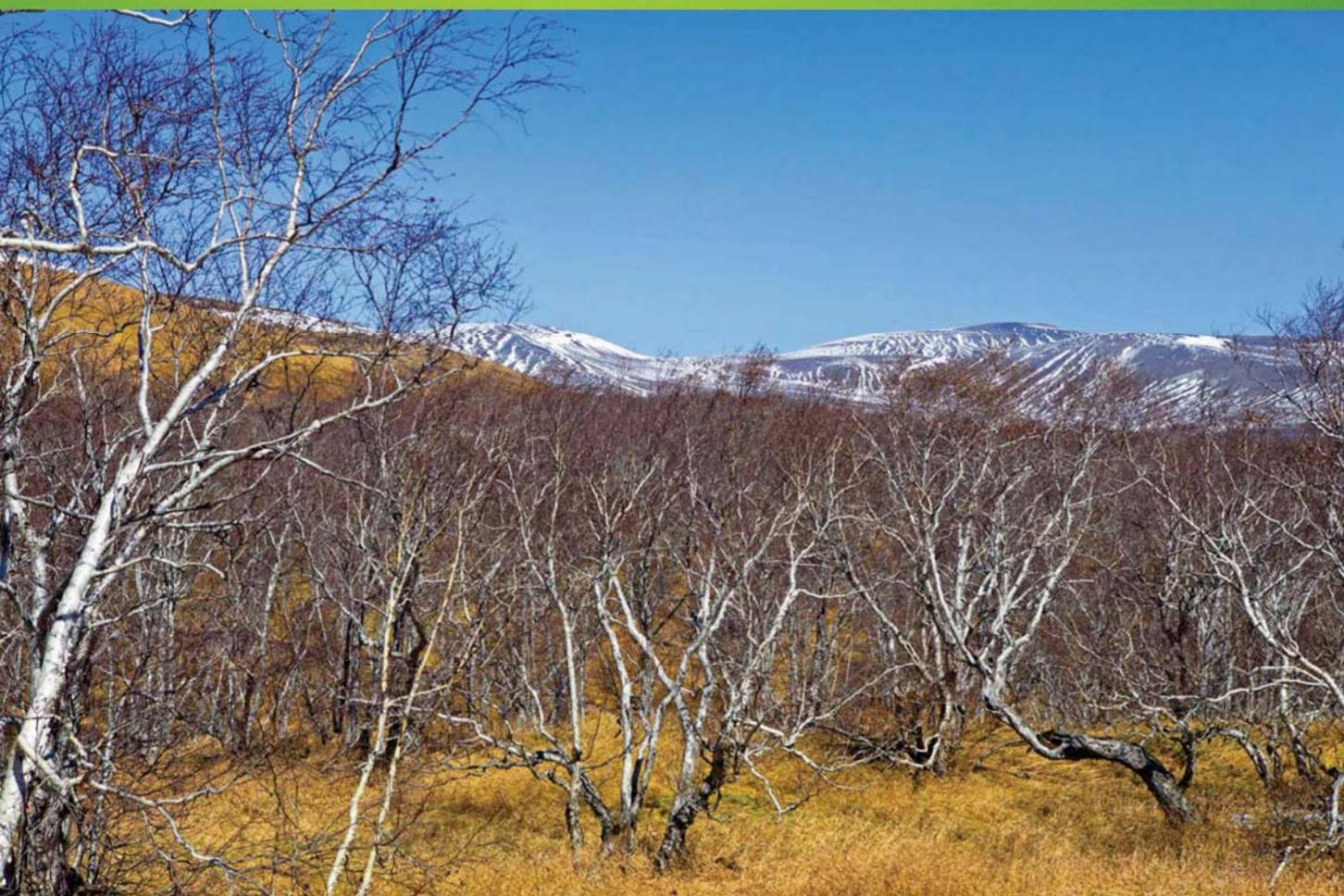


ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第33卷 第12期 Vol.33 No.12 **2013**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第33卷第12期 2013年6月 (半月刊)

## 目次

### 前沿理论与学科综述

森林低温霜冻灾害干扰研究综述..... 李秀芬,朱教君,王庆礼,等 (3563)

碱蓬属植物耐盐机理研究进展..... 张爱琴,庞秋颖,阎秀峰 (3575)

### 个体与基础生态

中国东部暖温带刺槐花期空间格局的模拟与预测..... 徐琳,陈效速,杜星 (3584)

长白山林线树种岳桦幼树叶功能型性状随海拔梯度的变化..... 胡启鹏,郭志华,孙玲玲,等 (3594)

油松天然次生林居群遗传多样性及与产地地理气候因子的关联分析..... 李明,王树香,高宝嘉 (3602)

施氮对木荷3个种源幼苗根系发育和氮磷效率的影响..... 张蕊,王艺,金国庆,等 (3611)

围封对内蒙古大针茅草地土壤碳矿化及其激发效应的影响..... 王若梦,董宽虎,何念鹏,等 (3622)

干热河谷主要造林树种气体交换特性的坡位效应..... 段爱国,张建国,何彩云,等 (3630)

生物降解对黑碳及土壤上苯酚脱附行为的影响..... 黄杰勋,莫建民,李非里,等 (3639)

3个树种对不同程度土壤干旱的生理生化响应..... 吴芹,张光灿,裴斌,等 (3648)

冬小麦节水栽培群体“穗叶比”及其与产量和水分利用的关系..... 张永平,张英华,黄琴,等 (3657)

不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对水稻光合作用、物质生产和产量的影响.....

..... 彭斌,李潘林,周楠,等 (3668)

根域限制下水氮供应对膜下滴灌棉花叶片光合生理特性的影响..... 陶先萍,罗宏海,张亚黎,等 (3676)

光照和生长阶段对菖蒲根系泌氧的影响..... 王文林,王国祥,万寅婧,等 (3688)

植物病原菌拮抗性野生艾蒿内生菌的分离、筛选和鉴定..... 徐亚军,赵龙飞,陈普,等 (3697)

不同生物型棉蚜对夏寄主葫芦科作物的选择..... 肖云丽,印象初,刘同先 (3706)

性别和温度对中华秋沙鸭越冬行为的影响..... 曾宾宾,邵明勤,赖宏清,等 (3712)

### 种群、群落和生态系统

基于干扰的汪清林区森林生态系统健康评价..... 袁菲,张星耀,梁军 (3722)

洞庭湖森林生态系统空间结构均质性评价..... 李建军,刘帅,张会儒,等 (3732)

### 景观、区域和全球生态

川西米亚罗林区不同海拔岷江冷杉生长对气候变化的响应..... 徐宁,王晓春,张远东,等 (3742)

2001—2010年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系.....

