

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第31卷 第20期 Vol.31 No.20 **2011**

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 31 卷 第 20 期 2011 年 10 月 (半月刊)

## 目 次

- 洋山港潮间带大型底栖动物群落结构及多样性..... 王宝强,薛俊增,庄 骅,等 (5865)
- 天津近岸海域夏季大型底栖生物群落结构变化特征..... 冯剑丰,王秀明,孟伟庆,等 (5875)
- 基于景观遗传学的滇金丝猴栖息地连接度分析..... 薛亚东,李 丽,李迪强,等 (5886)
- 三江平原湿地鸟类丰富度的空间格局及热点地区保护..... 刘吉平,吕宪国 (5894)
- 江苏沿海地区耕地景观生态安全格局变化与驱动机制 ..... 王 千,金晓斌,周寅康 (5903)
- 广州市主城区树冠覆盖景观格局梯度..... 朱耀军,王 成,贾宝全,等 (5910)
- 景观结构动态变化及其土地利用生态安全——以建三江垦区为例 ..... 林 佳,宋 戈,宋思铭 (5918)
- 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划..... 李 晖,易 娜,姚文璟,等 (5928)
- 苏南典型城镇耕地景观动态变化及其影响因素..... 周 锐,胡远满,苏海龙,等 (5937)
- 放牧干扰下若尔盖高原沼泽湿地植被种类组成及演替模式..... 韩大勇,杨永兴,杨 杨,等 (5946)
- 放牧胁迫下若尔盖高原沼泽退化特征及其影响因子..... 李 珂,杨永兴,杨 杨,等 (5956)
- 近 20 年广西钦州湾有机污染状况变化特征及生态影响..... 蓝文陆 (5970)
- 万仙山油松径向生长与气候因子的关系 ..... 彭剑峰,杨爱荣,田沁花 (5977)
- 50 年来山东塔山植被与物种多样性的变化 ..... 高 远,陈玉峰,董 恒,等 (5984)
- 热岛效应对植物生长的影响以及叶片形态构成的适应性..... 王亚婷,范连连 (5992)
- 遮荫对濒危植物崖柏光合作用和叶绿素荧光参数的影响..... 刘建锋,杨文娟,江泽平,等 (5999)
- 遮荫对 3 年生东北铁线莲生长特性及品质的影响..... 韩忠明,赵淑杰,刘翠晶,等 (6005)
- 云雾山铁杆蒿茎叶浸提液对封育草地四种优势植物的化感效应..... 王 辉,谢永生,杨亚利,等 (6013)
- 杭州湾滨海滩涂盐基阳离子对植物分布及多样性的影响 ..... 吴统贵,吴 明,虞木奎,等 (6022)
- 藏北高寒草原针茅属植物 AM 真菌的物种多样性..... 蔡晓布,彭岳林,杨敏娜,等 (6029)
- 成熟马占相思林的蒸腾耗水及年际变化..... 赵 平,邹绿柳,饶兴权,等 (6038)
- 荆条叶性状对野外不同光环境的表型可塑性..... 杜 宁,张秀茹,王 炜,等 (6049)
- 短期极端干旱事件干扰后退化沙质草地群落恢复力稳定性的测度与比较..... 张继义,赵哈林 (6060)
- 滨海盐碱地土壤质量指标对生态改良的响应..... 单奇华,张建锋,阮伟建,等 (6072)
- 退化草地阿尔泰针茅与狼毒种群的小尺度种间空间关联..... 赵成章,任 珩 (6080)
- 延河流域植物群落功能性状对环境梯度的响应 ..... 龚时慧,温仲明,施 宇 (6088)
- 臭氧胁迫使两优培九倒伏风险增加——FACE 研究 ..... 王云霞,王晓莹,杨连新,等 (6098)
- 甘蔗//大豆间作和减量施氮对甘蔗产量、植株及土壤氮素的影响 ..... 杨文亭,李志贤,舒 磊,等 (6108)
- 湿润持续时间对生物土壤结皮固氮活性的影响..... 张 鹏,李新荣,胡宜刚,等 (6116)
- 锌对两个品种茄子果实品质的效应..... 王小晶,王慧敏,王 菲,等 (6125)
- Cd<sup>2+</sup> 胁迫对银芽柳 PS II 叶绿素荧光光响应曲线的影响 ..... 钱永强,周晓星,韩 蕾,等 (6134)
- 紫茉莉对铅胁迫生理响应的 FTIR 研究 ..... 薛生国,朱 锋,叶 晟,等 (6143)

结缕草对重金属镉的生理响应 .....	刘俊祥,孙振元,巨关升,等 (6149)
两种大型真菌子实体对 Cd <sup>2+</sup> 的生物吸附特性 .....	李维焕,孟凯,李俊飞,等 (6157)
富营养化山仔水库沉积物微囊藻复苏的受控因子 .....	苏玉萍,林慧,钟厚璋,等 (6167)
一种新型的昆虫诱捕器及其对长足大竹象的诱捕作用 .....	杨瑶君,刘超,汪淑芳,等 (6174)
光周期对梨小食心虫滞育诱导的影响 .....	何超,孟泉科,花蕾,等 (6180)
农林复合生态系统防护林斑块边缘效应对节肢动物的影响 .....	汪洋,王刚,杜瑛琪,等 (6186)
中国超大城市土地利用状况及其生态系统服务动态演变 .....	程琳,李锋,邓华锋 (6194)
城市综合生态风险评价——以淮北市城区为例 .....	张小飞,王如松,李正国,等 (6204)
唐山市域 1993—2009 年热场变化 .....	贾宝全,邱尔发,蔡春菊 (6215)
基于投影寻踪法的武汉市“两型社会”评价模型与实证研究 .....	王茜茜,周敬宣,李湘梅,等 (6224)
长株潭城市群生态屏障研究 .....	夏本安,王福生,侯方舟 (6231)
基于生态绿当量的城市土地利用结构优化——以宁国市为例 .....	赵丹,李锋,王如松 (6242)
基于 ARIMA 模型的生态足迹动态模拟和预测——以甘肃省为例 .....	张勃,刘秀丽 (6251)
<b>专论与综述</b>	
孤立湿地研究进展 .....	田学智,刘吉平 (6261)
甲藻的异养营养型 .....	孙军,郭术津 (6270)
生态工程领域微生物菌剂研究进展 .....	文娅,赵国柱,周传斌,等 (6287)
我国生态文明建设及其评估体系研究进展 .....	白杨,黄宇驰,王敏,等 (6295)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 440 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 49 * 2011-10	



**封面图说:** 壶口瀑布是黄河中游流经秦晋大峡谷时形成的一个天然瀑布。此地两岸夹山,河底石岩上冲刷成一巨沟,宽达 30 米,深约 50 米,最大瀑面 3 万平方米。滚滚黄水奔流至此,倒悬倾注,若奔马直入河沟,波浪翻滚,惊涛怒吼,震声数里可闻。其形其声如巨壶沸腾,故名壶口。300 余米宽的滚滚黄河水至此突然收入壶口,有“千里黄河一壶收”之说。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

王云霞, 王晓莹, 杨连新, 李潘林, 朱建国, Kazuhiko Kobayashi, 王余龙. 臭氧胁迫使两优培九倒伏风险增加——FACE 研究. 生态学报, 2011, 31(20): 6098-6107.

Wang Y X, Wang X Y, Yang L X, Li P L, Zhu J G, Kazuhiko Kobayashi, Wang Y L. Ozone stress increases lodging risk of rice cultivar Liangyoupeijiu: a FACE study. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 6098-6107.

