

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第10期 Vol.34 No.10 **2014**

中国生态学会  
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 34 卷 第 10 期 2014 年 5 月 (半月刊)

## 目次

### 前沿理论与学科综述

- 景观可持续性与景观可持续性科学..... 赵文武,房学宁 (2453)
- 生态系统服务付费的诊断框架及案例剖析 ..... 朱文博,王 阳,李双成 (2460)
- 湿地植物根表铁膜研究进展..... 刘春英,陈春丽,弓晓峰,等 (2470)
- 水生生态环境中捕食信息素的生态学效应..... 覃光球,卢豪良,唐振柱,等 (2481)
- 脊椎动物传播植物肉质果中的次生物质及其生态作用 ..... 潘 扬,罗 芳,鲁长虎 (2490)

### 个体与基础生态

- 中亚热带天然林土壤  $\text{CH}_4$  吸收速率对模拟 N 沉降的响应 ..... 陈朝琪,杨智杰,刘小飞,等 (2498)
- 塔里木盆地南缘早生芦苇生态特征与水盐因子关系..... 贡 璐,朱美玲,塔西甫拉提·特依拜,等 (2509)
- 黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应及其生产力分级..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (2519)
- 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应..... 余再鹏,万晓华,胡振宏,等 (2529)
- 施钾提高蚜害诱导的小麦茉莉酸含量和叶片相关防御酶活性..... 王 伟,张月玲,苏建伟,等 (2539)
- 高浓度  $\text{O}_3$  及太阳辐射减弱对冬小麦 PS II 光合活性及光能耗散的影响 ..... 孙 健,郑有飞,吴荣军,等 (2548)
- 蜡样芽孢杆菌 B3-7 在大田小麦根部的定殖动态及其对小麦纹枯病的防治效果 ..... 黄秋斌,张 颖,刘凤英,等 (2559)
- 有限供水下冬小麦全程耗水特征定量研究..... 张兴娟,薛绪掌,郭文忠,等 (2567)
- 抗真菌转基因水稻生态适合度评价..... 李 伟,郭建夫,袁红旭,等 (2581)
- 花生叶片蛋白组对 UV-B 辐射增强的响应 ..... 杜照奎,李钧敏,钟章成,等 (2589)
- 南海南部悬浮颗粒物脂肪酸组成..... 刘华雪,柯常亮,李纯厚,等 (2599)
- 年龄、集群、生境及天气对鄱阳湖白鹤越冬期日间行为模式的影响..... 袁芳凯,李言阔,李凤山,等 (2608)
- [树]麻雀羽再生的能量预算和水代谢散热调节 ..... 杨志宏,吴庆明,杨 渺,等 (2617)
- 低剂量杀虫剂对星豹蛛捕食效应的影响及其机理 ..... 李 锐,李 娜,刘 佳,等 (2629)
- 空心莲子草叶甲对越冬保护的响应与控害效能..... 刘雨芳,王秀秀,李 菲,等 (2638)
- ### 种群、群落和生态系统
- 气候变化对鄱阳湖白鹤越冬种群数量变化的影响..... 李言阔,钱法文,单继红,等 (2645)
- 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化..... 刘文静,张平究,董国政,等 (2654)

查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析 .....	李然然,章光新,张 蕾 (2663)
闽江河口区淡水和半咸水潮汐沼泽湿地土壤产甲烷菌多样性.....	曾志华,杨民和,余晨兴,等 (2674)
环境及遗传背景对延河流域植物叶片和细根功能性状变异的影响.....	郑 颖,温仲明,宋 光,等 (2682)
衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变.....	杨 宁,邹冬生,杨满元,等 (2693)
海平面上升影响下广西钦州湾红树林脆弱性评价.....	李莎莎,孟宪伟,葛振鸣,等 (2702)
中国南方 3 种主要人工林生物量和生产力的动态变化.....	杜 虎,曾馥平,王克林,等 (2712)
杉木人工林土壤真菌遗传多样性.....	何苑擘,周国英,王圣洁,等 (2725)
科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应.....	张腊梅,刘新平,赵学勇,等 (2737)
黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律.....	申家朋,张文辉 (2746)
<b>景观、区域和全球生态</b>	
南亚热带森林演替过程中小气候的改变及对气候变化的响应.....	刘效东,周国逸,陈修治,等 (2755)
黄淮海平原典型站点冬小麦生育阶段的干旱特征及气候趋势的影响.....	徐建文,居 辉,刘 勤,等 (2765)
<b>资源与产业生态</b>	
基于 GIS 的山西省矿产资源规划环境影响评价 .....	刘 伟,杜培军,李永峰 (2775)
基于效益分摊的水电水足迹计算方法——以密云水库为例 .....	赵丹丹,刘俊国,赵 旭 (2787)
<b>学术信息与动态</b>	
全球土地计划第二次开放科学大会 (GLP 2 <sup>nd</sup> Open Science Meeting) 会议述评 .....	段宝玲,卜玉山 (2796)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 348 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 36 * 2014-05	



**封面图说:** 鄱阳湖越冬的白鹤群——白鹤为国家一级保护动物,世界上白鹤东部种群的迁徙路线是从俄罗斯西伯利亚的雅库特,向南迁飞 5100km 到中国长江下游的鄱阳湖越冬,其中途经俄罗斯的雅纳河、印迪吉尔卡河和科雷马河流域,进入中国后主要停歇地有扎龙、林甸、莫莫格以及双台河口、滦河口、黄河三角洲和升金湖等地。多年的监测表明,世界 90% 以上的白鹤种群都在鄱阳湖越冬。越冬初期和末期是白鹤补充能量的关键阶段,因此,研究鄱阳湖国家级自然保护区越冬白鹤种群数量和当地气候变化的相关性具有重要意义。

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/stxb201111061682

孙健,郑有飞,吴荣军,徐静馨,李健.高浓度  $O_3$  及太阳辐射减弱对冬小麦 PS II 光合活性及光能耗散的影响.生态学报,2014,34(10):2548-2558.  
Zheng Y F, Sun J, Wu R J, Xu J X, Li J. Combined effects of elevated  $O_3$  concentration and reduced solar irradiance on photosynthetic activity and energy dissipation of winter wheat. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2548-2558.