..... 穆少杰,李建龙,周伟,等 (3752)

地形因子对盐城滨海湿地景观分布与演变的影响..... 侯明行,刘红玉,张华兵,等 (3765)

毛乌素沙地南缘植被景观格局演变与空间分布特征..... 周淑琴,荆耀栋,张青峰,等 (3774)

贵州白鹇湖沉积物中孢粉记录的5.5 kaB. P. 以来的气候变化..... 杜荣荣,陈敬安,曾艳,等 (3783)

|  |                      |
|--|----------------------|
| 典型河谷型城市春季温湿场特征及其生态环境效应·····            | 李国栋,张俊华,王乃昂,等 (3792) |
| 秦岭南北近地面水汽时空变化特征·····                   | 蒋冲,王飞,喻小勇,等 (3805)   |
| 露天矿区景观生态风险空间分异·····                    | 吴健生,乔娜,彭建,等 (3816)   |
| 基于 Holdridge 和 CCA 分析的中国生态地理分区的比较····· | 孔艳,江洪,张秀英,等 (3825)   |

### 资源与产业生态

|   |                     |
|---|---------------------|
| 中国农业生态效率评价方法与实证——基于非期望产出的 SBM 模型分析····· | 潘丹,应瑞瑶 (3837)       |
| 舟山市东极大黄鱼养殖系统能值评估·····                   | 宋科,赵晟,蔡慧文,等 (3846)  |
| 不同基因型玉米间混作优势带型配置·····                   | 赵亚丽,康杰,刘天学,等 (3855) |
| 气候与土壤对烤后烟叶类胡萝卜素和表面提取物含量的影响·····         | 陈伟,熊晶,陈懿,等 (3865)   |

### 城乡与社会生态

|                             |                      |
|-----------------------------|----------------------|
| 成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益····· | 张艳丽,费世民,李智勇,等 (3878) |
|-----------------------------|----------------------|

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 326 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 33 \* 2013-06



**封面图说:** 长白山南坡的岳桦林——长白山岳桦林位于海拔约 1700—2000m 之间的山坡。这种阔叶林分布在针叶林带的上面,成为山地森林的上缘种类,在世界山地森林中实属罕见。岳桦能够顽强地抗御长白山潮湿、寒冷、强风等恶劣气候因素,在严酷的环境条件下形成纯林,是与其独特的生长发育机理密切相关的。岳桦的枝干颇具韧性,在迎风处,由于风吹雪压,树干成片地向背风侧倾斜,这种特性使它能不畏风雪,顽强生存。随着海拔的升高,岳桦林也逐渐矮化,这是岳桦林保护自身生存,适应大自然的结果。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201208091129

彭斌,李潘林,周楠,赖上坤,朱建国,杨连新,王余龙.不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对水稻光合作用、物质生产和产量的影响.生态学报,2013,33(12):3668-3675.

Peng B, Li P L, Zhou N, Lai S K, Zhu J G, Yang L X, Wang Y L. Effects of ozone stress on photosynthesis, dry matter production and yield of rice under different seedling quality and plant density. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12):3668-3675.

## 不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对 水稻光合作用、物质生产和产量的影响

彭斌<sup>1</sup>, 李潘林<sup>1</sup>, 周楠<sup>1</sup>, 赖上坤<sup>1</sup>, 朱建国<sup>2</sup>, 杨连新<sup>1,\*</sup>, 王余龙<sup>1</sup>

(1. 扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室, 扬州 225009; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘要:**近地层臭氧浓度升高使水稻生长受抑进而使产量下降,但这种影响是否因不同栽培条件而异尚不清楚。2011 年依托先进的稻田臭氧 FACE (Free Air gas Concentration Enrichment) 技术平台,以汕优 63 为供试材料,臭氧设置大气臭氧浓度 (Ambient) 和高臭氧浓度 (比 Ambient 高 50%),秧苗素质设置弱苗 (移栽时无分蘖) 和壮苗 (移栽时带两个分蘖),移栽密度设置低密度 (16 穴/m<sup>2</sup>)、中密度 (24 穴/m<sup>2</sup>) 和高密度 (32 穴/m<sup>2</sup>),研究不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对水稻生长和产量的影响。结果表明:高浓度臭氧使水稻结实期叶片 SPAD 值、净光合速率、气孔导度和蒸腾速率明显下降,但胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和叶温无显著变化。高浓度臭氧对水稻拔节前物质生产量没有影响,但使拔节至抽穗期、抽穗至成熟期物质生产量平均分别降低 13% 和 29%,进而使成熟期生物产量和籽粒产量均显著下降。方差分析表明,臭氧与秧苗素质间没有交互效应,但臭氧与移栽密度的交互对最终产量的影响达显著水平。以上结果表明,臭氧胁迫使水稻生长后期光合受阻,导致物质生产和产量显著下降;适当增加移栽密度可能会减少臭氧胁迫下水稻产量的损失。

**关键词:**水稻;臭氧;光合作用;生长;产量

## Effects of ozone stress on photosynthesis, dry matter production and yield of rice under different seedling quality and plant density

PENG Bin<sup>1</sup>, LI Panlin<sup>1</sup>, ZHOU Nan<sup>1</sup>, LAI Shangkun<sup>1</sup>, ZHU Jianguo<sup>2</sup>, YANG Lianxin<sup>1,\*</sup>, WANG Yulong<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Crop Genetics & Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

**Abstract:** Rising tropospheric ozone concentration constrained plant growth and thus result in yield loss of rice. However little is known about response of growth and yield of rice to elevated ozone concentration under different cultivation measures. By using an advanced FACE (Free Air gas Concentration Enrichment) system, hybrid rice cultivar *shanyou* 63 was grown at ambient (A-O<sub>3</sub>) and elevated ozone concentrations [O<sub>3</sub>] (E-O<sub>3</sub>, ambient × 1.5). At transplanting, weak seedlings (no tillers) and robust seedlings (with 2 tillers) were selected and planted with 3 spacing levels: low plant density (16 hills/m<sup>2</sup>), medium (24 hills/m<sup>2</sup>) and high plant density (32 hills/m<sup>2</sup>). Results showed as follows: Ozone stress decreased the SPAD value, net photosynthetic rate (P<sub>n</sub>), stomatal conductivity (G<sub>s</sub>) and transpiration rate (T<sub>r</sub>) of flag leaves, but there was no significant effect on intercellular CO<sub>2</sub> concentration (C<sub>i</sub>) or leaf temperature (T<sub>l</sub>). There was no significant ozone effect on dry matter production before jointing stage. However, elevated [O<sub>3</sub>] significantly reduced dry

**基金项目:**国家自然科学基金 (31071359); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金 (0812201233); 中国科学院知识创新方向项目 (KZCX2-EW-414); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (CXZZ11\_0984 和 CXLX11\_1022); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

收稿日期: 2012-08-09; 修订日期: 2013-03-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lxyang@yzu.edu.cn; ylwang@yzu.edu.cn

matter production from jointing to heading stage and from heading to maturity stage by 13% and 29%, respectively. As a result, reduced dry matter accumulation at maturity stage and significant yield reduction were observed at harvest. The analysis of variance showed that seedling quality by  $O_3$  interaction was not significant, but significant interactions were detected between  $O_3$  and plant density for yield. The above results indicate that ozone stress significantly inhibited photosynthesis of rice during late growth stage, which result in reduced dry matter production and yield loss of rice. Ozone-induced yield loss could be mitigated by appropriately increasing plant density.