## 臭氧胁迫使两优培九倒伏风险增加 ——FACE 研究

王云霞<sup>1</sup>, 王晓莹<sup>1</sup>, 杨连新<sup>1,\*</sup>, 李潘林<sup>1</sup>, 朱建国<sup>2</sup>, Kazuhiko Kobayashi<sup>3</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/农业部长江中下游作物生理生态与栽培重点开放实验室, 扬州 225009;

2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 3. Department of Global Agricultural Sciences, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657 Japan)

**摘要:**近地层臭氧(O<sub>3</sub>)浓度升高使作物生长发育受到抑制进而使产量下降,但 O<sub>3</sub>胁迫条件下作物抗倒性状的变化及其可能原因均不清楚。FACE(Free Air gas Concentration Enrichment)试验在很少扰动的自然农田实施,其特有的空间优势为研究这一问题提供了最好的机会。依托全球唯一的稻田臭氧 FACE 技术平台,以杂交稻两优培九为供试材料,设置大气背景 O<sub>3</sub>浓度和高 O<sub>3</sub>浓度两个水平首次对这一问题进行了实验研究。结果表明:高 O<sub>3</sub>浓度使水稻抽穗期单茎(去除叶鞘)倒 5、倒 4 和倒 3 节间的平均倒伏指数分别增加 25%、16% 和 14%,使抽穗后 35 d 对应节间倒伏指数分别增加 13%、12% 和 2%,除抽穗后 35 d 倒 3 节间外均达显著或极显著水平;高浓度 O<sub>3</sub>使水稻抽穗期和抽穗后 35 d 植株倒 5、倒 4 和倒 3 节间的抗折力和弯曲力矩均下降,前者降幅明显大于后者;高 O<sub>3</sub>浓度对抽穗期和抽穗后 35 d 倒 5、倒 4、倒 3 和倒 2 和倒 1 节间的长度和粗度影响较小,但使各节间单位长度鲜重和干重一致下降,以单位长度干重降幅更大;高 O<sub>3</sub>浓度使结实期倒 5、倒 4、倒 3、倒 2 和倒 1 节间可溶性糖和淀粉含有率均下降,抽穗后 35 d 降幅大于抽穗期。以上数据表明,未来高浓度臭氧环境条件下两优培九结实期的倒伏风险明显增加,这主要与基部节间抗折能力明显削弱有关,而后者可能又与节间充实程度下降有关。

**关键词:**水稻;臭氧(O<sub>3</sub>);FACE(Free Air gas Concentration Enrichment);倒伏

## Ozone stress increases lodging risk of rice cultivar Liangyoupeijiu: a FACE study

WANG Yunxia<sup>1</sup>, WANG Xiaoying<sup>1</sup>, YANG Lianxin<sup>1,\*</sup>, LI Panlin<sup>1</sup>, ZHU Jianguo<sup>2</sup>, Kazuhiko Kobayashi<sup>3</sup>, WANG Yulong<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Crop Genetics & Physiology of Jiangsu Province / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation in Middle and Lower Reaches of Yangtze River of Ministry of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China

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

3 Department of Global Agricultural Sciences, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

**Abstract:** Lodging is the common problem in rice production, which causes great losses in both yield and grain quality. Rising tropospheric ozone concentration is currently one of the most important air pollutant which suppress plant growth and thus result in yield loss of crops. However little is known about effects of elevated ozone concentration ([O<sub>3</sub>]) on the lodging of rice and related mechanisms. Free Air gas Concentration Enrichment (FACE) system was designed to conduct gas fumigation experiments in natural fields, and spatial advantages of this technology offer the best chance for studying

**基金项目:**国家科技部国际科技合作计划项目(2009DFA31110);国家自然科学基金项目(30871486,31071359);日本环境厅全球环境研究基金项目(C-062);江苏省高校自然科学重大基础研究项目(08KJA210003);扬州大学科技创新培育基金(2008CXJ018 和 2009CXJ021)和江苏高校优势学科建设工程资助项目

收稿日期:2011-06-15; 修订日期:2011-08-01

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



ozone impacts on rice lodging. In this report, a FACE experiment was conducted in a paddy field ( $119^{\circ}42'0''\text{E}, 32^{\circ}35'5''\text{N}$ ) by using an unique FACE system in the world. A two-line hybrid rice cultivar Liangyoupeijiu was grown at ambient ( $A-O_3$ ) or elevated [ $O_3$ ] ( $E-O_3$ ). The effects of elevated [ $O_3$ ] on lodging-related traits of rice at heading or 35 days after heading (DAH) were investigated, including lodging index, bending moment, breaking-resistant strength, culm diameter, the fresh and dry weight per unit internode length, the concentration of soluble carbohydrates and starch of different internodes (without leaf sheath). Compared to the control, exposure to elevated [ $O_3$ ] increased lodging index of the fifth, fourth and third internodes from the top at heading by 25%, 16% and 14% respectively, at 35 days after heading (DAH) by 13%, 12% and 2% respectively. The bending moment as well as breaking-resistant strength of the fifth, fourth and third internodes from the top were decreased by elevated [ $O_3$ ] at heading and 35 DAH, but the decreases in breaking-resistant strength due to ozone stress were larger than in bending moment. Elevated [ $O_3$ ] had negligible effects on internode length or culm diameter of the fifth, fourth, third, second and first internodes from the top at heading and 35 DAH. However, the fresh weight and dry weight per unit length of the same internodes at heading and 35 DAH were reduced significantly by elevated [ $O_3$ ], the reduction in dry weight per unit length of each internode was more significant compared with that of fresh dry weight. Elevated [ $O_3$ ] decreased concentrations of soluble sugar and starch of all investigated internodes at heading and 35 DAH, and the decrease was more pronounced at late grain-filling stage. The above results indicate that lodging risk of Liangyoupeijiu will increase under future high ozone conditions. The decrease in lodging resistance of rice under ozone stress was associated with weakened basal internodes, which was revealed by significant decrease of breaking-resistance strength of these internodes under elevated [ $O_3$ ]. The latter was probably due to poor filling of basal internodes as showed by lower dry weight per unit internode length and reduced concentration of carbohydrates.

**Key Words:** rice; ozone ( $O_3$ ); lodging; Free Air gas Concentration Enrichment (FACE)

人类活动的加剧导致地球大气环境以前所未有的速度发生改变,其中包括近地层空气污染物臭氧( $O_3$ )浓度的迅速上升。目前白天地表 $O_3$ 浓度的瞬时峰值已经达到100—200 nL/L<sup>[1]</sup>,特别是中国中东部地区的 $O_3$ 浓度增幅更为明显,估计在20a内翻番<sup>[2-3]</sup>。大量证据表明,当前地表空气中的平均 $O_3$ 浓度已经超过敏感作物的伤害阈值(40 ppb),广泛地对野生和栽培植物产生肉眼可见的伤害,而未来 $O_3$ 浓度增加将使这种伤害变得更为严重<sup>[4-5]</sup>。因此,全球变化研究必须考虑近地层 $O_3$ 浓度升高对未来粮食安全的影响<sup>[6]</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>[8]</sup>。因此,准确评估臭氧胁迫对水稻的影响对减少未来世界粮食安全预测的不确定性具有更为重要的意义。

目前臭氧胁迫对水稻影响的报道很多,但主要集中在生长、生理以及产量形成等方面<sup>[7,9]</sup>,而臭氧对水稻形态结构的影响研究甚少,特别是高 $O_3$ 浓度环境下水稻抗倒性的变化尚未引起人们的注意<sup>[7]</sup>。前人研究表明臭氧胁迫不仅使水稻光合生产受到抑制,亦改变光合产物在不同器官中的分配<sup>[7]</sup>。例如Morikawa等<sup>[10]</sup>日光温室试验发现高 $O_3$ 浓度使水稻叶鞘和茎秆干重的降幅均大于叶片干重。Kobayashi等<sup>[11]</sup>大田封闭气室试验表明,随着 $O_3$ 浓度的增加,水稻抽穗期干重在叶片中的分配比例显著增加,而在叶鞘、茎秆以及根系中的分配比例显著减少;成熟期趋势基本一致,但响应幅度变小。Welfare等<sup>[12]</sup>封闭气室内盆栽水培试验表明,88 nL/L的 $O_3$ 连续处理水稻34 d对5个供试品种地上部干重影响较小,但使根系干重显著下降。臭氧胁迫下水稻根冠比下降在其它气室试验中亦有广泛报道<sup>[13-16]</sup>。综合前人研究可知高浓度 $O_3$ 环境下水稻分配至茎鞘和根系的光合产物变少,这种物质分配模式的变化,使水稻的整体力学特性向“头重脚轻”方向发展,增加了倒伏的风险,但由于研究手段的局限,迄今为止尚无直接的实验证据。前人水稻臭氧试验均是在狭小的封闭式或开顶式气室中实施,加上利用盆钵培育试验材料,因此无法对水稻倒伏这一群体现象进行研究<sup>[7]</sup>。大型FACE(Free air gas Concentration Enrichment)试验在很少扰动的自然农田实施,其特有的空间优势为研究高浓

度臭氧环境下水稻抗倒性变化及其机理提供了最好的机会。

本项目依托独特的中国 O<sub>3</sub>-FACE 平台,模拟本世纪中叶地球近地层臭氧浓度(比当前地表 O<sub>3</sub> 浓度增加 25% 左右<sup>[17]</sup>),以两优培九为试验材料,研究臭氧胁迫对水稻抗倒特性的影响及其可能原因,以期为未来大气变化背景下我国水稻的抗倒栽培提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地背景和臭氧 FACE 平台

