

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第6期 Vol.31 No.6 **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 6 期 2011 年 3 月 (半月刊)

目 次

臭氧胁迫对水稻生长以及 C、N、S 元素分配的影响	郑飞翔,王效科,侯培强,等 (1479)
高含氮稻田深层土壤的氨氧化古菌和厌氧氨氧化菌共存及对氮循环的影响	王 雨,祝贵兵,王朝旭,等 (1487)
气候年际变率对全球植被平均分布的影响	邵 璞,曾晓东 (1494)
模拟升温 and 放牧对高寒草甸土壤有机碳氮组分和微生物生物量的影响	王 蓓,孙 庚,罗 鹏,等 (1506)
广州城区生态安全岛典型植物群落结构及物种多样性	莫 丹,管东生,黄康有,等 (1515)
中亚热带湿地松人工林生长过程	马泽清,刘琪璟,王辉民,等 (1525)
潜流人工湿地中植物对氮磷净化的影响	刘树元,阎百兴,王莉霞 (1538)
模拟氮沉降对两种竹林不同凋落物组分分解过程养分释放的影响	涂利华,胡庭兴,张 健,等 (1547)
苔藓植物对贵州丹寨汞矿区汞污染的生态监测	刘荣相,王智慧,张朝晖 (1558)
三峡库区泥、沙沉降对低位狗牙根种群的影响	李 强,丁武泉,朱启红,等 (1567)
上海崇明东滩互花米草种子产量及其萌发对温度的响应	祝振昌,张利权,肖德荣 (1574)
栲-木荷林凋落叶混合分解对土壤有机碳的影响	张晓鹏,潘开文,王进闯,等 (1582)
荒漠化对毛乌素沙地土壤呼吸及生态系统碳固持的影响	丁金枝,来利明,赵学春,等 (1594)
黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素	孙文义,郭胜利 (1604)
种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响	李玉英,胡汉升,程 序,等 (1617)
测墒补灌对冬小麦氮素积累与转运及籽粒产量的影响	韩占江,于振文,王 东,等 (1631)
植被生化组分光谱模型抗土壤背景的能力	孙 林,程丽娟 (1641)
北方两省农牧交错带沙棘根围 AM 真菌与球囊霉素空间分布	贺学礼,陈 程,何 博 (1653)
基于水源涵养的流域适宜森林覆盖率研究——以平通河流域(平武段)为例	朱志芳,龚固堂,陈俊华,等 (1662)
黑龙江大兴安岭呼中林区火烧点格局分析及影响因素	刘志华,杨 健,贺红士,等 (1669)
大兴安岭小尺度草甸火燃烧效率	王明玉,舒立福,宋光辉,等 (1678)
长江口中华鲟自然保护区底层鱼类的群落结构特征	张 涛,庄 平,章龙珍,等 (1687)
骨顶鸡等游禽对不同的人为干扰的行为响应	张微微,马建章,李金波 (1695)
光周期对白头鹇体重、器官重量和能量代谢的影响	倪小英,林 琳,周菲菲,等 (1703)
应用稳定同位素技术分析华北部分地区第三代棉铃虫虫源性质	叶乐夫,付 雪,谢宝瑜,等 (1714)
西花蓟马对蔬菜寄主的选择性	袁成明,郅军锐,曹 宇,等 (1720)
基于 Cyt b 基因序列分析的松毛虫种群遗传结构研究	高宝嘉,张学卫,周国娜,等 (1727)
沼液的定价方法及其应用效果	张昌爱,刘 英,曹 曼,等 (1735)
垃圾堆肥基质对不同草坪植物生态及质量特征的影响	赵树兰,廉 菲,多立安 (1742)
五氯酚在稻田中的降解动态及生物有效性	王诗生,李德鹏 (1749)
专论与综述	
景观遗传学:概念与方法	薛亚东,李 丽,吴巩胜,等 (1756)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 284 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 31 * 2011-03	



封面图说:美丽优雅的新疆夏尔西里森林草地原始景观。夏尔西里国家级自然保护区建立在新疆博乐北部山区无人干扰的中哈边境上,图中雪地云杉为当地的优势树种。

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

臭氧胁迫对水稻生长以及 C、N、S 元素分配的影响

郑飞翔, 王效科*, 侯培强, 张巍巍, 逯 非, 欧阳志云

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 采用开顶式气室 (Open-top Chamber, OTC), 对水稻“3694 繁” (*Oryza sativa* L., 3694 Fan) 在浙江嘉兴进行田间原位臭氧 (O_3) 熏气实验, 研究不同臭氧浓度熏气对水稻生长以及 C、N、S 元素分配的影响。实验设置分 4 个水平: 过滤大气组 (CF, 10 nL/L)、自然大气组 (NF, 40 nL/L) 和两个不同浓度的臭氧处理组 (O_3 -1: 100 nL/L; O_3 -2: 150 nL/L)。主要结果表明: (1) 开始臭氧熏气时, 各个处理组单茎水稻各组分生物量没有差异。在熏气后期 (水稻成熟期), 臭氧处理使单茎水稻根、茎和穗生物量显著下降, 根冠比降低, 株高显著降低, 表明臭氧胁迫增加水稻地上部分的干物质分配, 且对株高的影响可能大于对地上生物量的影响; (2) 臭氧处理使水稻根和茎 C 元素含量下降, 叶 C 元素含量上升, 表明臭氧胁迫提高了叶片中碳分配, 而降低了根和茎的碳分配; (3) 各个组分 N 元素含量上升和碳氮比下降; (4) 茎、叶和穗 S 元素含量上升, 可能会增强水稻抗氧化系统的作用, 从而抵抗臭氧胁迫。所有实验结果表明臭氧浓度升高会对水稻生长产生严重不利影响, 从而导致水稻各个组分的 C、N、S 元素分配格局发生改变。