**Key Words:** rice; ozone; photosynthesis; growth; yield

人类活动导致地球大气环境的一个显著的变化就是近地层臭氧( $O_3$ )浓度迅速上升。对流层大气平均  $O_3$  浓度从工业革命前的不足 10 nL/L<sup>[1]</sup>, 迅速上升到目前的 50 nL/L 左右(夏季每天 8 h 平均)<sup>[2]</sup>。若维持当前的排放速率, 预计 2015—2050 年全球地表  $O_3$  浓度将在现有基础上增加 20%—25%<sup>[3]</sup>。当前地表空气中平均  $O_3$  浓度已超过敏感作物的伤害阈值(40 nL/L), 已经对野生和栽培植物产生广泛的肉眼可见的伤害, 而未来这种伤害将会变得更加严重<sup>[4]</sup>。水稻是人类最重要的粮食来源之一, 为全球半数以上人口提供营养<sup>[5]</sup>。因此, 准确评估臭氧胁迫对水稻生长发育及产量的影响具有重要意义。

前人对臭氧胁迫下水稻生长、产量和品质的响应进行了广泛的研究<sup>[6-8]</sup>。这些研究多为单因素试验, 而评估臭氧与栽培条件互作的多因子操作试验甚少<sup>[6,9]</sup>。从熏蒸平台来看, 前人水稻臭氧试验的研究多数是在气室内进行<sup>[6]</sup>, 气室狭小的试验空间和人为的隔离设施对植株周围的小气候会产生巨大的扰动, 这些扰动加上气室试验的边际效应, 均有可能改变作物对臭氧胁迫的响应大小。与气室相比, (FACE) 试验在完全开放的农田条件下运行, 被认为是评估大气组份变化对作物产量实际影响的最佳方法<sup>[10]</sup>。本项目依托先进的中国臭氧 FACE 平台, 模拟本世纪中叶地球近地层臭氧浓度, 以敏感品种汕优 63 为试验材料<sup>[11-12]</sup>, 首次研究了水稻在不同秧苗素质和移栽密度条件下对高浓度臭氧响应的差异及其可能原因, 以期对近地层臭氧浓度升高情形下我国稻作生产的适应对策提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地背景和臭氧 FACE 平台

本试验在中国  $O_3$ -FACE 研究技术平台上进行。位于江苏省江都市小纪镇良种场试验田(119°42'0"E, 32°35'5"N)。试验田所在区域年均降水量 980 mm 左右, 年均蒸发量大于 1100 mm, 年平均温度 14.9℃, 年日照时间大于 2100 h, 年平均无霜期 220 d, 耕作方式为水稻-冬小麦轮作。试验田土壤类型为清泥土, 土壤理化性质为: 有机碳 18.8 g/kg, 全 N 1.58 g/kg, 全 P 0.67 g/kg, 全 K 15.1 g/kg, 速效 P 10.8 mg/kg, 速效 K 72.1 mg/kg, 容重 1.23 g/cm<sup>3</sup>, pH 7.3<sup>[13]</sup>。试验平台共有 4 个正八角形的 FACE 实验圈(直径 14 m)和 4 个对照圈, 每圈有效面积约 120 m<sup>2</sup>。FACE 圈之间以及 FACE 圈与对照圈之间的间隔大于 70 m, 以减少  $O_3$  释放对其他圈的影响。FACE 圈周围管道(位于作物冠层上方 50—60 cm 处)上的小孔向圈中心喷射纯  $O_3$  气体, 计算机系统根据圈内浓度监测系统检测大气中的  $O_3$  浓度、风向和风速等因素自动调节  $O_3$  释放的速度及方向, 使 FACE 圈中心点冠层位置  $O_3$  浓度始终保持比大气中  $O_3$  浓度高 50%。放气从 7 月 1 日开始直至水稻成熟, 每天放气时间为 9:00 至 16:00。当对照圈  $O_3$  浓度低于 20 nL/L、下雨和露水等造成叶片湿润以及校正  $O_3$  分析仪、检修设备等的时候暂停放气, 因此水稻整个生长季 FACE 圈内实际平均  $O_3$  浓度比对照圈  $O_3$  浓度只增加约 27%。对照田块没有安装 FACE 管道, 其余环境条件与自然状态一致<sup>[14]</sup>。各关键生育阶段和成熟期 FACE 圈的取样均在有效区内进行, 有效区为 FACE 圈喷气管 1.5 m 以内区域, 这一区域  $O_3$  浓度较为稳定。图 1 为臭氧熏气期间 FACE 圈和对照圈  $O_3$  浓度的变化情况。

### 1.2 供试品种和材料培育

根据前期试验选择臭氧敏感品种汕优 63 为供试材料<sup>[11-12]</sup>。大田旱育秧, 5 月 22 日播种, 6 月 21 日移栽,

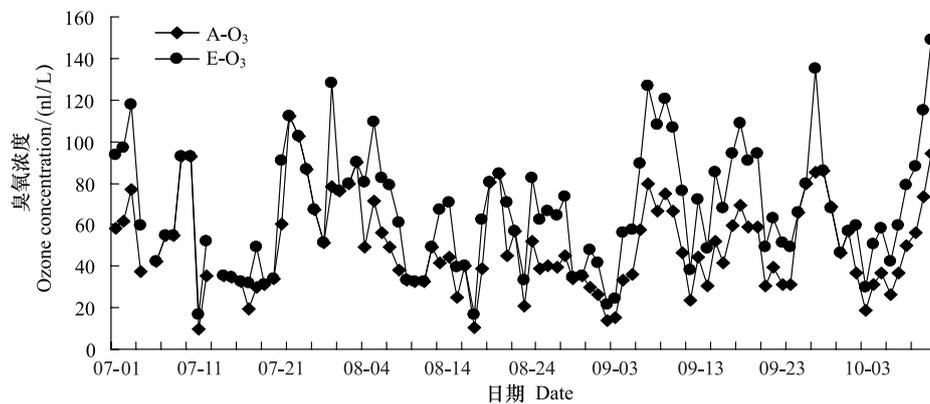


图1 臭氧熏气期间日7 h平均臭氧浓度的变化

Fig. 1 The change of day time 7 h mean ozone concentration during ozone fumigation

A-O<sub>3</sub>: Ambient O<sub>3</sub> concentration, 环境臭氧浓度; E-O<sub>3</sub>: Elevated O<sub>3</sub> concentration, 高浓度臭氧

每穴1苗。总施N量为15 g/m<sup>2</sup>,其中6月19日基肥占总施N量的50%,6月25日分蘖肥占总施N量的10%,8月6日穗肥占总施N量的40%。P、K肥作基肥施用,施用量均为7 g/m<sup>2</sup>。水分管理为6月21日至7月3日保持浅水层,7月4日至8月5日进行多次轻搁田,8月6日以后间隙灌溉(开花期保持浅水),收获前10日断水。适时进行病虫草害防治,保证水稻正常生长发育。

### 1.3 试验处理

本试验为裂区试验,臭氧浓度为主区,秧苗素质和移栽密度为裂区,各小区重复4次。秧苗素质设壮苗和弱苗两个水平。壮苗与弱苗选育过程:壮苗秧板区的播种量为弱苗区的一半,同时在壮苗秧板区育秧期间增施秧苗肥,移栽时选取两个分蘖的为壮苗,不带分蘖的为弱苗。移栽密度,弱苗设低密度(16穴/m<sup>2</sup>,株行距均为25 cm)、中密度(24穴/m<sup>2</sup>,株行距为16.7 cm×25 cm)和高密度(32穴/m<sup>2</sup>,株行距为12.5 cm×25 cm)3个水平,壮苗设中密度和高密度两个水平。

### 1.4 测定内容和方法

叶片气体交换参数:采用LI-6400便携式光合系统分析仪(LI-COR, USA)在抽穗期和抽穗后15 d测定水稻剑叶净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )、蒸腾速率( $T_r$ )和叶温( $T_l$ )。每个小区测定6张剑叶,在10:00至16:00内进行测定。由于环境条件对气体交换参数有着较大的影响,在进行叶片气体交换参数测定前先做好环境控制:流量控制为默认值500 μmol/s,通过功能键F4控制好温度在环境温度的±6℃内,通过功能键F5控制好光强为光合有效辐射强度为1200 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,通过F3键设置RFF CO<sub>2</sub>浓度在380 μmol/mol。