本试验在中国臭氧 FACE 研究技术平台上进行。该平台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 °C,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。土壤类型为下位砂姜土,土壤理化性质为:有机碳 18.4 g/kg,全 N 1.45 g/kg,全 P 0.63 g/kg,全 K 14.0 g/kg,速效 P 10.1 mg/kg,速效 K 70.5 mg/kg,砂粒(2—0.02 mm)578.4 g/kg,粉砂粒(0.02—0.002 mm)285.1 g/kg,粘粒(<0.002 mm)136.5 g/kg,容重 1.16 g/cm<sup>3</sup>,pH 7.2。

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<sub>3</sub> 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<sub>3</sub> 气体,计算机系统根据大气中的 O<sub>3</sub> 浓度、风向和风速等因素自动调节 O<sub>3</sub> 释放的速度及方向,使 FACE 圈中心点冠层位置 O<sub>3</sub> 浓度始终保持比大气中 O<sub>3</sub> 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 至日落。当对照圈 O<sub>3</sub> 浓度低于 20 nL/L、下雨和露水等造成叶片湿润以及校正 O<sub>3</sub> 分析仪、检修设备的时候暂停放气,因此水稻生长季 FACE 圈内实际平均 O<sub>3</sub> 浓度比对照圈 O<sub>3</sub> 浓度只增加 25%。对照田块没有安装 FACE 管道,其余环境条件与自然状态一致。

### 1.2 材料培育

以两系杂交稻两优培九为供试材料。大田旱育秧,5 月 21 日播种,6 月 18 日移栽,行株距分别为 25 m 和 16.7 cm,每穴 1 苗。总施氮(N)量为 20 g/m<sup>2</sup>,其中 6 月 17 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 19 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 测定项目与方法

于抽穗期和抽穗后 35 d 分别在 FACE 和对照圈内取具代表性植株 5 穴,清洗去根,随机选 18 个单茎,平均分成 3 组,剩余单茎清洗后去根去叶,剥除各单茎叶鞘,按倒 1、倒 2、倒 3、倒 4、倒 5 节间分别剪断装袋,105 °C 杀青,80 °C 烘干至恒重,粉样过筛(100 目)后用蒽酮比色法<sup>[18]</sup>测定可溶性糖和淀粉的含量。

(1)第一组 6 个单茎去除叶鞘后,分倒 1、2、3、4 和 5 节间(穗下第一节间为倒 1 节间,依此类推)切开,用直尺测量各节间长度,游标卡尺测量各节间中部的粗度,弹簧秤拉力法测定各节间抗折力。在测量各节间抗折力之前先测量该节间基部至穗顶的长度和鲜重。抗折力的测定方法:将节间放在两个铁架台的固定点上,固定点相距 5 cm(节间长度不足 5 cm,可相应调整固定点,测后再换算),固定点距地面 50 cm,拉力作用在两固定点的中点,拉力方向与节间垂直,记录折断瞬间力的最大值(即弹簧秤示数和弹簧秤本身重量之和)。按濂古秀生<sup>[19]</sup>的方法计算每个节间的弯曲力矩和倒伏指数。其中弯曲力矩=节间基部至穗顶的长度(cm)×该节间基部至穗顶的鲜重(g)×0.001×9.8,倒伏指数=弯曲力矩/抗折力×100。倒伏指数 200 为抗倒伏临界值<sup>[19]</sup>。

(2)第二组 6 个保留叶鞘单茎重复(1)操作。

(3)第三组结合前二组用于测定各节间单位长度鲜重和单位长度干重:18 个单茎均去除叶鞘,分节间收集,然后分组称重计算单位长度鲜重;108 °C 杀青 30 min,80 °C 烘干 72 h 至恒重,再分组称重计算单位长度干重。其中单位长度鲜重(mg/cm)= 每组总鲜重(g)/每组节间总长(cm)×1000;单位长度干重(mg/cm)= 每组

总干重(g)/每组节间总长(cm)×1000。

#### 1.4 数据处理

本试验为单因素随机区组设计,试验重复3次。采用 Microsoft Excel 进行数据处理和作图,SPSS13.0 软件进行差异显著性分析,显著水平设  $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ 、 $P < 0.1$ 、 $P > 0.1$ ,分别用 \*\*、\*、+和 ns 表示。数据表示为平均值±标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 倒伏指数

由于去叶鞘和保留叶鞘单茎倒伏指数对高  $O_3$  浓度的响应趋势基本一致,本文只列出去叶鞘单茎倒伏指数的变化(图1)。由图可知,(1)无论是抽穗期还是抽穗后35 d,去叶鞘单茎倒伏指数倒3节间>倒4节间>倒5节间,说明植株基部节间的抗倒能力明显大于上部节间。(2)抽穗后35 d各节间倒伏指数明显大于抽穗期对应节间的倒伏指数,说明随着生育进程的推移,顶部稻穗重量不断增加,抗倒能力明显下降。(3)臭氧胁迫使抽穗期和抽穗后35 d各节间倒伏指数均增加:从抽穗期看,高  $O_3$  浓度使倒5、倒4、倒3节间以及这3个节间的平均倒伏指数分别增加25.4%、16.1%、13.8%和17.6%,均达显著或极显著水平。从抽穗后35 d看,高  $O_3$  浓度使对应节间以及3个节间的平均倒伏指数分别增加13.0%、11.9%、1.6%和7.8%,除倒3节间外均达显著水平。由此可见,未来高臭氧浓度的大气环境下水稻倒伏风险明显增加,灌浆前期增幅大于灌浆后期。

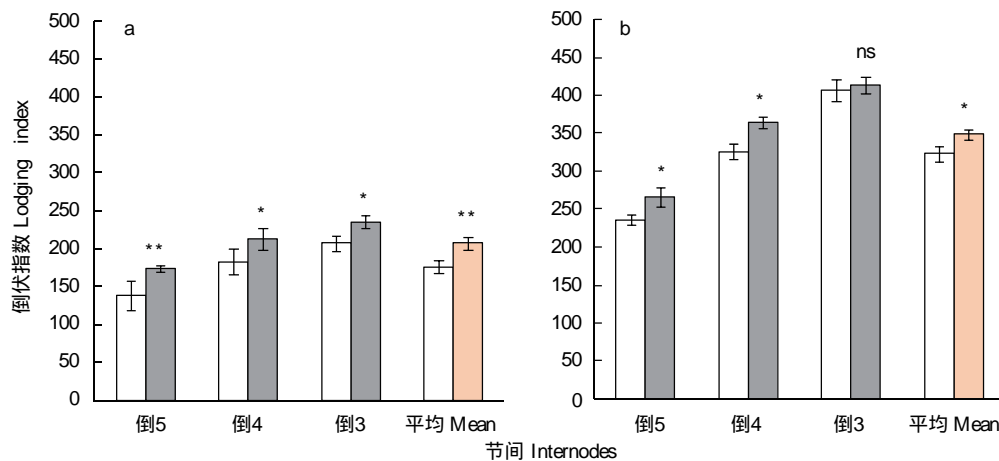


图1 大气  $O_3$  浓度(白色)和高  $O_3$  浓度(灰色或粉色)条件下水稻抽穗期(a)和穗后35 d(b)去叶鞘单茎基部节间的倒伏指数

Fig. 1 Lodging index of basal internodes at heading (a) and 35 days after heading (b) of rice grown under ambient or elevated ozone concentration

V、IV、III 分别表示倒5、倒4和倒3节间

### 2.2 抗折力和弯曲力矩

高  $O_3$  浓度对两优培九去叶鞘单茎抗折力的影响示于图2。由图可知,(1)无论是抽穗期还是抽穗后35 d,去叶鞘单茎抗折力倒5节间>倒4节间>倒3节间,说明愈下部的节间其材质愈密实,抗弯折的强度亦愈高。(2)抽穗后35 d各节间抗折力均小于抽穗期对应节间的抗折力,说明随着生育进程的推移水稻抗折强度呈下降趋势,这可能与穗后茎鞘中营养物质向籽粒转运,茎秆机械强度随之降低有关。(3)臭氧胁迫使水稻抽穗期和抽穗后35 d各节间抗折力下降:从抽穗期看,高  $O_3$  浓度使去叶鞘单茎倒5、倒4、倒3节间以及这3个节间的平均抗折力分别下降19.2%、21.4%、24.5%和21.1%,均达极显著水平。从抽穗期35 d看,高浓度  $O_3$  使对应节间以及3个节间的平均抗折力分别下降24.5%、16.8%、9.7%和19.2%,均达显著或极显著水平。可见,未来高浓度臭氧环境下水稻基部3个节间的抗折断能力均将大幅下降。