## 高浓度 $O_3$ 及太阳辐射减弱对冬小麦 PS II 光合活性及光能耗散的影响

孙 健<sup>1</sup>, 郑有飞<sup>1,2,3,\*</sup>, 吴荣军<sup>3</sup>, 徐静馨<sup>3</sup>, 李 健<sup>3</sup>

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 南京 210044;

3. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044)

**摘要:**为给地表太阳辐射减弱和  $O_3$  浓度增加等大气环境变化条件下我国粮食生产和安全提供安全评估依据,利用开顶式气室(OTC)和黑色遮光网开展了 1 种熏气水平和 2 种辐射减弱程度的大田试验(野外 CK, T1: 遮光 20%, T2: 遮光 40%, T3:  $O_3$  浓度 100 nL/L, T4:  $O_3$  浓度 100 nL/L 与遮光 20% 复合, T5:  $O_3$  浓度 100 nL/L 与遮光 40% 复合)。结果表明: T1、T2 和 T4 组的  $F_v/F_m$ 、 $L_{(PFD)}$  与 CK 均相似且变化不明显, Yield、 $qP$ 、 $Y(NO)$ 、 $(1-qP)/NPQ$  分别较 CK 不同程度下降, 而  $NPQ$  和  $Y(NPQ)$  较 CK 分别较大幅度升高; T3—T5 组的  $F_v/F_m$ 、 $L_{(PFD)}$ 、Yield、 $qP$ 、 $Y(NO)$  和  $(1-qP)/NPQ$  较 CK 不同程度降低, 而  $NPQ$  和  $Y(NPQ)$  较 CK 分别显著升高且 T5 增幅显著大于 T1—T4 组。综上表明, 复合胁迫下, 冬小麦光能更多地向调节性热耗散途径分配, 辐射减弱效应能使臭氧胁迫下冬小麦较好地自我调节以更好地适应逆境环境。尽管冬小麦对复合胁迫具有一定的适应能力, 地表臭氧浓度升高和辐射减弱仍然是我国粮食生产中面临的一个重要问题。

**关键词:** 太阳辐射减弱;  $O_3$  浓度增加; PS II; 光合活性; 能量耗散

## Combined effects of elevated $O_3$ concentration and reduced solar irradiance on photosynthetic activity and energy dissipation of winter wheat

SUN Jian<sup>1</sup>, ZHENG Youfei<sup>1, 2, 3, \*</sup>, WU Rongjun<sup>3</sup>, XU Jingxin<sup>3</sup>, LI Jian<sup>3</sup>

1 College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environmental Monitoring and Pollution Control, Nanjing 210044, China

3 College of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

**Abstract:** At present, the aerosol radiative effect is the focus of many scholars and the solar radiation attenuated by direct or indirect effect to cause crop photosynthetic capacity decreased, resulting in crop production; At the same time the surface concentration of  $O_3$  continuously increased,  $O_3$  has strong negative effect on crop growth and metabolic processes and  $O_3$  was direct threat to food safety to crops. Providing the basis for the security of National grain assessments and production under the conditions of reduced solar irradiance and elevated ozone concentration and other changes in atmospheric. Used open-top chamber (OTC) and black shading network to launch a fumigation level and two kinds of irradiance reduction degree. (field: CK, T1: shading 20%, T2: shading 40%, T3: 100nL/L  $O_3$  concentration, T4: 100nL/L  $O_3$  concentration and shading 20% compound, T5: 100nL/L  $O_3$  concentration and shading 40% compound). The results showed that contrasting to CK, the  $F_v/F_m$  (PS II maximum quantum yield),  $L_{(PFD)}$  (the relative limit of Photosynthetic function) of T1 treatment are similar and had no obvious changes, but the Yield,  $qP$  (Photochemical quenching coefficient),  $Y(NO)$  (the non

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目(41075114); 江苏省高校自然科学研究重大项目(09KJA170004)

**收稿日期:**2011-11-06; **修订日期:**2014-04-09

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenggf@nuist.edu.cn



regulation of energy dissipation in quantum yield),  $(1-qP)/NPQ$  (Light quantum excess degree) are decreased by 1.3%—21.5%, 7.5%—21.2%, 14.8%—20.6%, 27.7%—51.4% and  $NPQ$  (non photochemical quenching coefficient),  $Y(NPQ)$  (regulation of energy dissipation in quantum yield) are increased by 12.0%—31.9%, 53.4%—116%.  $Fv/Fm$  of T2 treatment had no significant changes, The Yield,  $qP$ ,  $L_{(PFD)}$ ,  $Y(NO)$ ,  $(1-qP)/NPQ$  were decreased by 13.2%—34.0%, 16.9%—36.2%, 6.8%—8.3%, 2.8%—16.0%, 23.1%—32.7%, The  $NPQ$ ,  $Y(NPQ)$  were increased downby 15.9%—38.2% 39.5%—65.4%. The  $Fv/Fm$ , Yield (Optical system II actual photochemical efficiency),  $qP$  of T3 treatment were decreased by 11.8%—12.6%, 19.1%—28.0%, 15.6%—43.1%. The  $L_{(PFD)}$ ,  $NPQ$ ,  $Y(NPQ)$ ,  $Y(NO)$ ,  $(1-qP)/NPQ$  increased by 1.1%—7.2%, 20.8%—83.6%, 12.6%—40.3%, 3.9%—22.2% obviously, 0.6%—34.1%.  $Fv/Fm$ ,  $L_{(PFD)}$  of T4 treatment were similar to CK and compared with CK, the Yield,  $qP$ ,  $Y(NO)$ ,  $(1-qP)/NPQ$  decreased by 12.7%—42.8%, 7.2%—14.4% 18.8%—27.5%, 16.4%—45.1% and  $NPQ$ ,  $Y(NPQ)$  increased by 13.4%—45.2% 6.9%—110.8%.  $Fv/Fm$ , Yield,  $qP$ ,  $L_{(PFD)}$ ,  $Y(NO)$ ,  $(1-qP)/NPQ$  of T5 treatment compared with CK, decreased by 30.4%—50.9%, 27.7%—43.2%, 2.2%—4.9%, 2.2%—10.2%, 23.3%—26.2%, 47.1%—61.6% and  $NPQ$ ,  $Y(NPQ)$  increased by 27.5%—51.6% 63.3%—142.7%. Those results showed that (1) the single factor of Ozone significantly changed photosynthetic activity and distribution of light energy of winter wheat leaves but the single factor of reduced solar radiation alleviated negative effect photosynthesis restriction of winter wheat to a certain extent. (2) Further, under the combined stress, the light energy of winter wheat distributed more to regulatory heat dissipation. Composite action enhanced obviously the heat dissipation capability of winter wheat Radiation attenuation effect could cause winter wheat at the ozone stress self-regulated to better adapt to the adverse environment. Reducing appropriate the amount of solar radiation under Ozone stress could alleviate and reduce the light injury of winter wheat leaves. (3) Reducing solar radiation under the Ozone stress could inhibition the light injury and ensure the winter wheat optical system function normally and the normal growth of Winter Wheat. (4) In spite of winter wheat on composite stress has a certain ability to adapt; the reduced solar irradiance and elevated ozone concentration are still an important issue facing national grain production.