叶片SPAD值:在抽穗期和抽穗后20 d采用SPAD-502叶绿素仪(Minolta, Japan)测定水稻剑叶SPAD值(soil and plant analyzer development,表示叶绿素相对含量),每个小区测定20张剑叶。

生物量:在拔节期、抽穗期、成熟期对各处理小区在普查100穴的基础上取代表性植株6穴,分别测定地上部不同器官干物重(105℃杀青30 min,80℃烘干72 h),据此计算植株地上部总干重。

实际产量:成熟期在每个实验圈固定位置(移栽期确定)连续取样80穴(约4 m<sup>2</sup>左右),风干后机器脱粒,测定各小区水稻实际产量。

## 2 结果与分析

### 2.1 物质积累和生产

不同栽培条件下高浓度O<sub>3</sub>对汕优63各期物质积累量的影响列于表1。由表可知,(1)壮苗拔节期、抽穗期和成熟期物质积累量平均分别比弱苗增加49%、23%和28%,差异均达显著或极显著水平。(2)水稻同期物质积累量随移栽密度的增加而增加,差异达显著或极显著水平。(3)高浓度O<sub>3</sub>使拔节期、抽穗期和成熟期

物质积累量平均分别降低 3%、11% 和 22%，抽穗和成熟期达极显著水平。从不同秧苗素质看，弱苗拔节、抽穗和成熟期分别降低 4%、10%、26%，壮苗对应生育期分别降低 0.2%、12%、17%；从不同密度看，低密度水稻对应生育期分别降低 8%、10%、33%，中密度水稻对应生育期分别降低 1%、13%、21%，高密度条件下水稻对应生育期分别降低 2%、9%、19%，除低密度抽穗期外，抽穗期和成熟期均达显著或极显著水平。(4) 方差分析表明，臭氧和密度的互作对成熟期物质积累量的影响达显著水平。

表 1 不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对汕优 63 不同生育时期物质积累量的影响

Table 1 Effect of ozone stress on dry matter accumulation of Shanyou 63 under different seedling quality and plant density

| 秧苗<br>Seedling      | 密度<br>Density       | 拔节期 Jointing stage   |                      |      | 抽穗期 Heading stage    |                      |       | 成熟期 Maturity stage   |                      |       |
|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|------|----------------------|----------------------|-------|----------------------|----------------------|-------|
|                     |                     | A-O <sub>3</sub>     | E-O <sub>3</sub>     | %    | A-O <sub>3</sub>     | E-O <sub>3</sub>     | %     | A-O <sub>3</sub>     | E-O <sub>3</sub>     | %     |
|                     |                     | /(g/m <sup>2</sup> ) | /(g/m <sup>2</sup> ) |      | /(g/m <sup>2</sup> ) | /(g/m <sup>2</sup> ) |       | /(g/m <sup>2</sup> ) | /(g/m <sup>2</sup> ) |       |
| 弱苗                  | 低密度                 | 159±10               | 146±7                | -8.2 | 825±35               | 746±23               | -9.6  | 1427±67              | 959±22               | -32.8 |
| Week                | 中密度                 | 200±7                | 207±13               | 3.2  | 889±18               | 826±33               | -7.1  | 1533±59              | 1219±49              | -20.5 |
| seedlings           | 高密度                 | 269±9                | 250±3                | -7.1 | 1036±38              | 900±36               | -13.2 | 1753±33              | 128±34               | -26.0 |
| 壮苗                  | 中密度                 | 282±7                | 267±3                | -5.4 | 1155±43              | 942±39               | -18.5 | 1855±78              | 1470±145             | -20.8 |
| Robust<br>seedlings | 高密度                 | 331±18               | 344±11               | 4.2  | 1128±55              | 1066±33              | -5.4  | 1860±67              | 1623±34              | -12.7 |
| ANOVA               | O <sub>3</sub>      |                      | 0.243                |      |                      | 0.009                |       |                      | 0.000                |       |
| (P 值)               | 秧苗(S)               |                      | 0.007                |      |                      | 0.012                |       |                      | 0.026                |       |
|                     | 密度(D)               |                      | 0.000                |      |                      | 0.008                |       |                      | 0.034                |       |
|                     | O <sub>3</sub> ×S   |                      | 0.341                |      |                      | 0.542                |       |                      | 0.328                |       |
|                     | O <sub>3</sub> ×D   |                      | 0.329                |      |                      | 0.622                |       |                      | 0.043                |       |
|                     | O <sub>3</sub> ×S×D |                      | 0.645                |      |                      | 0.764                |       |                      | 0.439                |       |

臭氧胁迫对水稻不同生育阶段物质生产量的影响列于表 2。由表可知，(1) 壮苗拔节至抽穗期、抽穗至成熟期的物质生产量平均分别比弱苗增加 17%、13%，前者达显著水平。(2) 不同密度条件下水稻拔节至抽穗期物质生产量无显著差异，但抽穗至成熟期物质生产量随着密度的增加而显著增加。(3) 高浓度 O<sub>3</sub> 使拔节至抽穗期、抽穗至成熟期物质生产量分别降低 13%、29%，达显著和极显著水平。从不同秧苗素质看，弱苗拔节至抽穗期、抽穗至成熟期物质生产量分别降低 10%、35%，壮苗对应生育阶段分别降低 16% 和 22%，均达显著或极显著水平；从不同移栽密度看，低密度水稻对应生育阶段分别降低 10% 和 65%，中密度水稻对应生育阶段分别降低 14% 和 25%，高密度水稻对应生育阶段分别降低 12% 和 19%，抽穗至成熟期均达显著或极显著水平。(4) 方差分析表明，臭氧和不同栽培措施间的互作均未达显著水平。

表 2 不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对汕优 63 不同生育阶段干物质生产量的影响

Table 2 Effect of ozone stress on dry matter production of Shanyou63 under different seedling quality and plant density

| 秧苗<br>Seedling | 密度<br>Density       | 拔节至抽穗期 Jointing to heading stage |                      |       | 抽穗至成熟期 Heading to maturity stage |                      |       |
|----------------|---------------------|----------------------------------|----------------------|-------|----------------------------------|----------------------|-------|
|                |                     | A-O <sub>3</sub>                 | E-O <sub>3</sub>     | %     | A-O <sub>3</sub>                 | E-O <sub>3</sub>     | %     |
|                |                     | /(g/m <sup>2</sup> )             | /(g/m <sup>2</sup> ) |       | /(g/m <sup>2</sup> )             | /(g/m <sup>2</sup> ) |       |
| 弱苗             | 低密度                 | 666±33                           | 600±37               | -9.9  | 602±63                           | 214±47               | -64.5 |
|                | 中密度                 | 644±23                           | 612±44               | -5.0  | 689±66                           | 513±16               | -25.5 |
|                | 高密度                 | 767±38                           | 650±56               | -15.3 | 716±46                           | 575±60               | -19.8 |
| 壮苗             | 中密度                 | 873±45                           | 675±42               | -22.8 | 699.±114                         | 529±112              | -24.4 |
|                | 高密度                 | 797±38                           | 722±38               | -9.4  | 693±33                           | 561±24               | -19.0 |
| ANOVA(P 值)     | O <sub>3</sub>      |                                  | 0.018                |       |                                  | 0.000                |       |
|                | 秧苗(S)               |                                  | 0.032                |       |                                  | 0.103                |       |
|                | 密度(D)               |                                  | 0.174                |       |                                  | 0.029                |       |
|                | O <sub>3</sub> ×S   |                                  | 0.456                |       |                                  | 0.528                |       |
|                | O <sub>3</sub> ×D   |                                  | 0.776                |       |                                  | 0.441                |       |
|                | O <sub>3</sub> ×S×D |                                  | 0.874                |       |                                  | 0.573                |       |