高浓度  $O_3$  对两优培九去叶鞘单茎弯曲力矩的影响示于图2c和图2d。由图可知,(1)无论是抽穗期还是

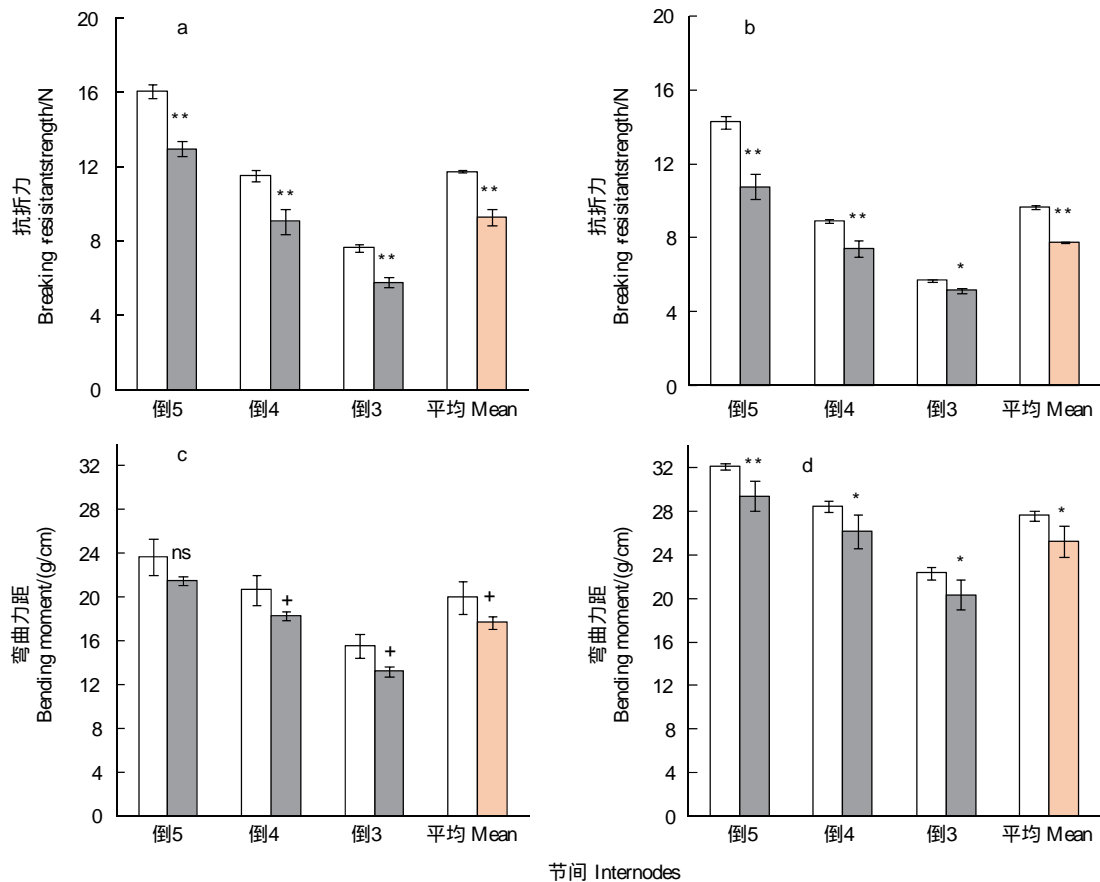


图2 大气 O<sub>3</sub> 浓度(白色)和高 O<sub>3</sub> 浓度(灰色或粉色)条件下两优培九抽穗期(a,c)和抽穗后 35 d(b,d)去叶鞘单茎基部节间的抗折力和弯曲力矩

Fig. 2 Breaking resistant strength and bending moment of basal internodes at heading (a, c) and 35 days after heading (b, d) of rice grown under ambient or elevated ozone concentration

抽穗后 35 d, 去叶鞘单茎弯曲力矩倒 5 节间>倒 4 节间>倒 3 节间, 植株下部节间的弯曲力矩明显大于上部节间。(2)抽穗后 35 d 各节间弯曲力矩均大于抽穗期对应节间的弯曲力矩, 这一变化趋势与籽粒灌浆时穗重迅速增加相一致。(3)高 O<sub>3</sub> 浓度使抽穗后 35 d 去叶鞘单茎倒 5、倒 4、倒 3 节间以及这 3 个节间的平均弯曲力矩分别下降 8.4%、8.0%、8.8% 和 8.7%, 均达显著或极显著水平。抽穗期趋势基本一致, 但响应幅度变小; 臭氧胁迫下倒 4、倒 3 以及 3 个节间的平均弯曲力矩降幅达 0.1 显著水平。由此可见, 未来高浓度臭氧环境下水稻弯曲力矩呈下降趋势, 随生育进程推移降幅增大。

### 2.3 节间长度和节间粗度

高 O<sub>3</sub> 浓度对两优培九各节间长度和粗度的影响示于图 3。由图可知, (1) 无论是抽穗期还是抽穗后 35 d, 节间长度倒 1 节间>倒 2 节间>倒 3 节间>倒 4 节间>倒 5 节间(图 3a,b), 而节间粗度大小顺序正好相反(图 3c,d); (2) 抽穗后 35 d 倒 1、2 节间长度明显大于抽穗期对应节间长度(图 3a,b), 但各节间粗度两期均无显著差异(图 3c,d), 说明抽穗后最上两个节间尚未停止伸长, 但节间粗度已相对稳定; (3) 高浓度 O<sub>3</sub> 使抽穗期倒 3、倒 4 和倒 5 节间长度略有增加, 使倒 2 和倒 1 节间长度略有减少(图 3a), 使抽穗后 35 d 各节间长度均呈减小趋势(图 3b), 但由于变幅较小, 均未达 0.05 显著水平。高浓度 O<sub>3</sub> 对各节间粗度的影响亦多未达显著水平(图 3c,d)。由此可见, 近地层高浓度臭氧升高对两优培九各节间长度和粗度的影响均较小。