关键词: 臭氧; 水稻; 生长; C; N; S; 碳氮比

Influences of elevated ozone on growth and C, N, S allocations of rice

ZHENG Feixiang, WANG Xiaoke*, HOU Peiqiang, ZHANG Weiwei, LU Fei, OUYANG Zhiyun

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: The effects of elevated ozone (O_3) concentrations on the growth and C, N, S allocations of rice (*Oryza sativa* L., 3694 Fan) were investigated with Open-top chambers (OTCs) in situ in Jiaxing, Zhejiang Province. Four treatments with three replicates for each treatment were deployed: charcoal-filtered air (CF, 10 nL/L), unfiltered air (NF, 40 nL/L), and charcoal-filtered air with ozone addition (100 nL/L for O_3 -1 and 150 nL/L for O_3 -2). Rice was planted on May. 26 then transplanted into the OTCs on Jul. 4 and harvested on Nov. 12, 2008. The ozone exposure started on Jul. 25 and ended on Oct. 19, 2008 at 9:00—17:00 (Chinese standard time) except raining days and the actual exposure was 69 days. We determined the component biomass (root, stem, foliage, panicle) of rice on Jul. 27, Aug. 14, Sep. 18, Oct. 17 and the C, N, S concentrations in root, stem, foliage, panicle and grain of rice when the rice was harvested. The main results showed that: (1) At the beginning of the ozone exposure, there were no significant differences in the biomass of rice components among the treatments. However, in maturing stage, the root, stem and panicle biomass of rice, as well as the root-shoot ratio and plant height, were significantly lower under the elevated ozone concentrations. During the whole experimental period, the differences in component biomass and plant height of rice between CF and NF treatments were not significant. The percentage of dry matter of aboveground biomass increased under elevated ozone concentrations and plant height was more sensitive to ozone than the aboveground biomass, which indicated that ozone stress might have much more effect on the cell elongation than on the cell division; (2) Under O_3 -1 and O_3 -2 treatments, the C concentrations reduced in root and stem but increased in foliage, which meant that the C allocation to foliage increased but reduced to root and stem under elevated ozone concentrations; (3) The N concentrations in all components of rice increased and it might be a

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (20100480488); 环境保护公益性行业科研专项经费资助项目 (200809152); 国家自然科学基金项目资助项目 (30670387); 国家重点基础研究发展规划资助项目 (2002CB410803)

收稿日期: 2010-02-04; **修订日期:** 2011-01-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangxk@cees.ac.cn

adaptive strategy to resist the ozone stress. The C/N ratios reduced in all rice components under elevated ozone concentration and it revealed that the vegetative growth was inhibited under ozone stress; (4) The S concentrations in stem, foliage and panicle increased in O_3 -1 and O_3 -2 treatments, which would enhance the antioxidant capacity of rice under ozone stress. All the results indicated that elevated ozone concentrations had significant unfavorable influence on rice growth and it led to the obvious changes in the allocations of C, N and S in different rice components.

Key Words: ozone; rice; growth; C; N; S; C/N ratio

臭氧(O_3)是光化学烟雾污染的主要成分,已成为危害最严重的二次污染物之一,对陆地植被有很强的植物毒素作用^[1]。研究表明,大气中臭氧浓度高于 40 nL/L 就可造成植物叶片的可见伤害和作物的减产,而在美国、欧洲和东亚的一些地区,每年的臭氧污染已造成数十亿美元的经济损失^[2]。尽管臭氧浓度在美国和欧洲有降低的趋势^[3],但是在一些经历快速工业化和城市化而相关环境标准还没有完全建立的发展中国家,大气中臭氧浓度还在继续升高^[4]。在一些地区,过去的一个世纪里臭氧浓度以每年 0.3% 到 2% 的速度急剧升高^[5],悲观估计认为大气中臭氧浓度在 2100 年将达到 80 nL/L^[6]。长江三角洲地区作为我国水稻的主要产区之一,近年来臭氧浓度逐年攀升,目前平均监测浓度可达 50—60 nL/L,臭氧污染已成为该地区农作物产量损失的一个主要原因^[7-10]。利用开顶式气室(Open-top Chamber, OTC)在田间自然条件下研究臭氧对植物生长的影响,气室内小环境比较接近自然状况,结果相对可靠^[11-12],目前是研究近地层大气污染对地表生物影响的有效工具,在国内外研究中得到了大量采用^[7-14]。本研究运用自制的改进型开顶式气室^[11-12],分析了不同浓度臭氧熏气对水稻生长和 C、N、S 元素分配以及碳氮比的影响,为评估臭氧胁迫对水稻的影响提供实验数据支持和科学指导。

1 材料和方法:

1.1 实验材料与设计

实验样地位于浙江省嘉兴市秀洲区双桥农场(31°53'N, 121°18'E),距离上海大约 100km。该农场地处我国主要粮食产区的长江三角洲杭嘉湖平原腹地,受亚洲季风性气候影响,年平均气温 15.9 °C,年均降水量 1 168.6 mm,年均日照 2 017.0 h,盛行小麦-水稻轮替或油菜-水稻的轮作制度。

实验用水稻品种为 3694 繁(*Oryza sativa* L., 3694 Fan),种子由浙江省嘉兴市秀洲区农科所提供。2008 年 5 月 26 日播种,7 月 4 日移栽水稻苗至 OTC 实验小区内。每个 OTC 实验小区面积约 3m²,施用 375g 复合肥作为底肥,每个小区种植 12×11 丛水稻,每丛 4 株秧苗。