## 2.2 叶片气体交换参数

高浓度  $O_3$  对汕优 63 结实期叶片气体交换参数的影响列于表 3。不同秧苗素质或不同移栽密度条件下水稻各气体交换参数均无显著差异,两个测定时期一致。臭氧胁迫使抽穗期和抽穗后 15 d 叶片净光合速率 ( $P_n$ ) 平均分别降低了 18% ( $P<0.01$ ) 和 32% ( $P<0.01$ ), 抽穗后 15 d 的降幅明显大于抽穗期。臭氧胁迫使抽穗期和抽穗后 15 d 叶片气孔导度 ( $G_s$ ) 平均分别降低了 38% ( $P<0.01$ ) 和 42% ( $P<0.01$ )。臭氧胁迫对叶片胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ ) 无显著影响,说明高浓度  $O_3$  环境下叶片  $P_n$  下降并非  $CO_2$  摄入量受限所致。高浓度  $O_3$  使抽穗期和抽穗后 15 d 叶片蒸腾速率 ( $T_r$ ) 分别降低了 20% 和 23%, 均达显著水平,而对叶温 ( $T_l$ ) 无显著影响。方差分析表明,不同处理间的互作对上述叶片气体交换参数的影响均无显著影响。

表 3 不同秧苗素质和移栽密度条件下  $O_3$  胁迫对汕优 63 叶片气体交换参数的影响

Table 3 Effect of ozone stress on gas exchange parameters of Shanyou63 leaves under different seedling quality and plant density

| 时期<br>Stage                          | 秧苗<br>Seedling | 密度<br>Density | 臭氧<br>Ozone           | 净光速率 $P_n$<br>/( $\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) | 气孔导度 $G_s$<br>/( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) | 胞间 $CO_2$ 浓度 $C_i$<br>/( $\mu\text{molCO}_2\text{mol}^{-1}$ ) | 蒸腾速率 $T_r$<br>/( $\text{mmolH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) | 叶温 $T_l$<br>/°C |
|--------------------------------------|----------------|---------------|-----------------------|--|---|---|---|-----------------|
| 抽穗期<br>Heading stage                 | 弱苗             | 低密度           | A- $O_3$              | 17.1±1.7   | 0.59±0.12   | 282.7±3.4   | 13.8±1.1  | 30.7±0.3        |
|                                      |                |               | E- $O_3$              | 13.0±0.5   | 0.36±0.02   | 277.0±6.0   | 11.0±1.0  | 31.8±0.8        |
|                                      |                | 高密度           | A- $O_3$              | 16.9±0.5   | 0.65±0.04   | 288.7±2.5   | 14.7±0.7  | 31.1±0.5        |
|                                      |                |               | E- $O_3$              | 13.7±1.0   | 0.43±0.07   | 283.2±4.8   | 11.9±0.3  | 31.5±0.9        |
|                                      | 壮苗             | 高密度           | A- $O_3$              | 16.3±0.7   | 0.65±0.02   | 291.5±5.0   | 14.4±0.1  | 30.7±0.5        |
|                                      |                |               | E- $O_3$              | 14.7±1.0   | 0.39±0.01   | 274.3±4.9   | 11.4±0.6  | 31.3±1.0        |
|                                      | ANOVA          | $O_3$         |                       | **   | **  | ns  | *   | ns              |
|                                      |                |               | $O_3\times S$         | ns   | ns  | ns  | ns  | ns              |
|                                      |                |               | $O_3\times D$         | ns   | ns  | ns  | ns  | ns              |
|                                      |                |               | $O_3\times S\times D$ | ns   | ns  | ns  | ns  | ns              |
| 抽穗后 15 d<br>15 days after<br>heading | 弱苗             | 低密度           | A- $O_3$              | 14.1±1.5   | 0.38±0.11   | 281.5±4.2   | 10.6±1.2  | 29.4±0.4        |
|                                      |                |               | E- $O_3$              | 9.8±0.9  | 0.24±0.04   | 265.8±3.9   | 7.8±0.7   | 29.9±0.6        |
|                                      |                | 高密度           | A- $O_3$              | 15.0±0.7   | 0.40±0.08   | 291.7±4.5   | 11.2±0.9  | 29.1±0.3        |
|                                      |                |               | E- $O_3$              | 10.3±0.6   | 0.19±0.09   | 273.3±5.6   | 8.02±0.5  | 29.8±0.8        |
|                                      | 壮苗             | 高密度           | A- $O_3$              | 13.9±0.7   | 0.43±0.04   | 287.5±6.1   | 10.1±0.6  | 29.2±0.4        |
|                                      |                |               | E- $O_3$              | 9.8±0.6  | 0.27±0.07   | 279.2±6.2   | 8.6±0.5   | 29.6±0.9        |
|                                      | ANOVA          | $O_3$         |                       | **   | **  | ns  | *   | ns              |
|                                      |                |               | $O_3\times S$         | ns   | ns  | ns  | ns  | ns              |
|                                      |                |               | $O_3\times D$         | ns   | ns  | ns  | ns  | ns              |
|                                      |                |               | $O_3\times S\times D$ | ns   | ns  | ns  | ns  | ns              |

\*\* ,  $P<0.01$ ; \* ,  $P<0.05$ ; ns: 不显著

## 2.3 叶片 SPAD 值

臭氧胁迫对水稻结实期叶片 SPAD 值的影响示于图 2。由图可知,不同秧苗素质或移栽密度条件下水稻叶片 SPAD 值均无显著差异,两个测定时期一致。臭氧胁迫使抽穗期和抽穗后 20 d 叶片 SPAD 值平均分别降低了 12% ( $P<0.05$ ) 和 23% ( $P<0.01$ ), 抽穗后 20 d 的降幅明显大于抽穗期,不同秧苗素质或移栽密度条件下趋势基本一致。

## 2.4 籽粒产量

汕优 63 收获期割方测定实际产量(图 3)。结果表明,壮苗和弱苗籽粒产量平均分别为 669  $\text{g}/\text{m}^2$  和 582  $\text{g}/\text{m}^2$ , 差异达显著水平。低、中和高密度条件下水稻产量分别为 558、616 和 647  $\text{g}/\text{m}^2$ , 无显著差异。高浓度  $O_3$  使水稻平均减产 16.2%, 达极显著水平,其中弱苗和壮苗分别减产 14.9%、17.9%;低、中、高密度条件下分别减产 17.2%、15.7% 和 15.9%, 均达 0.05 显著水平。方差分析表明,臭氧和密度互作对籽粒产量的影响达显著水平 ( $P=0.04$ ),但臭氧×秧苗、臭氧×秧苗×密度间的互作均未达显著水平。