### 2.4 单位长度鲜重和单位长度干重

高 O<sub>3</sub> 浓度对两优培九各节间单位长度鲜重和干重的影响示于图 4。由图 4 可知, (1) 无论是抽穗期还是



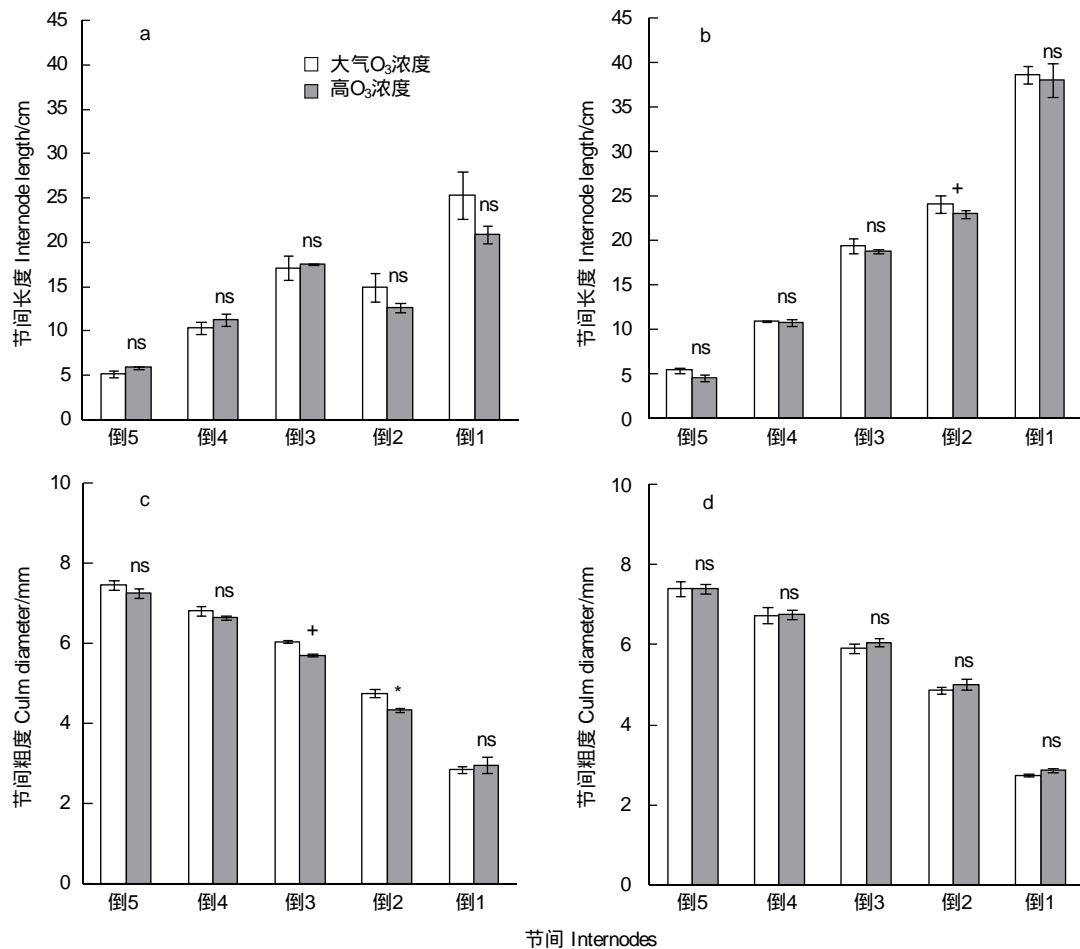


图3 大气O<sub>3</sub>浓度和高O<sub>3</sub>浓度条件下两优培九抽穗期(a,c)和抽穗后35 d(b,d)各节间的长度和粗度

Fig. 3 Internode length and culm diameter of different internodes at heading (a, c) and 35 days after heading (b, d) of rice grown under ambient or elevated ozone concentration

抽穗后35 d,单位长度鲜重倒5节间>倒4节间>倒3节间>倒2节间>倒1节间(图4a,b),单位长度干重的变化趋势亦是如此:即随着节位的上移直线下降(图4c,d),说明植株下部节间的充实程度明显大于上部节间。(2)抽穗期和抽穗后35 d对应节间的单位长度鲜重和干重差异较小(图4)。(3)高O<sub>3</sub>浓度使抽穗期和抽穗后35 d各节间单位长度鲜重均下降(图4a,b):抽穗期高O<sub>3</sub>浓度使倒5、倒4、倒3、倒2和倒1节间单位长度鲜重分别减少6.2%、9.1%、8.0%、14.3%和7.3%,倒1节间达0.1显著水平,其余节间均达0.05或0.01显著水平;抽穗后35 d与抽穗期趋势一致,但降幅(1.8%—8.3%)明显小于抽穗期。(4)对单位长度干重而言,高O<sub>3</sub>浓度使抽穗期倒5、倒4、倒3、倒2和倒1节间单位长度干重分别减少14%、20%、21%、18%和10%,使抽穗后35 d对应节间的单位长度干重分别减少29%、29%、28%、25%和12%,均达显著或极显著水平(图4c,d)。由此可见,未来高浓度臭氧环境下水稻单位长度鲜重和干重均下降,后者更为明显。

## 2.5 可溶性糖和淀粉含量

高O<sub>3</sub>浓度对两优培九各节间可溶性糖的影响示于图5a,b。由图可知,(1)倒3和倒2节间的可溶性糖含量大于其它节间的可溶性糖含量,抽穗后35 d更为明显。(2)抽穗后35 d倒5、倒4、倒3和倒2节间的可溶性糖含量与抽穗期对应节间的可溶性含量差异较小,但倒1节间的可溶性糖含量明显低于抽穗期。(3)高O<sub>3</sub>浓度使抽穗期和抽穗后35 d各节间可溶性糖含量均降低(图5a,b):对抽穗期而言,臭氧胁迫下倒5、倒4、倒3、倒2和倒1节间可溶性糖含量分别减少5.0%、6.0%、6.6%、6.4%和3.5%,其中倒5、倒2和倒1节间达0.1显著水平。对抽穗后35 d而言,对应节间可溶性糖含量分别减少9.5%、1.4%、24.9%、6.1%和0.1%,

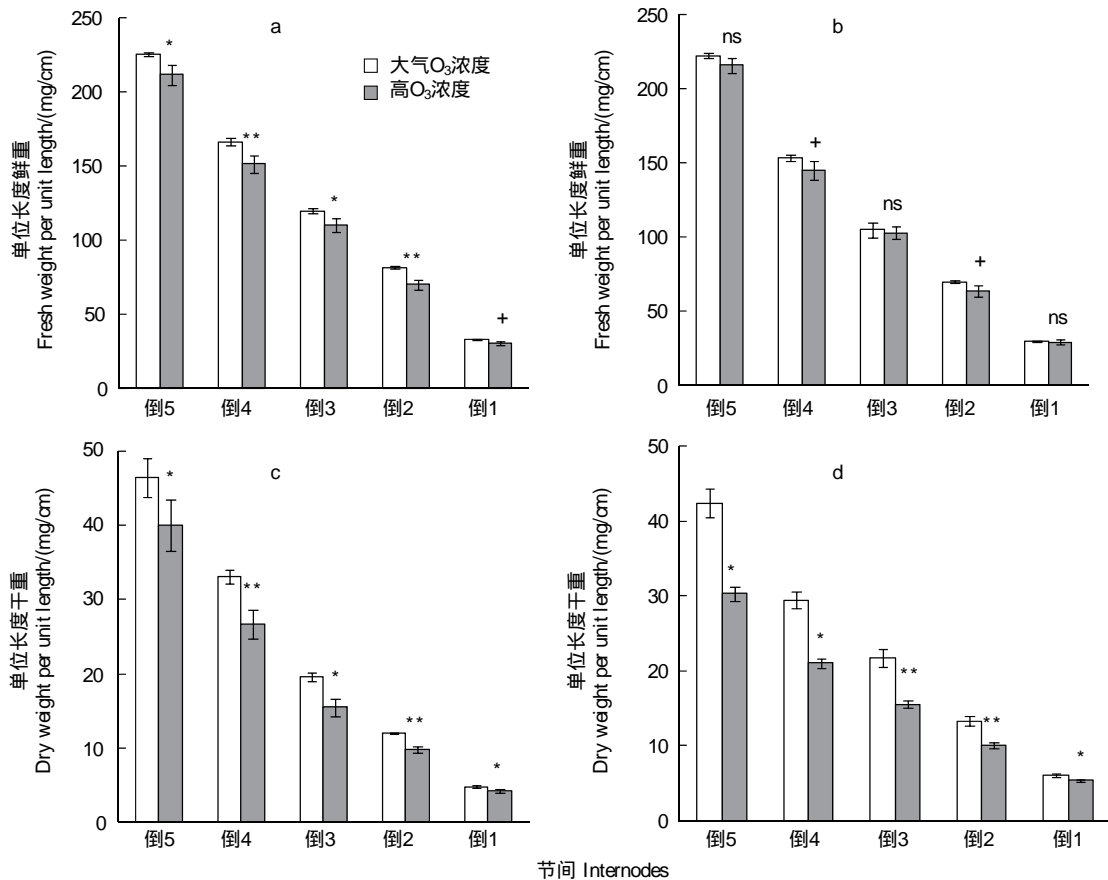


图4 大气O<sub>3</sub>浓度和高O<sub>3</sub>浓度条件下两优培九抽穗期(a,c)和抽穗后35 d(b,c)不同节间的单位长度鲜重和单位长度干重

Fig. 4 Fresh and dry weight per unit length of different internodes at heading (a, c) and 35 days after heading (b, d) of rice grown under ambient or elevated ozone concentration [O<sub>3</sub>]

其中倒5和倒3节间达极显著水平。

高O<sub>3</sub>浓度对两优培九各节间淀粉含量的影响示于图5c,d。由图可知,(1)抽穗期和抽穗后35 d各节间淀粉含量总体上倒5节间>倒4节间>倒3节间>倒2节间>倒1节间(图5c,d)。(2)抽穗后35 d基部倒5和倒4节间淀粉含量明显低于抽穗期对应节间的淀粉含量。(3)高O<sub>3</sub>浓度使抽穗期倒5、倒4、倒3、倒2和倒1节间淀粉含量分别减少3.9%、3.0%、13.1%、9.0%和1.1%,其中倒5和倒3节间分别达0.1和0.01显著水平;高O<sub>3</sub>浓度使抽穗后35 d对应节间淀粉含量分别减少31.6%、17.5%、24.0%、7.6%和24.3%,基部3个节间达极显著水平。