**Key Words:** reduced solar irradiance; elevated ozone concentration; PS II; photosynthetic activity; energy dissipation

大气棕色云团含有大量的含碳、硫酸盐、硝酸盐、臭氧(O<sub>3</sub>)等气溶胶粒子。这些气溶胶的存在大大减弱到达地表的太阳辐射和引起地表 O<sub>3</sub> 浓度的升高。气溶胶浓度在 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  以上时,达到地面的太阳辐射明显减少;当气溶胶浓度达 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  时,可使地面太阳辐射减少 30%<sup>[1]</sup>。研究表明在 1960—2000 年间,中国地区到达地表的太阳总辐射每 10a 减少 3.3%<sup>[2]</sup>,IPCC 报告指出,中国从 20 世纪 50 年代到 90 年代,日光强度每 10a 下降 3%—4%,这种趋势在 70 年代以后愈发明显<sup>[3]</sup>。从 20 世纪 50 年代到 90 年代,其中华东地区在 1961—2008 年间,达到地面的太阳辐射每 10a 下降 2.05  $\text{W}/\text{m}^2$ <sup>[4]</sup>。

O<sub>3</sub> 是一种对陆地植被有很强毒害作用的气态污染物<sup>[5]</sup>,近几十年来,对流层 O<sub>3</sub> 浓度以每年 0.5%—2.5% 的速度增长<sup>[6]</sup>,目前全球已经达到平均 50 nL/L 左右(8h 平均值)<sup>[7]</sup>。按这种趋势,预计 2015—2050 年对流层中的 O<sub>3</sub> 浓度将增加 20%—25%,2100

年将增加 40%—60%<sup>[8]</sup>。近年来,由于我国 O<sub>3</sub> 前体物 NO<sub>x</sub> 等人为排放量的显著升高<sup>[9]</sup>。导致包括长江三角洲、珠江三角洲、黄河流域和四川盆地等在内的区域对流层 O<sub>3</sub> 浓度显著增加<sup>[10]</sup>,平均监测浓度已达到 50—60 nL/L。我国长江三角洲地区 O<sub>3</sub> 浓度日平均值已达 60 ppb,极值可达 160 ppb<sup>[11]</sup>。不断降低的太阳辐射和 O<sub>3</sub> 浓度的增加将会显著影响我国的生态平衡和农业发展,成为气象环境中新的研究热点问题。

刘悦秋、周晓红等<sup>[12-13]</sup>学者研究结果表明,异株荨麻随着遮荫程度的提高,其  $Fv/Fm$ 、 $Fv/Fo$  值降低,在弱光环境下生长的菹草发生了光抑制现象<sup>[6]</sup>。牟会荣、姜东等<sup>[14]</sup>研究发现,遮荫降低了灌浆前中期冬小麦旗叶光合速率( $P_n$ )、PS II 实际光化学效率(Yield)和光化学荧光猝灭系数( $qP$ )与干物质积累量,而提高了光系统 II 的初始荧光强度( $Fo$ )和最大光化学转化效率( $Fv/Fm$ )。遮荫主要是通过降低叶

片光系统Ⅱ的实际光化学效率和光化学荧光猝灭系数,引起单叶光合速率下降,最终降低小麦干物质积累。长期生长在太阳辐射减弱条件下的冬小麦遇到强光时,其PSⅡ原初光化学反应通过下调电子传递效率来适应其光照强度的不足(光化学猝灭系数 $qP$ 的下降),同时降低电子传递体(PQ)的活性(量子效率Yield降低),造成光能更多的向热耗散途径分配,光合能力降低<sup>[14]</sup>。郑有飞、赵泽等<sup>[15]</sup>研究表明,在 $(100\pm 8)$  nmol/mol的 $O_3$ 处理下,与野外相比,冬小麦表观量子产额、单位面积叶片活性以及PSⅡ最大光量子效率均无明显降低,并发现臭氧处理组的 $F_v/F_m$ 下降是对NPQ增加的响应,Yield降低是保护性调节的结果,其抗氧化系统及热耗散机制足以保护PSⅡ反应中心免遭光伤害。 $O_3$ 胁迫会改变光合色素含量和组成结构<sup>[16]</sup>,导致PSⅡ天线色素吸收光能分配结构发生改变<sup>[17]</sup>,抑制光合电子传递,降低了PSⅡ吸收光能用于光化学反应的比例,而促进光能向光伤害性途径分配,损伤光保护系统,从而加重过剩光能对PSⅡ反应中心的伤害<sup>[17-18]</sup>,最终降低作物光合速率,导致作物干物质积累和经济产量下降<sup>[19]</sup>。

综上所述,太阳辐射减弱和地表 $O_3$ 增加均对我国农业生产造成了很大的危害,因此,系统研究它们的复合作用对农作物影响的研究具有重要的现实意义。本文以冬小麦“扬麦13”为研究对象,分析了太阳辐射减弱和地表 $O_3$ 浓度增加复合作用下农作物不同生育期光合活性、光能分配利用及能量耗散机制的响应特征,为应对气候变化对我国农业生产的响应提供基础理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点的自然状况