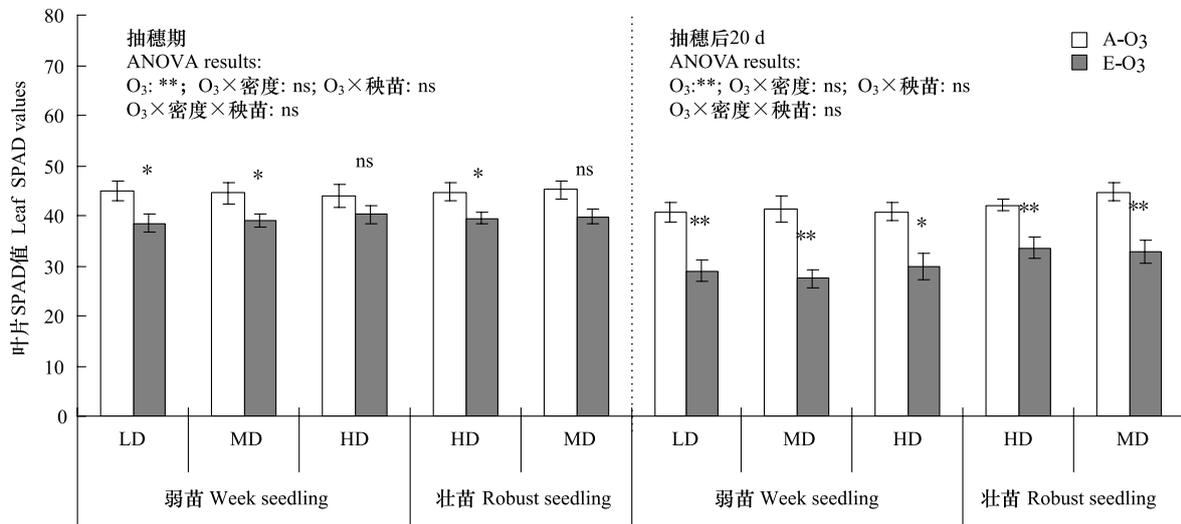


图2 不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对汕优 63 叶片叶绿素相对含量 (SPAD) 值的影响

Fig. 2 Effect of ozone stress on SPAD values of Shanyou 63 leaves under different seedling quality and plant density

LD, MD 和 HD 分别表示低、中和高密度; LD, MD and HD means low, medium and high density respectively

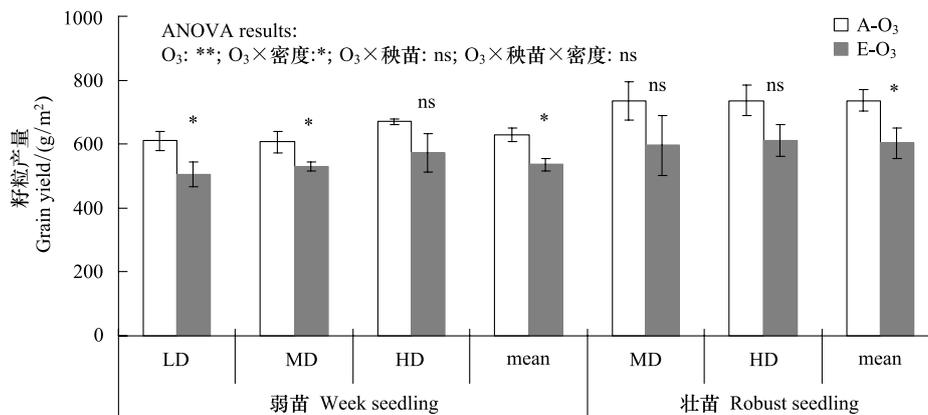


图3 不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对汕优 63 籽粒产量的影响

Fig. 3 Effect of ozone stress on grain yield of Shanyou 63 under different seedling quality and plant density

### 3 讨论

叶片是大气臭氧胁迫的最初感应器。本研究表明,臭氧胁迫使汕优 63 结实期叶片 SPAD 值明显下降,抽穗后 20 d 降幅明显大于抽穗期(图 2),这与 Olszyk<sup>[15]</sup>等气室试验的结果一致。稻叶是光合作用的重要器官,臭氧胁迫在破坏叶片光合色素的同时,也使其光合速率降低,降幅因试验设施、供试材料、处理浓度以及测定时期而异<sup>[6]</sup>。本研究表明,比环境臭氧浓度高 27% 的处理使汕优 63 抽穗期和抽穗后 15 d 剑叶净光合速率分别降低了 18% 和 32% (表 3),随时间推移降幅明显增大,这种趋势与前期 FACE 研究对汕优 63<sup>[9,13]</sup>和其它品种<sup>[16]</sup>的报道一致。叶片光合速率下降原因一般可分为气孔限制和非气孔限制。本研究发现,高浓度臭氧使叶片气孔导度极显著下降的同时,胞间 CO<sub>2</sub> 浓度无显著变化(表 3)。说明臭氧胁迫下水稻净光合速率下降可能主要归因于叶肉细胞同化能力,即内部 Rubisco 酶活性和光合组分等非气孔因素的影响,而非气孔限制的结果。本研究还发现,臭氧胁迫环境下,伴随气孔导度大幅下降,叶片蒸腾速率也明显下降。因此,臭氧胁迫环境有利于提高水稻的水分利用效率和抵御干旱胁迫<sup>[17]</sup>。从本研究栽培条件与臭氧的互作效应看,秧苗素质和移栽密度对臭氧胁迫下汕优 63 光合参数的响应均无明显调节效应(表 3)。

臭氧胁迫下水稻光合受阻必然影响物质生产<sup>[6]</sup>。Ainsworth<sup>[7]</sup>对前人气室研究的整合分析表明,相比过

滤空气(经活性炭过滤后的背景大气),84 nl/L 臭氧处理使水稻地上部干物重平均下降 16% ( $n=68$ )。Pang 等<sup>[13]</sup>FACE 研究发现,56 nl/L 高浓度臭氧处理使汕优 63 成熟期地上部总干重比对照(环境臭氧浓度为 45 nl/L)平均降低 18%。本试验在同一 FACE 平台上进行,结果表明,水稻大田期平均 46 nl/L 臭氧浓度使汕优 63 最终地上部总干重比对照(环境臭氧浓度为 36 nl/L)下降了 22%,这一响应明显大于气室研究的结果<sup>[7]</sup>,但与同一品种的大田 FACE 结果相近<sup>[13]</sup>。从积累动态看,高浓度臭氧使汕优 63 拔节期、抽穗期、成熟期干物质积累量分别降低了 2%、11% 和 22%(表 1),随着生育进程的推移降幅直线增加,这与 Kobayashi 等<sup>[18]</sup>大田气室的试验结果基本一致。本研究进一步分析了水稻生育中期(即拔节至抽穗期)和后期(即抽穗至成熟期)的干物质生产量(表 2),结果发现高浓度臭氧使这两个生育阶段的物质生产量均大幅下降,生育后期的降幅(-29%)明显大于生育中期(-13%)。说明,臭氧胁迫下水稻最终生产力明显下降主要与生育中期特别是后期的生长受抑有关。结合光合参数变化,臭氧胁迫对水稻生长的影响具有明显的积累作用,这种累积伤害现象在水稻<sup>[6]</sup>和其它作物如大豆<sup>[19]</sup>中均有报道。本试验还设置了两种秧苗素质和 3 个栽插密度处理,结果表明,不同栽培条件下水稻物质生产对臭氧胁迫的响应差异总体较小,但臭氧与密度的互作对最终生物量的影响达显著水平,高浓度臭氧对总生物量的影响程度随着密度的提高而降低(表 2)。物质生产与光合效率和光合势有关,臭氧与密度对前者没有互作效应(表 3),因此适当提高栽插密度减少臭氧胁迫下水稻最终生产力的损失可能主要是通过减缓生育中、后期光合势的衰退而实现的。本试验表明臭氧胁迫下水稻抽穗后叶面积的衰减程度随密度提高而降低(数据未列出)。