可见,未来高浓度O<sub>3</sub>环境下水稻各节间可溶性糖和淀粉含量均下降,结实后期降幅更为明显。

### 3 讨论

水稻是我国最重要的粮食作物之一,倒伏是稻作生产中常见的问题。倒伏降低水稻产量和品质,增加收获困难和成本<sup>[20]</sup>。近地层迅速上升的O<sub>3</sub>浓度对农作物的负面影响已有较多报道,特别是产量方面。但由于气室研究的局限性,迄今为止还没有一例关于O<sub>3</sub>胁迫对水稻抗倒伏影响的报道。本研究利用FACE试验特有的空间优势,首次开展这方面的研究。

日本学者濑古秀生<sup>[19]</sup>首先提出用倒伏指数评价水稻品种的抗倒伏能力。由于该指标既考虑了株高和鲜重等形态特性,同时也考虑了抗折力等力学特性,故具有较强的综合评价性能。一般水稻倒伏指数越大,其抗倒伏能力越弱,反之亦然<sup>[21]</sup>。本研究表明,近地层O<sub>3</sub>浓度升高25%左右使两优培九抽穗期和抽穗后35 d基部3个节间的平均倒伏指数分别增加18%和8%,达极显著和显著水平(图1)。从不同节间看,臭氧胁迫下

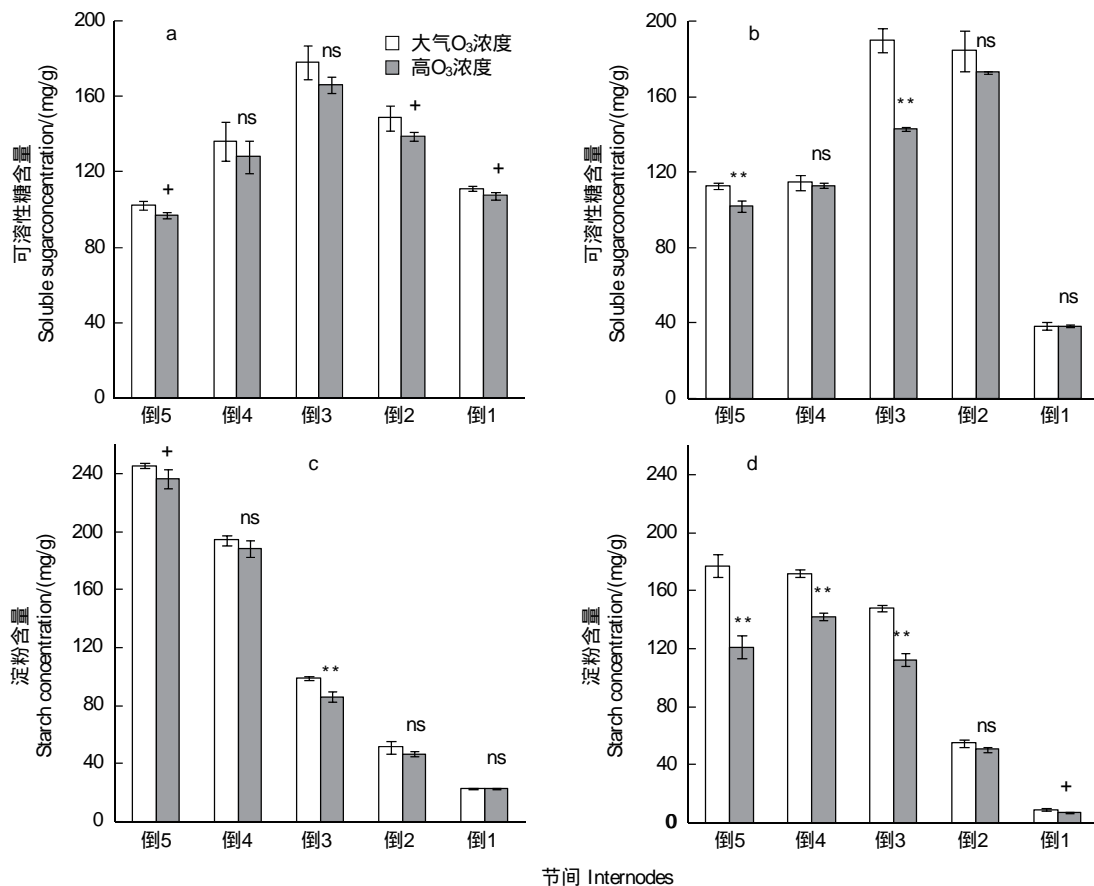


图5 大气 O<sub>3</sub> 浓度和高 O<sub>3</sub> 浓度条件下两优培九抽穗期(a,c)和抽穗后 35 d(b,d)不同节间的可溶性糖和淀粉含量

Fig. 5 Concentration of soluble sugar and starch of different internodes at heading (a, c) and 35 days after heading (b, d) of rice grown under ambient or elevated ozone concentration

倒5和倒4节间的倒伏指数增幅更为明显(图1)。这一结论与试验过程中田间可见倒伏程度的实际观测结果完全一致。本文首次以实验数据证明未来近地层 O<sub>3</sub> 浓度升高情形下两优培九倒伏的风险明显增大,其它品种或其它类型品种(如常规籼稻和常规粳稻)对 O<sub>3</sub> 胁迫的响应尚需进一步研究。

水稻倒伏指数为弯曲力矩和抗折力的函数,即倒伏指数=弯曲力矩/抗折力×100<sup>[19]</sup>。本研究表明臭氧胁迫使抽穗期和抽穗后 35 d 基部 3 个节间弯曲力矩和抗折力均下降(图2)。弯曲力矩下降使水稻抗倒能力增强,抗折力下降则使水稻抗倒能力减弱。由于臭氧胁迫下抗折力的降幅明显大于弯曲力矩的降幅(图2),导致倒伏指数显著增加(图1)。由此可见,高浓度 O<sub>3</sub> 环境下水稻茎秆抗折力下降是其倒伏风险增加的主要原因。弯曲力矩的计算公式为节间基部至穗顶的长度(cm)×该节间基部至穗顶的鲜重(g)×0.001×9.8<sup>[19]</sup>。本研究发现高 O<sub>3</sub> 浓度对节间基部至穗顶的长度影响较小,但对节间基部至穗顶鲜重的影响较大(数据未列出),说明 O<sub>3</sub> 胁迫下弯曲力矩下降主要与节间基部至穗顶的鲜重减少有关。本研究还发现抽穗后 35 d 基部节间弯曲力矩对臭氧的响应明显大于抽穗期(图2),这一现象与同一 FACE 平台的其它试验结果相一致;Shi 等<sup>[22]</sup>和杨开放等<sup>[23]</sup>报道高 O<sub>3</sub> 浓度使两优培九稻穗变小变轻(P<0.05)。稻穗变轻有利于减少茎秆的负荷,这可能亦是 O<sub>3</sub> 胁迫对两优培九结实后期倒伏指数的影响小于抽穗期(图1)的主要原因。

水稻抗倒性是否与茎粗等形态性状有关,不同研究者观点不一致。有的研究者认为增加茎粗有利于提高水稻茎秆的抗倒伏性能<sup>[24]</sup>,但也有报道认为茎秆粗度(或直径)等形态学特征与抗折力和倒伏指数关系不密切<sup>[25-26]</sup>。本试验研究表明,高 O<sub>3</sub> 浓度使两优培九结实期倒5、倒4、倒3、倒2、倒1节间平均粗度和长度略有下降,但多未达显著水平(图3)。说明本试验条件下茎粗或茎长的变化可能不是影响两优培九茎秆机械强度

和抗倒性的主要因子。

单位长度重量反映了水稻茎秆的充实程度。大量研究表明水稻茎秆单位长度重量与抗倒能力呈正相关<sup>[20, 24-25, 27]</sup>。本试验表明,高 O<sub>3</sub>浓度使抽穗期和抽穗后 35 d 倒 5、倒 4、倒 3、倒 2 和倒 1 节间的单位长度鲜重和干重均下降,多数节间降幅达显著或极显著水平,特别是各节间的单位长度干重。这一结果说明臭氧胁迫下水稻结实期节间充实程度明显下降可能是其抗倒能力降低的重要因素。

茎秆中贮藏物质的多少及组成成分决定作物的抗倒性能<sup>[20]</sup>。水稻茎秆中充实的物质,主要指蔗糖和多糖等碳水化合物,特别是多糖的积累,它能促进纤维素及半纤维素的形成,使茎壁增厚且弹性增强<sup>[28]</sup>,因此一般水稻基部节间淀粉和可溶性糖含量越高,则抗倒性越强<sup>[26-27, 29-30]</sup>。本研究发现高 O<sub>3</sub>浓度使抽穗期和抽穗后 35 d 倒 5、倒 4、倒 3、倒 2 和倒 1 节间可溶性糖和淀粉含量下降,两期各节间多达显著或极显著水平,以抽穗后 35 d 降幅更为明显(图 5)。说明大气 O<sub>3</sub>浓度升高环境下水稻结实期贮藏的可溶性糖和淀粉含量降低使得茎秆充实不良,可能是造成抗倒能力降低的重要因素。