试验点位于南京信息工程大学生态与农业气象试验站( $32^{\circ}03'N$ ,  $118^{\circ}51'E$ ),属亚热带湿润气候,年平均温度 $15.3^{\circ}C$ ,年降水总量 $1106.5\text{ mm}$ ,海拔 $22\text{ m}$ 。试验地前茬为大豆,土壤为黄棕壤,土质均匀细腻,肥力中等偏上。土壤肥力的测定于播种前进行,pH值为 $7.37$ ,有机质含量为 $10.35\text{ g/kg}$ ,全氮含量为 $0.55\text{ g/kg}$ ,全磷含量为 $0.47\text{ g/kg}$ ,全钾含量为 $0.21\text{ g/kg}$ 。

### 1.2 供试作物与培养

供试作物为冬小麦(*Triticum aestivum* 13),由江

苏省里下河研究所提供,为当地主栽品种。播种前挑选饱满均匀的种子,用 $1.0\text{ g/L}$ 的 $HgCl_2$ 消毒 $10\text{ min}$ ,再用去离子水反复洗净。试验地块宽 $20\text{ m}$ ,长 $40\text{ m}$ ,于2010年11月18日采用条播的方式,行距为 $25\text{ cm}$ ,播种量约为 $50\text{ kg}$ 。气室内水肥条件和田间管理与气室外大田保持一致。2011年3月24日进行遮阴和通臭氧处理直至收获前 $5\text{ d}$ 。遮阴时段为 $24\text{ h}$ ,曝气时段为每天 $8:00-16:00$ ,共 $8\text{ h}$ ,雨天不通气。冬小麦整个生育期大田管理与当地高产田一致,使水肥等不成为限制因子。在播种前施足底肥,每亩施 $46.15\text{ kg}$ 有机-无机复混肥料,其中N、P、K的含量分别约为 $20\%$ ,有机质为 $20\%$ ,腐殖酸为 $4\%$ 。

### 1.3 试验设置

本试验采用开顶式气室(OTC),由圆形不锈钢框架构成,高 $1.9\text{ m}$ ,上部为高 $0.25\text{ m}$ 的正八棱台面,底部为内径为 $2\text{ m}$ 的圆底。外面用透光很好的聚乙烯薄膜包裹。OTC气室曝气系统用与垂直主供气管相接的 $8$ 根水平布气管,每根管下侧面平均分布气孔,气孔与水平面呈 $45^{\circ}$ 夹角,布气装置的高度可以根据冬小麦的高度调整,这样可以更真实模拟气流的情况,使曝气更均匀。开顶室气室主要由气室、通风系统、 $O_3$ 发生系统、 $O_3$ 浓度控制和监测系统4个部分组成。试验期间采用WJ-H-Y5型高频 $O_3$ 发生器(购于南京万杰臭氧机电设备厂),气源由臭氧发生器内置的制氧机生成。臭氧发生器每小时生产 $5\text{ g}$ 臭氧,生成的臭氧借助轴流式风机(沈阳沈力牌sf2-2型)经过硅胶管和布气盘进入开顶式气室内。用臭氧检测仪监测气室内臭氧浓度,并调节气流调节阀控制气室内臭氧浓度稳定在设定的水平。用以上方法对各气室逐一进行调节,直至 $6$ 个室内浓度均到达相对稳定为止,之后每两天对室内的 $O_3$ 浓度检测 $1$ 次,以防出现异常问题。试验所用的遮荫棚采用镀锌钢管(南京桥旺管业有限公司生产),其内径为 $40\text{ mm}$ ,厚 $2\text{ mm}$ ,长 $6\text{ m}$ 。镀锌钢管深埋地下 $1\text{ m}$ ,地上部分 $3\text{ m}$ ,搭建成 $3\text{ m}\times 3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的立方体。遮荫棚搭建完成后,采用不同透光度的黑色遮荫网固定于竹杠上安置在钢管的上方、东西和南方向加盖遮荫网,朝北方向不加盖遮荫网,保持遮荫棚内部通风。整个遮荫棚 $4$ 个衔接处用可以调节松紧的扣件(南京桥旺管业有限公司生产)加以固定。荫棚搭架在OTC气室外,与OTC气室顶部、左右各保持 $50\text{ cm}$

间距,使遮荫棚内有良好的通风环境。试验区的东、西、南、北 4 个方向分别留出 2 m 的保护行,相邻两个处理组之间的距离为 250 cm,防止相互干扰。

试验设置了 6 个处理组,其中 1 个为对照组,2 个不同复合处理组,1 个臭氧单因子组,2 个遮光单因子处理组,具体如下:

(1) 遮光 20% 单因子组 有 OTC,不通臭氧,只有 80% 自然光照到达作物冠层(T1)。

(2) 遮光 40% 单因子组 有 OTC,不通臭氧,只有 60% 自然光照到达作物冠层(T2)。

(3) O<sub>3</sub> 100 单因子组 100 nL/L 臭氧熏气(T3)。

(4) O<sub>3</sub> 100 与遮光 20% 复合组 100 nL/L 臭氧和只有到达作物冠层 80% 自然光照复合(T4)。

(5) O<sub>3</sub> 100 与 40% 复合组 100 nL/L 臭氧和只有到达作物冠层 60% 自然光照复合(T5)。

(6) 野外大田组 对照组(有 OTC,不通臭氧且不作遮阴处理,观测对比分析)(CK)。

#### 1.4 指标的测定方法

熏气 32 d 后,用德国 WALZ 公司的 Diving-PAM 测量冬小麦的叶绿素荧光。于 21:00 开始对叶片进行 30 min 的暗适应后测量诱导曲线(induction curve, IC),光化光强度为 447  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,每个处理 4 个重复。测量顺序为 T1—T2—T3—T4—T5—CK。光系统 II (photosystem II, PS II) 的最大光量子产量( $F_v/F_m$ )、PS II 的实际光化学效率(Yield)、光化学淬灭系数( $qP$ )、非光化学淬灭系数( $NPQ$ )由仪器输出,其他参数按以下公式计算。PS II 处调节性能量耗散的量子产量: $Y(NPQ) = F_t / F_m' - F_t / F_m$ ,式中  $F_t$  为稳态实时荧光, $F_m'$  为稳态最大荧光, $F_m$  为充分暗适应后的最大荧光;PS II 处非调节性能量耗散的量子产量: $Y(NO) = F_t / F_m$ ,式中  $F_t$  及  $F_m$  同上;