臭氧熏气从 2008 年 7 月 25 日水稻拔节期开始,2008 年 10 月 19 日水稻完熟期熏气结束,熏气时间每天 9:00 到 17:00 结束,共 8h,扣除阴雨天气的影响,实际熏气天数是 69d,通过自制的开顶式气室(Open-top chamber)^[11-12]进行臭氧浓度动态变化的田间原位实验。开顶式气室由钢筋和聚乙烯塑料薄膜(透光率为 85%)构建,主要包括大气过滤系统、鼓气系统、臭氧发生和加入系统、布气系统、暴露室、臭氧浓度控制系统和数据自动采集系统组成。臭氧由医用氧(纯度为 99.5%)通过浙江省余姚市圣莱特电器有限公司生产的臭氧发生器生成,臭氧浓度通过 ML9810B 型 O_3 分析仪(Monitor 公司,美国)进行动态监测。实验共设 4 种臭氧浓度水平:(1) 活性炭过滤的大气(charcoal-filter, 以下称 CF, 日平均 O_3 浓度为 10 nL/L);(2) 自然大气(non-filter, 以下称 NF, 日平均臭氧浓度为 40nL/L);(3) 低浓度臭氧处理(O_3 -1): 日平均臭氧熏气浓度为 100 nL/L;(4) 高浓度臭氧处理(O_3 -2), 日平均臭氧熏气浓度为 150 nL/L。每个处理 3 个重复,共 12 个 OTC 气室,排成 4 行 3 列,各气室之间有 2 m×3 m 的保护行,田埂宽 0.5 m。CF、NF、 O_3 -1 和 O_3 -2 的 AOT40 值分别为 0.01、0.21、22.77、52.84 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。在整个水稻生长期内的所有田间管理方式(种植、收获、水分管理和病虫害控制)与当时耕作方式保持一致,其它因素如水肥条件、病虫害等不成为本实验的限制因子。

1.2 分析方法

每两丛水稻种在一个网兜中(30cm×15cm×15cm),分别于 2008 年 7 月 27 日(分蘖期)、8 月 14 日(孕穗

期)、9月18日(灌浆期)和10月16日(成熟期),各取两丛水稻清洗干净后统计根、茎、叶、穗干重以及株高等指标。水稻于2008年11月12日整丛收获,清洗干净后分成各个部分于75°C烘48h至恒重。烘干之后水稻各个部分经磨碎之后用元素分析仪(Virio EL III, Elemetar Inc, 德国)测定C、N、S元素含量并得出碳氮比。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据处理与制图,采用 SPSS 13.0 统计软件对数据进行方差分析(ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 生长

不同臭氧处理对单茎水稻不同组分生物量的影响如表1所示。臭氧熏气开始时(7月27日),4个处理组单茎水稻不同组分生物量差异不明显。在整个测量时间中,4个处理组单茎水稻叶的生物量均没有差异。在熏气后期(9月18日、10月17日),臭氧处理组(O₃-1、O₃-2)单茎水稻根生物量显著下降。从灌浆期(9月18日)开始,臭氧处理组(O₃-1、O₃-2)单茎水稻茎生物量明显下降,其数值分别只有CF处理组的63.7%和60.5%。到了成熟期(10月17日),NF处理组单茎水稻茎生物量只有CF处理组的73.4%,而臭氧处理组单茎水稻茎生物量与CF处理组单茎水稻茎生物量的比值进一步降低。灌浆期是水稻产量形成的重要时期,此时高浓度臭氧组(O₃-2)单茎穗重明显低于CF和NF处理组。在成熟期,CF、O₃-1和O₃-2处理组单茎穗重分别只有CF处理组的83.7%、51.8%和48.2%。随着实验的进行,单茎水稻地上生物量和总生物量均大

表1 不同臭氧处理对单茎水稻不同组分生物量/g的影响

Table 1 Effects of different O₃ treatments on the different components of rice (single stem)

部位 Components		7月27日 Jul. 27	8月14日 Aug. 14	9月18日 Sep. 18	10月17日 Oct. 17
根 Root	CF	0.77±0.02 a	1.29±1.07 a	1.13±0.03 a	1.09±0.06 a
	NF	1.03±0.46 a	0.82±0.10 a	1.01±0.02 a	1.05±0.09 a
	O ₃ -1	0.96±0.43 a	1.02±0.35 a	0.55±0.08 b	0.58±0.09 b
	O ₃ -2	0.76±0.35 a	0.96±0.33 a	0.54±0.23 b	0.55±0.03 b
茎 Stem	CF	0.40±0.05 a	1.81±0.69 a	3.19±0.75 a	3.27±0.14 a
	NF	0.48±0.14 a	2.43±0.52 a	2.45±0.20 ab	2.40±0.13 b
	O ₃ -1	0.40±0.06 a	1.98±0.93 a	2.03±0.60 b	1.41±0.10 c
	O ₃ -2	0.36±0.12 a	2.12±0.79 a	1.93±0.53 b	1.58±0.46 c
叶 Foliage	CF	0.37±0.03 a	0.98±0.17 a	1.28±0.29 a	1.09±0.10 a
	NF	0.41±0.09 a	0.97±0.11 a	1.11±0.17 a	1.02±0.13 a
	O ₃ -1	0.42±0.04 a	1.01±0.08 a	1.20±0.20 a	0.98±0.03 a
	O ₃ -2	0.33±0.04 a	0.94±0.04 a	1.29±0.22 a	1.09±0.03 a
穗 Panicle	CF	—	—	0.65±0.15 a	3.32±0.42 a
	NF	—	—	0.61±0.04 a	2.78±0.29 b
	O ₃ -1	—	—	0.44±0.11 ab	1.72±0.15 c
	O ₃ -2	—	—	0.39±0.12 b	1.60±0.09 c
地上生物量 Underground Biomass	CF	0.77±0.05 a	2.79±0.84 a	5.12±1.19 a	7.68±0.55 a
	NF	0.89±0.22 a	3.40±0.63 a	4.17±0.14 a	6.19±0.51 b
	O ₃ -1	0.82±0.09 a	2.99±0.99 a	3.68±0.74 a	4.10±0.25 c
	O ₃ -2	0.67±0.16 a	3.06±0.79 a	3.61±0.83 a	4.27±0.47 c
总生物量 Total Biomass	CF	1.54±0.07 a	4.07±1.47 a	6.25±1.20 a	8.77±0.52 a
	NF	1.93±0.58 a	4.21±0.70 a	5.18±0.14 ab	7.24±0.53 b
	O ₃ -1	1.78±0.49 a	4.01±0.80 a	4.22±0.80 b	4.68±0.31 c
	O ₃ -2	1.43±0.50 a	4.02±1.12 a	4.15±1.06 b	4.89±0.38 c