综上所述,本世纪中叶近地层臭氧浓度(大约比目前大气 O<sub>3</sub>浓度高 25%)使两优培九的倒伏风险明显增加(表现在倒伏指数增加),这种变化主要与 O<sub>3</sub>胁迫下水稻基部节间抗折断能力下降有关,而后者又是基部节间充实不良(表现在单位长度重量和非结构性碳水化合物含量降低)所致。这些结果对未来高浓度臭氧背景下稻作生产适应策略的制订有指导意义。从品种角度看,选用高产抗倒的水稻品种可能是高浓度 O<sub>3</sub>环境下减少产量损失的重要适应措施。从栽培角度看,未来高浓度 O<sub>3</sub>环境条件的水稻管理策略应作出相应调整以增加水稻生育中期茎秆的光合积累,促进茎秆充实,进而降低倒伏风险,以实现产量损失最小化的目的。

**致谢:** 感谢中国科学院南京土壤研究所刘钢研究员和唐昊冶老师对臭氧 FACE 系统的日常维护这为本试验的实施提供了硬件保障。

#### References:

- [ 1 ] Ashmore M R. Assessing the future global impacts of ozone on vegetation. *Plant, Cell and Environment*, 2005, 28(8): 949-964.
- [ 2 ] Wang H X, Kiang C S, Tang X Y, Zhou X J, Chameides W L. Surface ozone: a likely threat to crops in Yangtze delta of China. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(21): 3843-3850.
- [ 3 ] Wang X K, Manning W, Feng Z W, Zhu Y G. Ground-level ozone in China: distribution and effects on crop yields. *Environmental Pollution*, 2007, 147(2): 394-400.
- [ 4 ] Skelly J M, Innes J L, Savage J E, Snyder K R, Vanderheyden D, Zhang J and Sanz M J. Observation and confirmation of foliar ozone symptoms of native plant species of Switzerland and southern Spain. *Water, Air and Soil Pollution*, 1999, 116(1/2): 227-234.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] 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<sub>3</sub>) concentration: a review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(4): 901-910.
- [ 8 ] IRRI. *Rice Almanac: Source Book for the Most Important Economic Activity on Earth*. 3rd ed. Oxford: CABI Publishing, 2002.
- [ 9 ] 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(7): 1642-1650.
- [ 10 ] Morikawa M, Matsumaru T, Matsuoka Y, Shiratori K. The effect of ozone on the growth of rice plants. *Bulletin of the Chiba Prefectural Agricultural Experiment Station*, 1980, 21: 11-18.
- [ 11 ] Kobayashi K, Okada M, Nouchi I. 1995. Effects of ozone on dry matter partitioning and yield of Japanese cultivars of rice (*Oryza sativa* L.). *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 1995, 53(2): 109-122.
- [ 12 ] Welfare K, Flowers T J, Taylor G, Yeo A R. Additive and antagonistic effects of ozone and salinity on the growth, ion contents and gas exchange of five varieties of rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Pollution*, 1996, 92(3): 257-266.
- [ 13 ] Nouchi I, Ito O, Harazono Y, Kobayashi K. Effects of chronic ozone exposure on growth, root respiration and nutrient uptake of rice plants. *Environmental Pollution*, 1991, 74(22): 149-164.
- [ 14 ] Olszyk D M, Wise C. Interactive effects of elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> on rice and *flacca* tomato. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1997, 66(1): 1-10.
- [ 15 ] Jin M H, Feng Z W, Zhang F Z. Impacts of ozone on the biomass and yield of rice in open-top chambers. *Journal of Environmental Sciences*,



- 2001, 13(2): 233-236.
- [16] Ariyaphanphitak W, Chidthaisong A, Sarobol E, Bashkin V N, Towprayoon S. Effects of elevated ozone concentrations on Thai Jasmine rice cultivars (*Oryza sativa* L.). *Water, Air and Soil Pollution*, 2005, 167(1/4): 179-200.
- [17] 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 L, 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.
- [18] Cai W C, Yuan H J. Chemical Analysis Methods of Biomaterials. Beijing: Sciences Press, 1982: 15-16.
- [19] 瀨古秀生. 水稻の倒伏に関する研究. 九州农试汇报, 1962, 7: 419-495.
- [20] Islam M S, Peng S B, Visperas R M, Visperas R M, Ereful N, Bhuiya M S U, Julfikar A W. Lodging-related morphological traits of hybrid rice in a tropical irrigated ecosystem. *Field Crops Research*, 2007, 101(2): 240-248.
- [21] Ookawa T, Ishihara K V. Differences in the physical characteristics of the culm in relation to lodging resistance in paddy rice. *Japanese Journal of Crop Science*, 1992, 61(3): 419-425.
- [22] Shi G Y, Yang L X, Wang Y X, Kobayashi K, Zhu J G, Tang H Y, Pan S T, Chen T, Liu G, Wang Y L. Impact of elevated ozone concentration on yield of four Chinese rice cultivars under fully open-air field conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 131(3/4): 178-184.
- [23] Yang K F, Yang L X, Wang Y X, Shi G Y, Lai S K, Zhu J G, Kobayashi K, Wang Y L. Effects of increasing surface ozone concentration on spikelet formation of hybrid rice cultivars. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(3): 609-614.
- [24] Huang Y L, Shi Y Y, Shen G L, Shi Y J, Wang W G, Chen D P. Study on the relationship between rice lodging resistance and culm traits and the yield factors. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(4): 203-206.
- [25] Yang H J, Yang R C, Li Y Z, Jiang Z W, Zheng J S. Relationship between culm traits and lodging resistance of rice cultivars. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2000, 15(2): 1-7.
- [26] Kashiwagi T, Ishimaru K. Identification and functional analysis of a locus for improvement of lodging resistance in rice. *Plant Physiology*, 2004, 134(2): 676-683.
- [27] Sato K. Studies on the starch contained in the tissues of rice plant IV. Starch content in the culm related to lodging. *Proceedings of Japanese Crop Science Society*, 1957, 26: 19-21.
- [28] Zhou L H. Effects of stem physiological properties on lodging resistance in hybrid rice *Journal of Henan Agricultural Sciences*. 2006, (10): 20-23
- [29] Liu L J, Yuan L M, Wang Z Q, Xu G W, Chen Y. Preliminary studies on physiological reason and countermeasure of lodging in dry-cultivated rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 2002, 16(3): 225-230.
- [30] Kashiwagi T, Madoka Y, Hirotsu, N, Ishimaru K. Locus *pr15* improves lodging resistance of rice by delaying senescence and increasing carbohydrate reaccumulation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2006, 44(2/3): 152-157.
- [31] Ishimaru K, Togawa E, Ookawa T, Kashiwagi T, Madoka Y, Hirotsu N. New target for rice lodging resistance and its effect in a typhoon. *Planta*, 2008, 227(3): 601-609.

#### 参考文献:

- [6] 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.
- [7] 杨连新, 王余龙, 石广跃, 王云霞, 朱建国, Kobayashi K, 赖上坤. 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.
- [18] 蔡武城, 袁厚积. 生物物质常用化学分析法. 北京: 科学出版社, 1982: 15-16.
- [23] 杨开放, 杨连新, 王云霞, 石广跃, 赖上坤, 朱建国, Kobayashi K, 王余龙. 近地层臭氧浓度升高对杂交稻颖花形成的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 609-614.
- [24] 黄艳玲, 石英尧, 申广勒, 石扬娟, 王维刚, 陈多璞. 水稻茎秆性状与抗倒伏及产量因子的关系. *中国农学通报*, 2008, 24(4): 203-206.
- [25] 杨惠杰, 杨仁崔, 李义珍, 姜照伟, 郑景生. 水稻茎秆性状与抗倒性的关系. *福建农业学报*, 2000, 15(2): 1-7.
- [28] 周丽华. 杂交稻茎秆生理特性对其抗倒伏能力的影响. *河南农业科学*, 2006, (10): 20-23.
- [29] 刘立军, 袁莉民, 王志琴, 徐国伟, 陈云. 旱种水稻倒伏生理原因分析与对策的初步研究. *中国水稻科学*, 2002, 16(3): 225-230.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 20 October, 2011 (Semimonthly)