光合功能的相对限制:

$$L_{(PFD)} = 1 - (qP \times F_v' / F_m') / 0.83$$

式中,1 为  $qP$  的最适值,0.83 为  $F_v' / F_m'$  的最适值, $F_v' = F_m' - F_o$ ,  $F_m'$  与  $F_t$  同上,  $F_o$  为充分暗适应后的最小荧光;

光量子过剩程度:  $(1 - qP) / NPQ$

式中, $qP$  为光化学淬灭系数, $NPQ$  为非光化学淬灭系数。

#### 1.5 数据处理分析

运用 ANOVA 进行相关性分析和平均数的 LSD 差异显著性检验, $P < 0.05$  为差异显著, $P < 0.01$  为差异极显著。

### 2 结果与分析

#### 2.1 地表太阳辐射减弱及 O<sub>3</sub> 浓度增加单因子对冬小麦 PS II 光能分配及利用的影响

由(图 1)所示,在地表太阳辐射减弱条件下,冬小麦 PS II 的最大光量子产量  $F_v/F_m$  随着太阳辐射减弱程度的增加并无发生过多明显变化( $P > 0.05$ )。单因子 O<sub>3</sub> 胁迫下,灌浆期 PS II 的最大光量子产量  $F_v/F_m$  显著降低( $P < 0.05$ ),T3 较 CK 下降了 11.8%—12.6%,灌浆期降幅最大。辐射减弱胁迫对 PS II 反应中心的活性并无抑制作用,O<sub>3</sub> 胁迫显著降低了冬小麦灌浆期 PS II 反应中心的最大光量子产量  $F_v/F_m$ 。

(图 1)为经过充分暗适应后,光合作用速率在 447  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  的光化光下逐渐上升至稳定时 PS II 反应中心的实际光化学效率(Yield)。在地表太阳辐射减弱条件下,冬小麦 PS II 的 Yield 较 CK 呈下降趋势,且随着辐射减弱程度的增加,下降幅度越大。T1 和 T2 较 CK 分别下降了 1.3%—21.5% 和 13.2%—34.0%,扬花期降幅均达最大且达到显著水平( $P < 0.05$ )。O<sub>3</sub> 胁迫下,T3 较 CK 扬花期与成熟期显著降低( $P < 0.05$ ),分别降低了 19.1% 和 28.0%。辐射减弱与 O<sub>3</sub> 浓度升高胁迫显著降低了光合诱导阶段 PS II 反应中心电荷分离的实际效率。

随着地表太阳辐射减弱和 O<sub>3</sub> 浓度升高,光化学淬灭系数  $qP$  与 CK 相比呈降低趋势(图 1)。T1 较 CK 下降了 7.5%—21.2%,T1 在 3 个生育期内较 CK 均未达到显著差异水平( $P > 0.05$ );T2 较 CK 下降了 16.9%—36.2%,T2 在扬花期和成熟期较 CK 差异显著( $P < 0.05$ ),降幅最大,随着辐射减弱程度增加,光化学淬灭系数  $qP$  降幅越大。T3 较 CK 分别降低了 15.6%、43.1%、29.2%,灌浆期较 CK 显著降低且降幅最大( $P < 0.05$ )。T2、T3 处理使 PS II 受体侧原初醌受体( $Q_A$ )重新氧化受限,显著降低了 PS II 反应中心的开放程度。