大量研究表明臭氧胁迫使水稻产量下降,降幅与实验平台、供试材料、臭氧处理的浓度和时期等因素有关<sup>[6]</sup>。本研究表明,FACE 情形下,46 nl/L 臭氧处理使汕优 63 产量较环境臭氧浓度(36 nl/L)平均降低 16.2% ( $P<0.01$ ,图 3),这一结果大于 Ainsworth<sup>[7]</sup>对气室试验整合分析的结果(与过滤空气相比,61 nl/L  $O_3$  处理使水稻产量平均降低了 14%),但小于或接近同一平台同一品种的 FACE 试验结果<sup>[11-12]</sup>。本研究还发现,不同秧苗素质条件下高浓度臭氧对水稻产量的影响无明显差异,但臭氧与密度的互作对产量的影响达显著水平,高浓度臭氧对产量的影响程度随着密度的提高而降低(图 3)。籽粒产量可分解为生物产量和经济系数两个因子。相关分析表明,不同处理条件下水稻籽粒产量与生物产量的关系比较密切( $r=0.90^{**}$ ),而与经济系数无显著相关。说明臭氧胁迫下汕优 63 最终籽粒产量的损失主要与物质生产能力明显下降有关,而与物质分配到籽粒中的效率相关不密切。可见,适当提高栽插密度减少臭氧胁迫下水稻产量的损失主要与减少水稻生物产量的损失有关。

本试验数据进一步证明了未来高浓度臭氧环境下水稻生长后期光合作用和生长发育受阻,进而使产量明显下降;本研究还发现,臭氧与秧苗素质间没有互作效应,但适当增加移栽密度可能会减少臭氧胁迫下水稻产量的损失,这一结果是否因不同水稻品种或不同气象条件而异还需更多的试验研究来回答。

**致谢:**感谢中国科学院南京土壤研究所刘钢、唐昊冶和朱国兴老师对臭氧 FACE 系统的日常维护,为本试验的实施提供了硬件保障。

## References:

- [ 1 ] Volz A, Kley D. Evaluation of the montsouris series of ozone measurements made in the 19th-century. *Nature*, 1988, 332: 240-242.
- [ 2 ] Fiscus E L, Booker F L, Burkey K O. Crop responses to ozone: uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning. *Plant, Cell and Environment*, 2005, 28: 997-1011.
- [ 3 ] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis//Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H, eds. Contribution of Working Group I to the Fourth Annual Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 996-996.
- [ 4 ] Feng Z Z, Kobayashi K. Assessing the impacts of current and future concentrations of surface ozone on crop yield with meta-analysis. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(8):1510-1519.
- [ 5 ] IRRI. Rice Almanac: Source Book for the Most Important Economic Activity on Earth. 3rd. Oxford: CABI Publishing, 2002.
- [ 6 ] Yang L X, Wang Y L, Shi G Y, Wang Y X, Zhu J G, Kobayashi K, Lai S K. Responses of rice growth and development to elevated near-surface

- layer ozone ( $O_3$ ) concentration; A review. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19 (4): 901-910.
- [ 7 ] Ainsworth E A. Rice production in a changing climate: a meta analysis of responses to elevated carbon dioxide and elevated ozone concentration. Global Change Biology, 2008, 14:1-9.
- [ 8 ] Wang Y X, Frei M. Stressed food-The impact of abiotic environmental stresses on crop quality. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011, 141:271-286
- [ 9 ] Luo K J, Zhu J G, Liu G, Tang H Y, Li C H, Zeng Q. Effects of elevated ozone on leaf photosynthesis of rice (*Oryza sativa* L.) and mitigation with high nitrogen supply. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(3): 481-488.
- [ 10 ] Long S P, Ainsworth E A. Global food insecurity: treatment of major food crops with elevated carbon dioxide or ozone under large scale fully open air conditions suggests recent models may have overestimated future yields. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 2005, 360, 00 2011-2020.
- [ 11 ] Shi G Y, Yang L X, Wang Y X, Kobayashi K, Zhu J G. Impact of elevated ozone concentration on yield of four Chinese rice cultivars under fully open-air field conditions. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2009, 131: 178-184.
- [ 12 ] Wang Y X, Yang L X, Kobayashi K, Zhu J G, Chen C P, Yang K F, Tang H Y, Wang Y L. Investigations on spikelet formation in hybrid rice as affected by elevated tropospheric ozone concentration in China. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2012, 150:63-71.
- [ 13 ] Pang J, Kazuhiko K. Yield and photosynthetic characteristics of flag leaves in Chinese rice (*Oryza sativa* L.) varieties subjected to free-air release of ozone. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2009, 132: 203-211.
- [ 14 ] Tang H Y, Liu G, Han Y, Zhu J G, Kobayashi K. A system for free-air ozone concentration elevation with rice and wheat: control performance and ozone exposure regime. Atmospheric Environment, 2011, 45(35): 6276-6282.
- [ 15 ] Olszyk D M, Wise C. Interactive effects of elevated  $CO_2$  and  $O_3$  on rice and flacca tomato. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1997, 66: 1-10.
- [ 16 ] Liang J, Zhu J G, Zeng Q, Xie Z B, LIU G, Tang H Y, Cao J L, Zhu C W. Effects of  $O_3$ -FACE(Ozone-free Air Control Enrichment) on gas exchange and chlorophyll fluorescence of rice leaf. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(4): 613-618.
- [ 17 ] Nouchi I, Ito O, Harazono Y, et al. Effects of chronic ozone exposure on growth, root respiration and nutrient up take of rice plants. Environmental Pollution, 1991, 74: 22, 149-164.
- [ 18 ] Kobayashi K, Okada M, Nouchi I. Effects of ozone on dry matter partition and yield of Japanese cultivar of rice (*Oryza sativa* L.). Agriculture, Ecosystems and Environment, 1995, 53: 109-122.
- [ 19 ] Yang L X, Wang Y X, Zhao Y P, Zhu J G, Sun J D, Wang Y L. Responses of soybean to free-air ozone concentration enrichment: A research review. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6635-6645.

#### 参考文献:

- [ 6 ] 杨连新,王余龙,石广跃,王云霞,朱建国,Kobayashi,赖尚坤. 近地层高臭氧浓度对水稻生长发育影响研究进展. 应用生态学报,2008,19(4):901-910.
- [ 9 ] 罗克菊,朱建国,刘钢,唐昊冶,李春华,曾青. 臭氧胁迫对水稻的光合损伤与施氮的缓解作用. 生态环境学报,2012,21(3):481-488.
- [ 16 ] 梁晶,朱建国,曾青,谢祖彬,刘钢,唐昊冶,曹际玲,朱春梧. 开放式臭氧浓度升高对水稻叶片光合作用日变化的影响. 农业环境科学学报, 2010,29(4):613-618.
- [ 19 ] 杨连新,王云霞,赵秩鹏,朱建国,Sun J D,王余龙. 自由空气中臭氧浓度升高对大豆的影响. 生态学报,2010,30(23): 6635-6645.