## CONTENTS

- Community structure and diversity of macrobenthos in the intertidal zones of Yangshan Port ..... WANG Baoqiang, XUE Junzeng, ZHUANG Hua, et al (5865)
- Variation characteristics of macrobenthic communities structure in tianjin coastal region in summer ..... FENG Jianfeng, WANG Xiuming, MENG Weiqing, et al (5875)
- Analysis of habitat connectivity of the Yunnan snub-nosed monkeys (*Rhinopithecus bieti*) using landscape genetics ..... XUE Yadong, LI Li, LI Diqiang, WU Gongsheng, et al (5886)
- Study on the spatial pattern of wetland bird richness and hotspots in Sanjiang Plain ..... LIU Jiping, LÜ Xianguo (5894)
- Dynamic analysis of coastal region cultivated land landscape ecological security and its driving factors in Jiangsu ..... WANG Qian, JIN Xiaobin, ZHOU Yinkang (5903)
- Landscape pattern gradient on tree canopy in the central city of Guangzhou, China ..... ZHU Yaojun, WANG Cheng, JIA Baoquan, et al (5910)
- Research on dynamic changes of landscape structure and land use eco-security; a case study of Jiansanjiang land reclamation area ..... LIN Jia, SONG Ge, SONG Siming (5918)
- Shangri-La county ecological land use planning based on landscape security pattern ..... LI Hui, YI Na, YAO Wenjing, WANG Siqi, et al (5928)
- Changes of paddy field landscape and its influence factors in a typical town of south Jiangsu Province ..... ZHOU Rui, HU Yuanman, SU Hailong, et al (5937)
- Species composition and succession of swamp vegetation along grazing gradients in the Zoige Plateau, China ..... HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang, et al (5946)
- Characteristics and influence factors of the swamp degradation under the stress of grazing in the Zoige Plateau ..... LI Ke, YANG Yongxing, YANG Yang, et al (5956)
- Variation of organic pollution in the last twenty years in the Qinzhou bay and its potential ecological impacts ..... LAN Wenlu (5970)
- Response of radial growth Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) to climate factors in Wanxian Mountain of He'nan Province ..... PENG Jianfeng, YANG Airong, TIAN Qinhua (5977)
- Vegetation and species diversity change analysis in 50 years in Tashan Mountain, Shandong Province, China ..... GAO Yuan, CHEN Yufeng, DONG Heng, et al (5984)
- Effect of urban heat island on plant growth and adaptability of leaf morphology constitute ..... WANG Yating, FAN Lianlian (5992)
- Effects of shading on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of the endangered plant *Thuja sutchuenensis* ..... LIU Jianfeng, YANG Wenjuan, JIANG Zeping, et al (5999)
- Effects of shading on growth and quality of triennial *Clematis manshurica* Rupr. .... HAN Zhongming, ZHAO Shujie, LIU Cuijing, et al (6005)
- Allelopathic effect of extracts from *Artemisia sacrorum* leaf and stem on four dominant plants of enclosed grassland on Yunwu Mountain ..... WANG Hui, XIE Yongsheng, YANG Yali, et al (6013)
- Effects of soil base cation composition on plant distribution and diversity in coastal wetlands of Hangzhou Bay, East China ..... WU Tonggui, WU Ming, YU Mukui, et al (6022)
- Species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi of *Stipa* L. in alpine grassland in northern Tibet in China ..... CAI Xiaobu, PENG Yuelin, YANG Minna, et al (6029)
- Water consumption and annual variation of transpiration in mature *Acacia mangium* Plantation ..... ZHAO Ping, ZOU Lvliu, RAO Xingquan, et al (6038)
- Foliar phenotypic plasticity of a warm-temperate shrub, *Vitex negundo* var. *heterophylla*, to different light environments in the field ..... DU Ning, ZHANG Xiuru, WANG Wei, et al (6049)

An case study on vegetation stability in sandy desertification land; determination and comparison of the resilience among communities after a short period of extremely aridity disturbanc .....	ZHANG Jiyi, ZHAO Halin (6060)
Response of soil quality indicators to comprehensive amelioration measures in coastal salt-affected land .....	SHAN Qihua, ZHANG Jianfeng, RUAN Weijian, et al (6072)
Fine-scale spatial associations of <i>Stipa krylovii</i> and <i>Stellera chamaejasme</i> population in alpine degraded grassland .....	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6080)
The response of community-weighted mean plant functional traits to environmental gradients in Yanhe river catchment .....	GONG Shihui, WEN Zhongming, SHI Yu (6088)
Ozone stress increases lodging risk of rice cultivar Liangyoupeijiu; a FACE study .....	WANG Yunxia, WANG Xiaoying, YANG Lianxin, et al (6098)
Effect of sugarcane//soybean intercropping and reduced nitrogen rates on sugarcane yield, plant and soil nitrogen .....	YANG Wenting, LI Zhixian, SHU Lei, et al (6108)
Effect of wetting duration on nitrogen fixation of biological soil crusts in Shapotou, Northern China .....	ZHANG Peng, LI Xinrong, HU Yigang, et al (6116)
Effects of zinc on the fruits' quality of two eggplant varieties .....	WANG Xiaojing, WANG Huimin, WANG Fei, et al (6125)
Rapid light-response curves of PS II chlorophyll fluorescence parameters in leaves of <i>Salix leucopithecia</i> subjected to cadmium-ion stress .....	QIAN Yongqiang, ZHOU Xiaoxing, HAN Lei, et al (6134)
Physiological Response of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. to Lead Stress by FTIR Spectroscopy .....	XUE Shengguo, ZHU Feng, YE Sheng, et al (6143)
Physiological response of <i>Zoysia japonica</i> to Cd <sup>2+</sup> .....	LIU Junxiang, SUN Zhenyuan, JU Guansheng, et al (6149)
Biosorption of Cd <sup>2+</sup> using the fruiting bodies of two macrofungi .....	LI Weihuan, MENG Kai, LI Junfei, et al (6157)
Factors regulating recruitment of <i>Microcystis</i> from the sediments of the eutrophic Shanzai Reservoir .....	SU Yuping, LIN Hui, ZHONG Houzhang, et al (6167)
A new type of insect trap and its trapping effect on <i>Cyrtotrachelus buqueti</i> .....	YANG Yaojun, LIU Chao, WANG Shufang, et al (6174)
Photoperiod influences diapause induction of Oriental Fruit Moth(Lepidoptera: Tortricidae) .....	HE Chao, MENG Quanke, HUA Lei, et al (6180)
Influence of edge effects on arthropods communities in agroforestry ecological systems .....	WANG Yang, WANG Gang, DU Yingqi, et al (6186)
Dynamics of land use and its ecosystem services in China's megacities .....	CHENG Lin, LI Feng, DENG Huafeng (6194)
Comprehensive assessment of urban ecological risks; the case of Huaibei City .....	CHANG Hsiaoifei, WANG Rusong, LI Zhengguo, et al (6204)
The dynamics of surface heat status of Tangshan City in 1993—2009 .....	JIA Baoquan, QIU Erfa, CAI Chunju (6215)
A projection-pursuit based model for evaluating the resource-saving and environment-friendly society and its application to a case in Wuhan .....	WANG Qianqian, ZHOU Jingxuan, LI Xiangmei, et al (6224)
Research on ecological barrier to Chang-Zhu-Tan metropolitan area .....	XIA Benan, WANG Fusheng, HOU Fangzhou (6231)
Optimization of urban land structure based on ecological green equivalent; a case study in Ningguo City, China .....	ZHAO Dan, LI Feng, WANG Rusong (6242)
Dynamic ecological footprint simulation and prediction based on ARIMA Model; a case study of Gansu Province, China .....	ZHANG Bo, LIU Xiuli (6251)
<b>Review and Monograph</b>	
A prospect for study on isolated wetland .....	TIAN Xuezhi, LIU Jiping (6261)
Dinoflagellate heterotrophy .....	SUN Jun, GUO Shujin (6270)
Research progress of microbial agents in ecological engineering .....	WEN Ya, ZHAO Guozhu, ZHOU Chuanbin, et al (6287)
The progress of ecological civilization construction and its indicator system in China .....	BAI Yang, HUANG Yuchi, WANG Min, et al (6295)

# 2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊\*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 20 期 (2011 年 10 月)

## ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 31 No. 20 2011

**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** 冯宗炜  
**主 管** 中国科学技术协会  
**主 办** 中国生态学会  
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**  
**许 可 证** 京海工商广字第 8013 号

**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** FENG Zong-Wei  
**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 70.00 元