(图 1)为冬小麦的光合作用相对其最适状态( $qP = 1, F_v' / F_m' = 0.83$ )受到的限制( $L_{(PFD)}$ )。随着



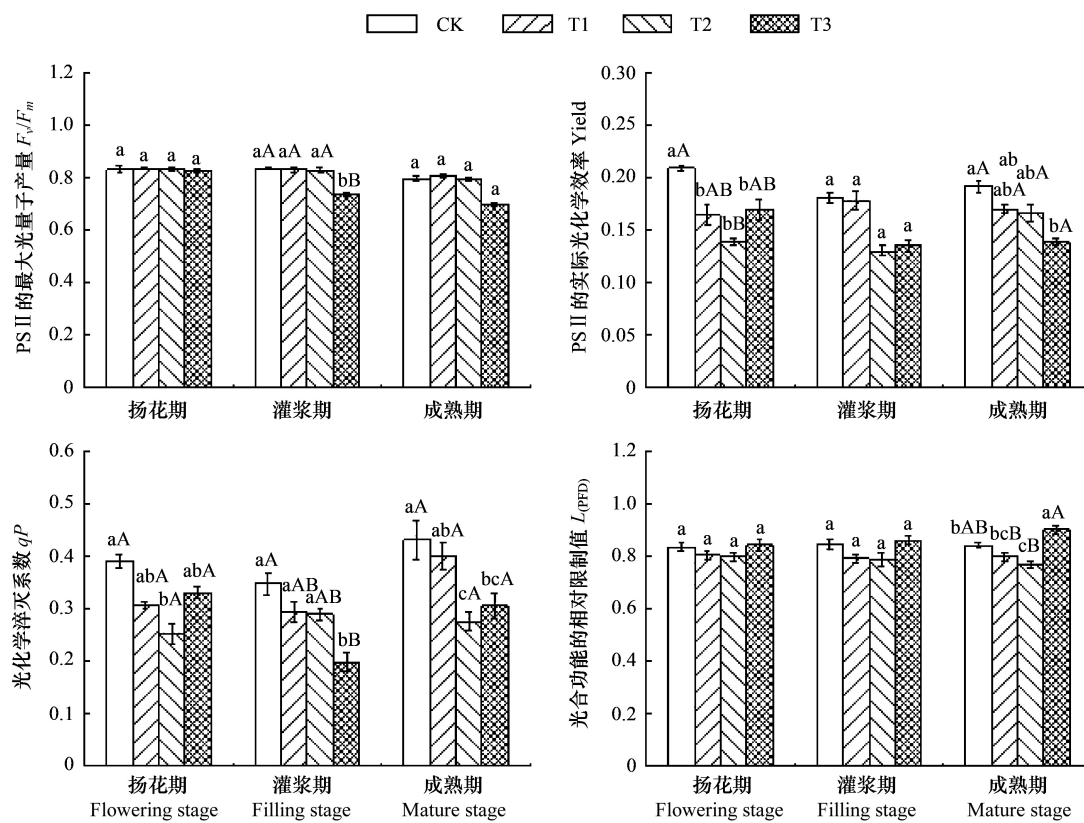


图1 地表太阳辐射减弱及O<sub>3</sub>浓度增加单因子对冬小麦不同生育期叶片Fv/Fm、Yield、qp和L<sub>(PFD)</sub>的影响

Fig.1 Effects of elevated ozone concentration and reduced solar irradiance on the Fv/Fm、Yield、qp and L<sub>(PFD)</sub> of winter wheat

图中误差线为SD( $n=3,4$ ),同生育期的不同处理用LSD法进行差异显著性检验,其上方字母不同表示差异显著( $P<0.05$ );CK为对照组;T1为平均太阳辐射强度减弱程度20%;T2为平均太阳辐射强度减弱程度40%;T3为平均O<sub>3</sub>浓度100 nL/L

地表太阳辐射减弱,T1、T2较CK其 $L_{(PFD)}$ 逐渐下降,T1较CK下降不显著,灌浆期与成熟期T2较CK分别下降了6.8%和8.3%。随着O<sub>3</sub>浓度升高,T3较CK升高了1.1%—7.2%,成熟期增幅最大,且较CK差异显著( $P<0.05$ )。辐射减弱缓解了冬小麦光合作用的限制,而O<sub>3</sub>胁迫对冬小麦的光合作用造成了明显的抑制作用。

表1是辐射减弱及O<sub>3</sub>胁迫下冬小麦的 $F_o$ 及 $F_m$ 。 $F_o$ 是用不足以引起光合代谢但可激发色素本

底荧光的弱光激发出的荧光,简言之,就是色素的本底荧光。 $F_m$ 是经过充分暗适应后,当所有的电子门都处于开放状态时,突然照强光让所有的电子门瞬间关闭所得到的荧光,也就是本来应该进行光合的能量转化成了荧光。辐射减弱胁迫条件下,T1、T2处理的 $F_o$ 较CK均升高。O<sub>3</sub>胁迫条件下,T3的 $F_o$ 在3个生育期均高于CK,但扬花期差异显著( $P<0.05$ ),灌浆和成熟期差异不显著( $P>0.05$ )。T1—T3处理组的 $F_m$ 在3个生育期均较CK差异不明显( $P>0.05$ )。

表1 地表太阳辐射减弱及O<sub>3</sub>浓度增加对冬小麦叶片不同生育期 $F_o$ 及 $F_m$ 的影响

Table 1 Effects of elevated ozone concentration and reduced solar irradiance on  $F_o$  and  $F_m$  of winter wheat flag leaves in different stages

		CK	T1	T2	T3
扬花期	$F_o$	298.33±6.11bB	304.75±5.86bB	305.51±16.52bB	337.67±1.26aA
Flowering stage	$F_m$	1697.25±133.51a	1810.37±144.71a	1854.25±140.54a	1751.63±73.45a
灌浆期	$F_o$	324.33±7.57a	327.50±21.15a	327.67±38.21a	343.15±12.15a
Filling stage	$F_m$	1975.52±113.92a	1870.25±111.07a	1939.25±92.90a	1835.25±106.63a
成熟期	$F_o$	328.51±13.63a	331.75±9.64a	332.52±13.20a	348.33±54.35a
Mature stage	$F_m$	1616.53±60.57a	1632.25±93.83a	1822.75±49.99a	1311.57±85.65a

同生育期的不同处理用LSD法进行差异显著性检验,其右边字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )

## 2.2 地表太阳辐射减弱及 O<sub>3</sub> 浓度增加同时胁迫对冬小麦 PS II 光能分配及利用的影响

在地表太阳辐射减弱及 O<sub>3</sub> 浓度增加同时胁迫下,PS II 的最大光量子产量  $F_v/F_m$  逐渐降低(图 2)。T4 较 CK 在 3 个生育期下降幅度均较小,差异不显著( $P>0.05$ )。T5 较 CK 下降了 2.2%—4.9%,灌浆期降幅最大,扬花期、灌浆期显著低于 CK ( $P<0.05$ )。由(图 2)知 T4 处理 Yield 较 CK 降低了

18.8%—27.5%,扬花期降幅最大,只有扬花期显著低于 CK ( $P<0.05$ )。T5 处理 Yield 较 CK 降低了 30.4%—50.9%,扬花期降幅最大,3 个生育期均显著低于 CK ( $P<0.05$ )。T4 与 T5 组间差异不显著( $P>0.05$ ),这一变化规律与太阳辐射减弱单因子胁迫对冬小麦 PS II 的实际光化学效率 Yield 相似即遮光强度越大,Yield 较 CK 降低幅度越大。