所有参数的测定值表示为“均值±标准差”;不同字母表示数值间存在显著差异(P<0.05)

幅度增加,但是在水稻成熟期(10月17日),臭氧处理组(O_3 -1和 O_3 -2)单茎水稻地上生物量和总生物量要显著低于CF处理组。此外,在这个时期,4个处理组(CF、NF、 O_3 -1和 O_3 -2)地上生物量占总生物量的比例分别是87.5%、85.4%、87.7%和88.6%,其根冠比分别为0.15、0.17、0.14和0.13。

臭氧处理对水稻株高具有显著的影响(图1)。臭氧熏气开始20d后(8月14日),臭氧处理组(O_3 -1、 O_3 -2)水稻株高就显著低于CF和NF处理组($P<0.05$)。在成熟期(10月17日), O_3 -1和 O_3 -2处理组之间的水稻株高存在显著差异,此时两个处理组水稻株高分别只有CF处理的90.3%和86.3%。在整个实验时间内,CF和NF处理之间水稻株高均没有明显差异。

2.2 C元素

水稻根、茎、叶、穗和籽粒C元素含量测定的结果如图2所示。经不同浓度臭氧处理后, O_3 -1和 O_3 -2处理组水稻根和茎C元素含量相对于CF处理组均呈下降趋势,其中 O_3 -1和 O_3 -2处理组水稻茎C元素含量是CF处理组的98.9%和98.6%。与根和茎C元素含量结果相反, O_3 -1和 O_3 -2处理组水稻叶C元素含量是CF处理组的101.2%和101.6%。在穗和籽粒中,各个处理C元素含量没有明显的差异。

2.3 N元素

水稻根、茎、叶、穗和籽粒N元素含量测定结果表明(图3): O_3 -1和 O_3 -2处理组水稻各个组分的N含量均大幅度的升高。其中, O_3 -1处理组根、茎、叶、穗和籽粒N元素含量分别是CF处理组的110.0%、130.5%、110.0%、118.0%和111.5%,而 O_3 -2处理组各组分N元素含量分别是CF处理组的123.3%、126.8%、110.4%、115.1%和121.3%。CF和NF处理组根、茎、叶和籽粒N元素含量无明显差异。除了水稻籽粒, O_3 -1和 O_3 -2处理组其他各个组分N元素含量均无明显差异。

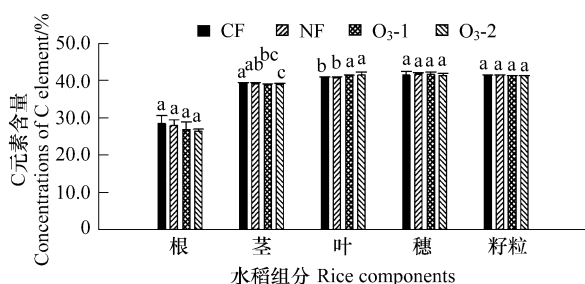


图2 臭氧处理下水稻不同组分C元素含量变化

Fig. 2 Concentrations of C element of different rice components under the O_3 treatments

不同字母表示数值间存在显著差异($P<0.05$)

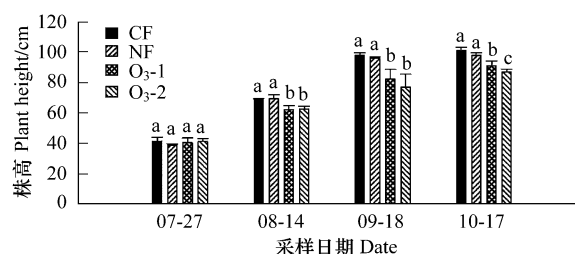


图1 不同臭氧浓度处理对水稻株高的影响

Fig. 1 Effects of different O_3 treatments on the plant height of rice

不同字母表示数值间存在显著差异($P<0.05$)

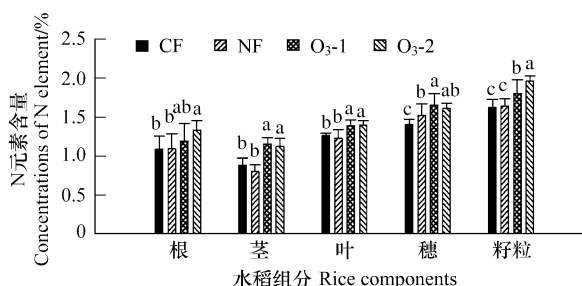


图3 臭氧处理下水稻不同组分N元素含量变化

Fig. 3 Concentrations of N element of different rice components under the O_3 treatments

不同字母表示数值间存在显著差异($P<0.05$)

2.4 碳氮比

臭氧处理后水稻各个组分碳氮比均下降(图4)。CF处理组与其他3个处理组(NF、 O_3 -1、 O_3 -2)根碳氮比有显著差异,但是NF、 O_3 -1和 O_3 -2之间差异不明显。水稻茎碳氮比高于水稻其他组分,臭氧处理组(O_3 -1、 O_3 -2)根碳氮比显著低于CF和NF处理组且CF和NF处理之间也存在显著差异。臭氧处理组(O_3 -1、 O_3 -2)与非臭氧处理组(CF、NF)叶碳氮比有显著差异,但是 O_3 -1与 O_3 -2、CF与NF之间的差异不显著。 O_3 -1处理组穗和籽粒碳氮比分别是CF处理组的85.5%和90.0%, O_3 -2处理组穗和籽粒碳氮比分别是CF处理组的