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 12 Jun. ,2013 (Semimonthly)**  
**CONTENTS**

**Frontiers and Comprehensive Review**

- Research on the disturbance of frost damage to forests ..... LI Xiufen, ZHU Jiaojun, WANG Qingli, et al (3563)  
Advances in salt-tolerance mechanisms of *Suaeda* plants ..... ZHANG Aiqin, PANG Qiuying, YAN Xiufeng (3575)

**Autecology & Fundamentals**

- Simulation and prediction of spatial patterns of *Robinia pseudoacacia* flowering dates in eastern China's warm temperate zone .....  
..... XU Lin, CHEN Xiaoqiu, DU Xing (3584)  
Response of leaf functional traits of *Betula ermanii* saplings to the altitudinal Variation .....  
..... HU Qipeng, GUO Zhihua, SUN Lingling, et al (3594)  
Analysis of genetic diversity of chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) natural secondary forest populations and correlation with theirs  
habitat ecological factors ..... LI Ming, WANG Shuxiang, GAO Baojia (3602)  
Nitrogen addition affects root growth, phosphorus and nitrogen efficiency of three provenances of *Schima superba* in barren soil .....  
..... ZHANG Rui, WANG Yi, JIN Guoqing, et al (3611)  
Effect of enclosure on soil C mineralization and priming effect in *Stipa grandis* grassland of Inner Mongolia .....  
..... WANG Ruomeng, DONG Kuanhu, HE Nianpeng, et al (3622)  
Effects of slope position on gas exchange characteristics of main tree species for vegetation restoration in dry-hot valley of Jingsha  
River ..... DUAN Aiguo, ZHANG Jianguo, HE Caiyun, et al (3630)  
Impacts of biodegradation on desorption of phenol adsorbed on black carbon and soil .....  
..... HUANG Jiexun, MO Jianmin, LI Feili, et al (3639)  
Physiological and biochemical responses to different soil drought stress in three tree species .....  
..... WU Qin, ZHANG Guangcan, PEI Bin, et al (3648)  
The ear-leaf ratio of population is related to yield and water use efficiency in the water-saving cultivation system of winter wheat .....  
..... ZHANG Yongping, ZHANG Yinghua, HUANG Qin, et al (3657)  
Effects of ozone stress on photosynthesis, dry matter production and yield of rice under different seedling quality and plant density ...  
..... PENG Bin, LI Panlin, ZHOU Nan, et al (3668)  
Effects of water and nitrogen under root restriction on photosynthetic characters of cotton plants grown with under-mulch drip  
irrigation ..... TAO Xianping, LUO Honghai, ZHANG Yali, et al (3676)  
The influence of light and growth stage on oxygen diffusion capacity of *Acorus calamus* roots .....  
..... WANG Wenlin, WANG Guoxiang, WAN Yinjing, et al (3688)  
Isolation, screening and characterization of phytopathogen antagonistic endophytes from wild *Artemisia argyi* .....  
..... XU Yajun, ZHAO Longfei, CHEN Pu, et al (3697)  
Performance of the two host-biotypes of *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) on different cucurbitaceous host plants .....  
..... XIAO Yunli, YIN Xiangchu, LIU Tongxian (3706)  
The effects of gender and temperature on the wintering behavior of Chinese merganser .....  
..... ZENG Binbin, SHAO Mingqin, LAI Hongqing, et al (3712)

**Population, Community and Ecosystem**

- Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the disturbance in Wangqing forestry .....  
..... YUAN Fei, ZHANG Xingyao, LIANG Jun (3722)  
Heterogeneity evaluation of forest ecological system spatial structure in Dongting Lake .....  
..... LI Jianjun, LIU Shuai, ZHANG Huiru, et al (3732)

**Landscape, Regional and Global Ecology**

- Climate-growth relationships of *Abies faxoniana* from different elevations at Miyaluo, western Sichuan, China .....  
..... XU Ning, WANG Xiaochun, ZHANG Yuandong, et al (3742)

- Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010 ..... MU Shaojie, LI Jianlong, ZHOU Wei, et al (3752)
- Influences of topographic features on the distribution and evolution of landscape in the coastal wetland of Yancheng ..... HOU Minghang, LIU Hongyu, ZHANG Huabing, et al (3765)
- Vegetation landscape pattern change and characteristics of spatial distribution in south edge of Mu Us Sandy Land ..... ZHOU Shuqin, JING Yaodong, ZHANG Qingfeng, et al (3774)
- Climate change recorded mainly by pollen from baixian lake during the last 5.5kaB. P. .... DU Rongrong, CHEN Jing'an, ZENG Yan, et al (3783)
- Characteristics of temperature field, humidity field and their eco-environmental effects in spring in the typical valley-city ..... LI Guodong, ZHANG Junhua, WANG Naiang, et al (3792)
- Spatial and temporal variation of surface water vapor over northern and southern regions of Qinling Mountains ..... JIANG Chong, WANG Fei, YU Xiaoyong, et al (3805)
- Spatial variation of landscape eco-risk in open mine area ..... WU Jiansheng, QIAO Na, PENG Jian, et al (3816)
- The comparison of ecological geographica regionlization in China based on Holdridge and CCA analysis ..... KONG Yan, JIANG Hong, ZHANG Xiuying, et al (3825)
- Resource and Industrial Ecology**
- Agricultural eco-efficiency evaluation in China based on SBM model ..... PAN Dan, YING Ruiyao (3837)
- The emergy analysis of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) aquaculture system around Dongji island in Zhoushan ..... SONG Ke, ZHAO Sheng, CAI Huiwen, et al (3846)
- Optimum stripe arrangement for inter-cropping and mixed-cropping of different maize (*Zea mays* L.) genotypes ..... ZHAO Yali, KANG Jie, LIU Tianxue, et al (3855)
- Effects of climate and soil on the carotenoid and cuticular extract content of cured tobacco leaves ..... CHEN Wei, XIONG Jing, CHEN Yi, et al (3865)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Carbon sequestration and oxygen release as well as cooling and humidification efficiency of the main greening tree species of Sha River, Chengdu ..... ZHANG Yanli, FEI Shimin, LI Zhiyong, et al (3878)

# 《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于1981年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大16开本,300页,国内定价90元/册,全年定价2160元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路18号 电话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 吴文良 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段靖

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981年3月创刊)

第33卷 第12期 (2013年6月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 12 (June, 2013)

编辑 《生态学报》编辑部  
地址:北京海淀区双清路18号  
邮政编码:100085  
电话:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主编 王如松  
主管 中国科学技术协会  
主办 中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
地址:北京海淀区双清路18号  
邮政编码:100085

出版 科学出版社  
地址:北京东黄城根北街16号  
邮政编码:100717

印刷 北京北林印刷厂  
发行 科学出版社  
地址:东黄城根北街16号  
邮政编码:100717  
电话:(010)64034563  
E-mail: journal@espg.net

订购 全国各地邮局  
国外发行 中国国际图书贸易总公司  
地址:北京399信箱  
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第8013号  
许可证

Edited by Editorial board of  
ACTA ECOLOGICA SINICA  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China  
Tel: (010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong  
Supervised by China Association for Science and Technology  
Sponsored by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel: (010)64034563  
E-mail: journal@espg.net

Domestic All Local Post Offices in China  
Foreign China International Book Trading  
Corporation  
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元