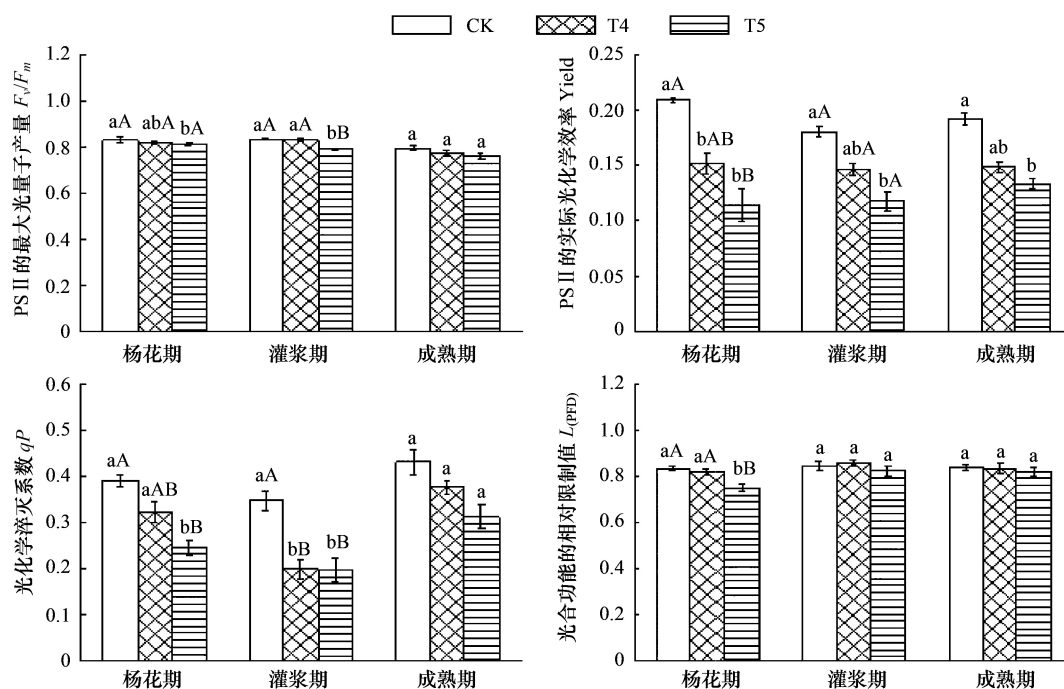


图 2 复合胁迫对冬小麦不同生育期叶片  $F_v/F_m$ 、Yield、 $qP$  和  $L_{(PFD)}$  的影响

Fig.2 Effects of Compound stress on the  $F_v/F_m$ 、Yield、 $qP$  and  $L_{(PFD)}$  of winter wheat

图中误差线为 SD( $n=3,4$ ),同生育期的不同处理用 LSD 法进行差异显著性检验,其上方字母不同表示差异显著( $P<0.05$ ); CK 为对照组; T4 为平均太阳辐射强度减弱程度 20% 与臭氧浓度 100 nL/L 复合; T5 为平均太阳辐射强度减弱程度 40% 与臭氧浓度 100 nL/L 复合

光化学淬灭系数( $qP$ )在复合胁迫条件下逐渐降低(图 2)。T4 较 CK 降低了 12.7%—42.8%,仅灌浆期显著低于 CK ( $P<0.05$ )且降幅最大;T5 较 CK 下降 27.7%—43.2%,灌浆期降幅最大,扬花期、灌浆期均显著低于 CK ( $P<0.05$ )。在扬花期 T4、T5 组间差异达显著水平( $P<0.05$ )。冬小麦在复合胁迫下,叶片光合功能相对限制值( $L_{(PFD)}$ )较 CK 降低(图 2)。T4 处理组在扬花期和成熟期较 CK 有所降低,但差异均不显著( $P>0.05$ );T5 较 CK 降低 2.2%—10.2%,扬花期降幅最大且较 CK 差异显著( $P<0.05$ ),扬花期 T4、T5 处理间差异达显著水平( $P<0.05$ )。

在复合胁迫条件下,扬花期到成熟期,T4 处理  $F_o$  较 CK 升高 0.8%—6.8%,扬花期增幅最大;T5 处

理  $F_o$  较 CK 升高 6.5%—23.8%,扬花期增幅最大;T4 和 T5 处理组  $F_m$  值在扬花和灌浆期较 CK 分别升高 6.7%—17.7% 和 9.1%—13.2%,成熟期均较 CK 下降。以上表明 T5 处理组受高浓度臭氧和弱辐射影响程度较大。

## 2.3 地表太阳辐射减弱及 O<sub>3</sub> 浓度增加单因子对冬小麦 PS II 能量耗散机制的影响

由(图 3)可知,在太阳辐射减弱条件下,冬小麦叶片的非光化学淬灭系数( $NPQ$ )升高。T1—T3 较 CK 升高,T1 处理组较 CK 升高 53.4%—116% (成熟期增幅最大),3 个生育期均显著高于 CK ( $P<0.05$ )。T2 较 CK 上升 39.5%—65.4% (扬花期增幅最大),与 CK 均未达显著水平 ( $P>0.05$ )。O<sub>3</sub> 胁迫



下, T3 较 CK 增加 20.8%—83.6% (扬花期增幅最大), 仅扬花期与 CK 差异显著 ( $P < 0.05$ )。灌浆期与成熟期, 有  $T1 > T2 > T3$ ; 扬花期、灌浆期 T1、T2、T3 差

异不显著 ( $P > 0.05$ ), 成熟期 T1 与 T3 差异显著。T1、T2、T3 处理下冬小麦的热耗散增强。

表 2 复合胁迫对冬小麦叶片不同生育期  $F_o$  及  $F_m$  的影响

Table 2 Effects of Compound stress on  $F_o$  and  $F_m$  of winter wheat flag leaves in different stages

		CK	T4	T5
扬花期 Flowering period	$F_o$	298.33±6.11bB	318.75±21.53bB	369.25±7.89aA
	$F_m$	1697.25±133.51bA	1880.75±142.60abA	1961.50±51.76aA
灌浆期 Filling stage	$F_o$	324.33±7.57cB	349.75±11.47bB	384.51±16.34aA
	$F_m$	1975.52±113.92a	2109.53±102.73a	2020.31±139.18a
成熟期 Maturation stage	$F_o$	328.53±13.63a	331.25±43.88a	349.75±28.93a
	$F_m$	1616.56±60.57 aA	1373.54±101.553 bB	1555.25±118.22 aAB

同生育期的不同处理用 LSD 法进行差异显著性检验, 其右边字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