86.4% 和 82.1%。

2.5 S 元素

水稻根和籽粒 S 元素含量变化不明显,但茎、叶和穗 S 元素含量均随臭氧浓度升高而显著升高(图 5)。其中,臭氧处理组(O_3 -1、 O_3 -2)与非臭氧处理组(CF、NF)茎和叶 S 元素有显著差异,但是 O_3 -1 与 O_3 -2、CF 与 NF 之间的差异不显著。 O_3 -1 处理组茎和叶 S 元素含量分别是 CF 处理组的 135.3% 和 123.3%,而 O_3 -2 处理组茎和叶 S 元素含量分别是 CF 处理组的 141.7% 和 127.5%。CF 处理组穗 S 元素含量与 O_3 -2 处理组差异显著。各个处理组籽粒 S 元素含量变化不明显。

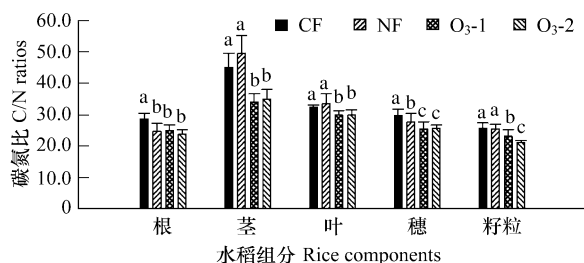


图 4 臭氧处理下水稻不同组分碳氮比变化

Fig. 4 C/N ratios of different rice components under the O_3 treatments

不同字母表示数值间存在显著差异 ($P < 0.05$)

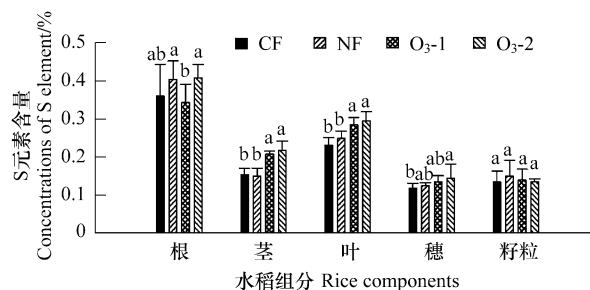


图 5 臭氧处理下水稻不同组分 S 元素含量变化

Fig. 5 Concentrations of S element of different rice components under the O_3 treatments

不同字母表示数值间存在显著差异 ($P < 0.05$)

3 讨论

研究表明,高浓度臭氧长期暴露对农作物造成的负面影响是由臭氧的累积效应引起的^[15-16]。在本实验中,在臭氧熏气前期(7月27日、8月14日),不同处理组单茎水稻各组分生物量之间无明显差异,在熏气后期,单茎水稻各组分生物量对臭氧熏气的响应不同,臭氧对水稻的物质生产和分配产生了重要影响^[17]。在熏气后期各个处理组单茎水稻叶生物量无明显变化而茎和穗生物量明显下降,表明臭氧胁迫条件下更多的干物质被分配到叶片中,使水稻叶片的光合产物的输出受阻。水稻成熟期(10月17日)臭氧处理组(O_3 -1、 O_3 -2)地上生物量占总生物量的比例大于非臭氧处理组(CF、NF),根冠比下降,表明臭氧胁迫增加水稻地上部分的干物质分配^[4]。在对其他作物的研究中,也得到了类似的结果^[18]。此外,灌浆期(9月18日)是水稻籽粒产量形成的重要时期^[19-20],臭氧处理组(O_3 -1、 O_3 -2)单茎水稻穗生物量明显小于非臭氧处理组(CF、NF),表明水稻产量对灌浆期的高浓度臭氧更为敏感^[21]。

臭氧处理使水稻叶片光合色素含量下降^[22-23],抑制了水稻的光合作用,使水稻对 CO_2 的利用效率和光利用效率(Light Use Efficiency, LUE)降低^[24],影响水稻干物质的生产,使干物质在水稻体内累积降低,生长发育所需的构成物质供应不足,从而影响到水稻植株的生长,在本实验中臭氧处理组水稻生物量和株高显著降低,可能是这种变化的反映。实验中臭氧熏气 20d(8月14日)臭氧处理组水稻株高即显著下降,表明臭氧对水稻株高的影响可能大于对地上生物量的影响,即臭氧胁迫对细胞伸长的影响可能大于对细胞分裂的影响^[4]。

臭氧直接作用于植物叶片导致叶片的损伤并破坏光合作用,而植物本身存在一个自我修复机制,会利用更多的碳来修补叶片的损伤和维持光合作用,这样就会减少用于根生长的碳^[25-26]。在本实验中,水稻根和茎中 C 元素含量下降而叶中 C 元素含量上升,表明臭氧胁迫提高了叶片中碳分配,而降低了茎和根的碳分配。臭氧对水稻碳分配的这种影响会土壤微生物的碳含量降低,改变了土壤微生物的碳代谢,显著降低土壤微生物的多样性指数,抑制土壤微生物的代谢活性,并可能导致土壤肥力降低,影响水稻生长,从而进一步加剧臭氧对水稻的胁迫^[27]。

有研究表明,植物体内较高浓度的氮含量对抵抗臭氧危害是有利的,因为高浓度的氮含量可以通过提高叶片转换机制来适应环境,而低浓度的氮环境降低了叶片的防御和修复功能^[28],但这两种适应过程都会降低碳在根部的分配^[29]。在本实验中,水稻各组分 N 元素含量的增加,根部 C 元素减少,表明这是水稻对臭氧胁迫的一种适应反应。尽管大气中臭氧浓度升高使水稻明显减产,但是稻米的氨基酸和蛋白质含量的增加^[14],表明臭氧对水稻氮代谢具有明显影响。碳氮比是碳、氮代谢协调程度的重要指标,可反映出碳、氮各自库源的相对丰缺程度及其对作物生长发育的影响。臭氧胁迫使水稻各组分碳氮比下降,表明水稻营养生长受到抑制。

