 1980, 21: 596–600
- [22] Husted S, Mattson M, Schjoerring J K. Ammonia compensation points in two cultivars of *Hordeum vulgare* L. during vegetative and generative growth. *Plant Cell Environ*, 1996, 19: 1299–1306
- [23] Husted S, Schjoerring J K. Ammonia flux between oilseed-rape plant and the atmosphere in response to leaf temperature, light intensity, and air humidity. *Plant Physiol*, 1996, 112: 67–74
- [24] Klepper L A. Nitric oxide emissions from soybean leaves during in vivo nitrate reductase assays. *Plant Physiol*, 1987, 85: 96–99
- [25] Yamasaki H, Sakihama Y, Takahashi S. An alternative pathway for nitric oxide production in plants: New features of an old enzyme. *Trends Plant Sci*, 1999, 4: 128–129
- [26] Rockel P, Strube F, Rockel A, Wildt J, Kaiser W M. Regulation of nitric oxide (NO) production by plant nitrate reductase in vivo and in vitro. *J Exp Bot*, 2002, 53: 103–110
- [27] Teklemariam T A, Sparks J P. Leaf fluxes of NO and NO<sub>2</sub> in four herbaceous plant species: The role of ascorbic acid. *Atmos Environ*, 2006, 40: 2235–2244
- [28] Smart D R, Bloom A J. Wheat leaves emit nitrous oxide during nitrate assimilation. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2001, 98: 7875–7878
- [29] Chen X, Boeckx P, Shen S, Van Cleemput O. Emission of N<sub>2</sub>O from rye grass (*Lolium perenne* L.). *Biol Fert Soils*, 1999, 28: 393–396
- [30] Zhang L F, Boeckx P, Chen G X, Van Cleemput O. Nitrous oxide emission from herbicide-treated soybean. *Biol Fert Soils*, 2000, 32: 173–176