S 元素是植物必需的营养元素之一,全面参与植物的光合作用以及蛋白质和脂类的合成。作物经臭氧处理后可导致叶绿素含量下降,叶绿体显微结构发生变化,基质暗色化^[30];抑制己糖磷酸还原过程,使 RUBP 羧化酶含量和活性都降低,RUBP 羧化受到影响^[31]。研究表明,植物叶片的 RUBP 羧化酶、PEP 羧化酶和硝酸还原酶的活性因施加硫而增强,叶绿素含量增加^[32],而水稻叶片 S 元素含量的升高可能是对臭氧胁迫的响应,避免水稻光合作用受到更大的损伤。此外,植物体 S 元素的已知功能里有很大一部分都与植物的抗逆境胁迫相关,如还原态谷胱甘肽(GSH),它通过硫代谢通路的各个环节协调和促进植物在逆境胁迫下的生存能力^[33];臭氧通过气孔扩散到细胞间,达到细胞后在质外体或者细胞内其他部位分解为活性氧如 H_2O_2 ^[34],而植物抗坏血酸过氧化氢酶利用 GSH 与抗坏血酸偶联的电子传递是清除 H_2O_2 的重要途径^[35]。因此,水稻茎、叶和穗 S 元素的增加,可能会增强水稻抗氧化系统的作用,加强水稻抵抗臭氧胁迫的能力。

本实验为田间原位实验,其实验品种仅有“3694 繁”一个品种,实验时间仅为一个生长季,因此实验结果仅能在一定程度上反应臭氧胁迫对水稻生长以及 C、N、S 元素分配的影响。在本实验中,构建 OTC 所用的聚乙烯塑料薄膜的透光率为 85%,而在整个实验过程中,OTC 内平均温度比 OTC 外部高了 $1.8^{\circ}C$,OTC 内实验环境与自然环境一定的差别。利用 OTC 气室模拟臭氧对水稻的伤害作用,虽然能够最大程度上模拟自然状态下臭氧浓度升高的情况,但还存在局限性^[36-37]。因此,在本研究的基础上必须进一步拓宽研究思路,深化研究方法,探寻臭氧对水稻生长以及对水稻体内与 C、N、S 元素相关的物质的影响机理,以期能够科学准确的评估臭氧浓度升高对水稻的影响,从而确保粮食安全。

References:

- [1] Krupa S, McGrath M T, Andersen C P, Booker F L, Burkey K O, Chappelka A H, Chevone B I, Pell E J, Zilinskas B A. Ambient ozone and plant health. *Plant Disease*, 2001, 85(1): 4-12.
- [2] Sitch S, Cox P M, Collins W J, Huntingford C. Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink. *Nature*, 2007, 448(7155): 791-794.
- [3] IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. [2010-02-04]. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>.
- [4] 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.
- [5] Vingarzan R. A review of surface ozone background levels and trends. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(21): 3431-3442.
- [6] Fiscus E L, Booker E L, Burkey K O. Crop responses to ozone: uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning. *Plant Cell and Environment*, 2005, 28(8): 997-1011.
- [7] Feng Z W, Jin M H, Zhang F Z, Huang Y Z. Effects of ground-level ozone O_3 pollution on the yields of rice and winter wheat in the Yangtze River Delta. *Journal of Environmental Science*, 2003, 15(3): 360-362.
- [8] Heck W C, Adams R M, Cure W W, Heagle A S, Heggstad H E, Kohut R J, Kress L W, Rawlings J O, Taylor O C. A reassessment of crop loss from ozone. *Environmental Science and Technology*, 1983, 17(12): 572A-581A.
- [9] Mathy P. *The European Open-top Chambers Programme: Objectives and Implementation. Assessment of Crop Loss from Air Pollutants*. New York: Elsevier Applied Science, 1988: 505-513.
- [10] Wang X K, Manning W J, Feng Z W, Zhu Y G. Ground-level ozone in China: Distribution and effects on crop yields. *Environmental Pollution*, 2007, 147:394-400.

- [11] Zheng Q W. Effect of Elevated Ozone Level on Typical Crops in Yangtze Delta, China. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, 2006: 27-32.
- [12] Zheng Q W, Wang X K, Feng Z Z, Song W Z, Feng Z W, Ouyang Z Y. Effects of elevated ozone on biomass and yield of rice planted in open-top chamber with revolving ozone distribution. Chinese Journal of Environmental Science, 2007, 28(1): 170-175.
- [13] Wang C Y, Gao S H, Pan Y R, Bai Y M, Wen M, Liu J G. The experiment of the influences of CO₂ on soybean in open top chamber OTC-1. Meteorological Monthly, 1993, 7: 23-26.
- [14] Guo J P, Wang C Y, Wen M, Bai Y M, Huo Z G. The experimental study on the impact of atmospheric O₃ variation on rice. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(6): 822-826.
- [15] Nussbaum S, Geissmann M, Fuhrer J. Ozone exposure-response relationships for mixtures of perennial ryegrass and white clover depend on ozone exposure patterns. Atmospheric Environment, 1995, 29(9): 989-995.
- [16] Fuhrer J, Skärby L, Ashmore M R. Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. Environmental Pollution, 1997, 97(1/2): 91-106.
- [17] Kobayashi K, Okada M, Nouchi I. Effects of ozone on dry matter partitioning and yield of Japanese cultivar of rice (*Oryza sativa* L.). Agriculture Ecosystems and Environment, 1995, 53(2): 109-122.
- [18] Cooley D R, Manning W J. The impact of ozone on assimilate partitioning in plants: a review. Environmental Pollution, 1987, 47(2): 95-113.
- [19] Ntanos D A, Koutroubas S D. Dry matter and N accumulation and translocation for Indica and Japonica rice under Mediterranean conditions. Field Crops Research, 2002, 74(1): 93-101.
- [20] Yoshida S. Physiological analysis of rice yield//Yoshida S, ed. Fundamentals of Rice Crop Science. Malkita City, Philippines: International Rice Research Institute, 1981: 231-251.
- [21] Chen Z, Wang X K, Xie J Q, Zheng Q W, Feng Z Z, Ouyang Z Y, Feng Z W. Effects of ozone on production of rice (*Oryza sativa* L.) during grain filling stage. Asian Journal of Ecotoxicology, 2007, 2(2): 208-213.
- [22] Zheng Q W, Wang X K, Xie J Q, Feng Z Z, Feng Z W, Ni X W, Ouyang Z Y. Effects of exogenous ascorbate acid on membrane protective system of in situ rice leaves under O₃ stress. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 1131-1137.
- [23] Zheng F X, Wang X K, Zhang W W, Duan X N, Hou P Q. Influences of elevated ozone on rice photosynthesis and yield. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(11): 2217-2223.
- [24] Kobayashi K, Okada M. Effects of ozone on the light use of rice (*Oryza sativa* L.) plants. Agriculture Ecosystems and Environment, 1995, 53(1): 1-12.
- [25] US Environmental Protection Agency. Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants. EPA/600/P-93/004Bf. Research Triangle Park, NC USA: Office of Air Quality Planning and Standards Environmental Protection Agency, 1996.
- [26] Drogoudi P D, Ashmore M R. ¹⁴C-allocation of flowering and deblossomed strawberry in response to elevated ozone. New Phytologist, 2001, 152(3): 455-461.
- [27] Chen Z. Studies on Effect of Elevated Ozone on Soil Microbial Communities under Wheat and Rice in Yangtze River Delta, China. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Science. Chinese Academy of Sciences, 2008: 126-131.
- [28] Maurer S, Matyssek R. Nutrition and the ozone sensitivity of birch (*Betula pendula*) II. Carbon balance, water-use efficiency and nutritional status of the whole plant. Trees-Structure and Function, 1997, 12(1): 11-20.
- [29] Ren W, Tian H Q. Effects of ozone pollution on terrestrial ecosystem productivity. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(2): 219-230.
- [30] Van Hove L W A, Bossen M E. Physiological effects of five months exposure to low concentrations of O₃ and NH₃ on Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*). Physiologia Plantarum, 1994, 92(1): 140-148.
- [31] Lehnher B, Mächler F, Grandjean A, Fuhrer J. The regulation of photosynthesis in leaves of field-grown spring wheat (*Triticum aestivum* L., cv Albis) at different levels of ozone in ambient air. Plant Physiology, 1988, 88(4): 1115-1119.
- [32] Qi B Z. The effects of sulfur nutrition on some physiological parameters in relation to carbon and nitrogen metabolism in wheat and maize. Acta Agronomica Sinica, 1989, 15(1): 31-35.
- [33] Wu Y, Gao L, Cao M J, Xiang C B. Plant sulfur metabolism, regulation, and biological functions. Chinese Bulletin of Botany, 2007, 24(6): 735-761.
- [34] Heath R L, Taylor G E. Physiological process and plant responses to ozone exposure//Sander mann H, Wellburn A L, Heath R L, eds. Forest Decline and Ozone, Ecological Studies, Vol. 127. Berlin: Springer-Verlag, 1997: 317-368.
- [35] Noctor G, Foyer C H. Ascorbate and glutathione: keeping active oxygen under control. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1998, 49: 249-279.
- [36] Manning W J. Use of protective chemicals to assess the effects of ambient ozone on plants//Agrawal S B, Agrawal M, eds. Environmental Pollution and Plant Response. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 2000: 247-258.

- [37] Manning W J. Establishing a cause and effect relationship for ambient ozone exposure and tree growth in the forest: progress and an experimental approach. *Environmental Pollution*, 2005, 137(3): 443-454.

参考文献:

- [11] 郑启伟. 大气 O₃ 浓度升高对长江三角洲地区典型农作物的影响研究. 北京: 中国科学院研究生院, 2006: 27-32.
- [12] 郑启伟, 王效科, 冯兆忠, 宋文质, 冯宗炜, 欧阳志云. 用旋转布气法开顶式气室研究臭氧对水稻生物量和产量的影响. *环境科学*, 2007, 28(1): 170-175.
- [13] 王春乙, 高素华, 潘亚茹, 白月明, 温民, 刘江歌. OTC-1 型开顶式气室中 CO₂ 对大豆影响的试验结果. *气象*, 1993, 19(7): 23-26.
- [14] 郭建平, 王春乙, 温民, 白月明, 霍治国. 大气中 O₃ 浓度变化对水稻影响的试验研究. *作物学报*, 2001, 27(6): 822-826.
- [21] 陈展, 王效科, 谢居清, 郑启伟, 冯兆忠, 欧阳志云, 冯宗炜. 水稻灌浆期臭氧暴露对产量形成的影响. *生态毒理学报*, 2007, 2(2): 208-213.
- [22] 郑启伟, 王效科, 谢居清, 冯兆忠, 冯宗炜, 倪雄伟, 欧阳志云. 外源抗坏血酸对臭氧胁迫下水稻叶片膜保护系统的影响. *生态学报*, 2006, 26(4): 1131-1137.
- [23] 郑飞翔, 王效科, 张巍巍, 段晓男, 侯培强. 臭氧胁迫对水稻光合作用与产量的影响. *农业环境科学学报*, 2009, 28(11): 2217-2223.
- [27] 陈展. 空气 O₃ 浓度升高对农田土壤微生物的影响. 北京: 中国科学院研究生院, 2008: 126-131.
- [29] 任巍, 田汉勤. 臭氧污染与陆地生态系统生产力. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 219-230.
- [32] 祁葆滋. 硫营养对小麦、玉米碳、氮代谢中几项生理参数的影响. *作物学报*, 1989, 15(1): 31-35.
- [33] 吴宇, 高蕾, 曹民杰, 向成斌. 植物硫营养代谢、调控与生物学功能. *植物学通报*, 2007, 24(6): 735-761.

CONTENTS

Influences of elevated ozone on growth and C, N, S allocations of rice	ZHENG Feixiang, WANG Xiaoke, HOU Peiqiang, et al (1479)
Coexistence, biodiversity and roles of ammonia-oxidizing archaea and anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in deep soil layer of high nitrogen loaded paddy field	WANG Yu, ZHU Guibing, WANG Chaoyu, et al (1487)
The impact of interannual climate variability on the mean global vegetation distribution	SHAO Pu, ZENG Xiaodong (1494)
Labile and recalcitrant carbon and nitrogen pools of an alpine meadow soil from the eastern Qinghai-Tibetan Plateau subjected to experimental warming and grazing	WANG Bei, SUN Geng, LUO Peng, et al (1506)
The structure and species diversity of plant communities in ecological safety islands of urban Guangzhou	MO Dan, GUAN Dongsheng, HUANG Kangyou, et al (1515)
The growth pattern of <i>Pinus elliottii</i> Plantation in central subtropical China	MA Zeqing, LIU Qijing, WANG Huimin, et al (1525)
The effect of two wetland plants on nitrogen and phosphorus removal from the simulated paddy field runoff in two small-scale Subsurface Flow Constructed Wetlands	LIU Shuyuan, YAN Baixing, WANG Lixia (1538)
Effect of simulated nitrogen deposition on nutrient release in decomposition of several litter fractions of two bamboo species	TU Lihua, HU Tingxing, ZHANG Jian, et al (1547)
Ecological monitoring of bryophytes for mercury pollution in Danzhai Mercury Mine Area, Guizhou Province, China	LIU Rongxiang, WANG Zhihui, ZHANG Zhaohui (1558)
Influence of silt deposition and sand deposition on <i>Cynodon dactylon</i> population in low-water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, DING Wuquan, ZHU Qihong, et al (1567)
Seed production of <i>Spartina alterniflora</i> and its response of germination to temperature at Chongming Dongtan, Shanghai	ZHU Zhenchang, ZHANG Liquan, XIAO Derong (1574)
Effects of decomposition of mixed leaf litters of the <i>Castanopsis platyacantha</i> - <i>Schima sinensis</i> forest on soil organic carbon	ZHANG Xiaopeng, PAN Kaiwen, WANG Jinchuang, et al (1582)
Effects of desertification on soil respiration and ecosystem carbon fixation in Mu Us sandy land	DING Jinzhi, LAI Liming, ZHAO Xuechun, et al (1594)
The spatial distribution of soil organic carbon and its influencing factors in hilly region of the Loess Plateau	SUN Wenyi, GUO Shengli (1604)
Effects of interspecific interactions and nitrogen fertilization rates on above- and below- growth in faba bean/maze intercropping system	LI Yuying, HU Hansheng, CHENG Xu, et al (1617)
Effects of supplemental irrigation based on measured soil moisture on nitrogen accumulation, distribution and grain yield in winter wheat	HAN Zhanjiang, YU Zhenwen, WANG Dong, et al (1631)
Anti-soil background capacity with vegetation biochemical component spectral model	SUN Lin, CHENG Lijuan (1641)
Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin of <i>Hippophae rhamnoides</i> L in farming-pastoral zone from the two northern provinces of China	HE Xueli, CHEN Cheng, HE Bo (1653)
Study on optimum forest coverage for water conservation: a case study in Pingtonghe watershed (Pingwu section)	ZHU Zhifang, GONG Gutang, CHEN Junhua, et al (1662)
Spatial point analysis of fire occurrence and its influence factor in Huzhong forest area of the Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province, China	LIU Zhihua, YANG Jian, HE Hongshi, et al (1669)
Combustion efficiency of small-scale meadow fire in Daxinganling Mountains	WANG Mingyu, SHU Lifu, SONG Guanghui, et al (1678)
Community structure of demersal fish in Nature Reserve of <i>Acipenser sinensis</i> in Yangtze River estuary	ZHANG Tao, ZHUANG Ping, ZHANG Longzhen, et al (1687)
Behavioral responses of the Common Coots (<i>Fulica atra</i>) and other swimming birds to human disturbances	ZHANG Weiwei, MA Jianzhang, LI Jinbo (1695)
Effects of photoperiod on body mass, organ masses and energy metabolism in Chinese bulbul (<i>Pycnonotus sinensis</i>)	NI Xiaoying, LIN Lin, ZHOU Feifei, et al (1703)
Larval host types for the 3 rd <i>Helicoverpa armigera</i> in Bt cotton field from North China determined by $\delta^{13}\text{C}$	YE Lefu, FU Xue, XIE Baoyu, et al (1714)
Selectivity of <i>Frankliniella occidentalis</i> to vegetable hosts	YUAN Chengming, ZHI Junrui, CAO Yu, et al (1720)
Genetic structure of <i>Pine caterpillars</i> (<i>Dendrolimus</i>) populations based on the analysis of Cyt b gene sequences	GAO Baojia, ZHANG Xuwei, ZHOU Guona, et al (1727)
Pricing method and application effects of biogas slurry	ZHANG Changai, LIU Ying, CAO Man, WANG Yanqin, et al (1735)
Effects of compost from municipal solid waste on ecological characteristics and the quality of different turfgrass cultivars	ZHAO Shulan, LIAN Fei, DUO Li'an (1742)
Degradation kinetics and bioavailability of pentachlorophenol in paddy soil-rice plant ecosystem	WANG Shisheng, LI Depeng (1749)
Review and Monograph	
Concepts and techniques of landscape genetics	XUE Yadong, LI Li, WU Gongsheng, ZHOU Yue (1756)

2009 年度生物学科总被引频次和影响力因子前 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	影响力因子 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;影响力因子 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 6 期 (2011 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 6 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	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
主编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出版	科学出版社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许可证	京海工商广字第 8013 号		