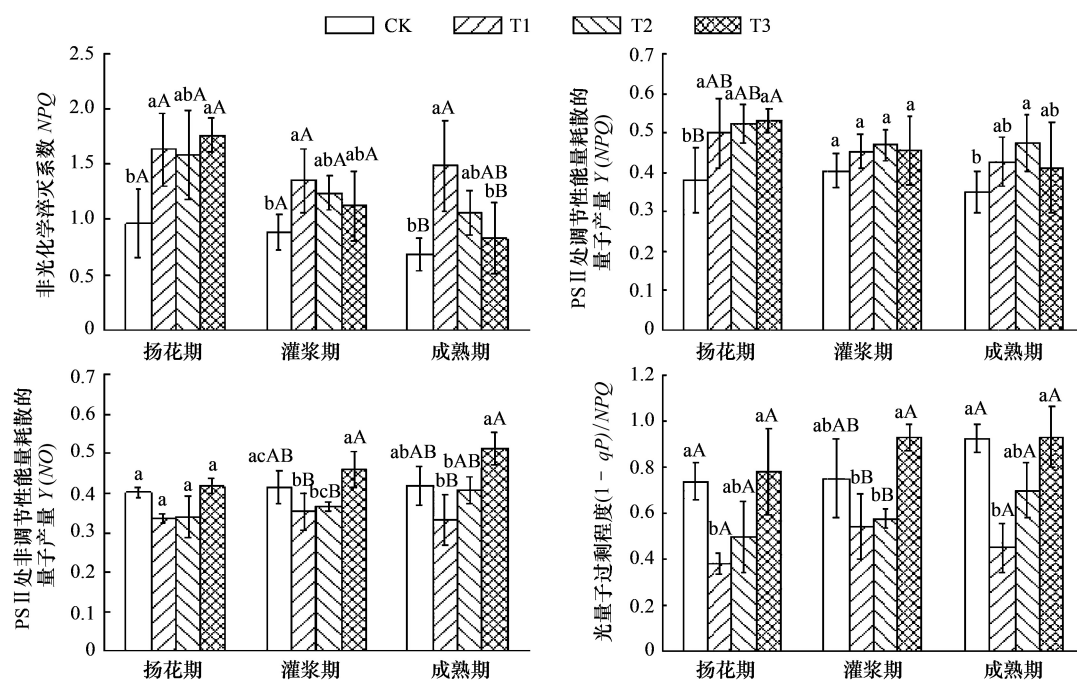


图 3 地表太阳辐射减弱及  $O_3$  浓度增加单因子对冬小麦不同生育期能量耗散机制的影响

Fig. 3 Effects of elevated ozone concentration and reduced solar irradiance on the energy dissipation of winter wheat in different stages

(图 3) 为在太阳辐射减弱及地表  $O_3$  浓度增加条件下, PS II 处调节性能量耗散的量子产量 ( $Y(NPQ)$ )。T1 较 CK 升高 12.0%—31.9% (扬花期增幅最大), 扬花期显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。T2 较 CK 增加 15.9%—38.2% (扬花期增幅最大), 除灌浆期外均显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。T3 较 CK 升高 12.6%—40.3% (灌浆期增幅最小, 扬花期最大)。仅扬花期较 CK 差异显著 ( $P < 0.05$ ), T1、T2、T3 处理间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。T1、T2、T3 处理下冬小麦的调节性热耗散显著增强。

随着太阳辐射减弱和表  $O_3$  浓度增加, PS II 处非

调节性能量耗散的量子产量  $Y(NO)$  较 CK 波动变化 (图 3)。T1 较 CK 下降 14.8%—20.6%, 成熟期降幅最大, 灌浆和成熟期显著低于 CK ( $P < 0.05$ )。T2 较 CK 降低 2.8%—16.0%, 扬花期降幅最大, 较 CK 差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。T3 较 CK 升高 3.9%—22.2%, 成熟期增幅最大, 与 CK 不显著 ( $P < 0.05$ )。除扬花期外, T1、T2、T3 处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) 且大致呈  $T1 < T2 < T3$ 。由 (图 3) 可知, T1 处理组光量子过剩程度  $(1-qP)/NP$  较 CK 下降 27.7%—51.4%, 成熟期降幅最大, 扬花和成熟期显著低于 CK ( $P < 0.05$ ); T2 较 CK 降低 23.1%—32.7% (扬花期降幅最

大),3 个生育期与 CK 均不显著 ( $P>0.05$ );T3 较 CK 升高 0.6%—34.1% (灌浆期增幅最大),与 CK 不显著 ( $P>0.05$ )。扬花期和灌浆期,T3 与 T1 差异显著 ( $P<0.05$ ),T1 和 T2 间差异不显著 ( $P>0.05$ );成熟期,T1 与 T3 处理间差异达到显著水平 ( $P<0.05$ ),T1、T2、T3 间大致呈  $T1<T2<T3$ ,与  $Y(NO)$  相似。T3 处理显著提高了灌浆期冬小麦同一光强下的光量子过剩程度。

#### 2.4 地表太阳辐射减弱及高浓度 $O_3$ 同时作用对冬小麦 PS II 光能分配及利用的影响

由(图 4)可知,在太阳辐射减弱条件下,冬小麦叶片的非光化学淬灭系数(NPQ)升高。T4 和 T5 较 CK 分别上升 6.9%—110.8% (成熟期增幅最大)和

63.3%—142.7% (成熟期增幅最大),灌浆期和成熟期均显著高于 CK ( $P<0.01$ );T4 和 T5 间除成熟期外,差异均极显著 ( $P<0.01$ ),且较 CK 大致有  $CK<T4<T5$ 。T4、T5 处理显著增强了冬小麦的热耗散能力。

(图 4)为在太阳辐射减弱及地表  $O_3$  浓度增加条件下,PS II 处调节性能量耗散的量子产量  $Y(NPQ)$ ,整体变化趋势与(图 3)相似  $CK<T4<T5$ 。T4 较 CK 升高 13.4%—45.2% (成熟期增幅最大),除扬花期外,均显著高于 CK ( $P<0.01$ );T5 较 CK 增加 27.5%—51.6% (成熟期增幅最大),3 个生育期较 CK 差异均达到显著水平 ( $P<0.05$ )。T4、T5 处理间差异不显著 ( $P>0.05$ )。T4、T5 处理下冬小麦的调节性能量耗散得到显著增强。

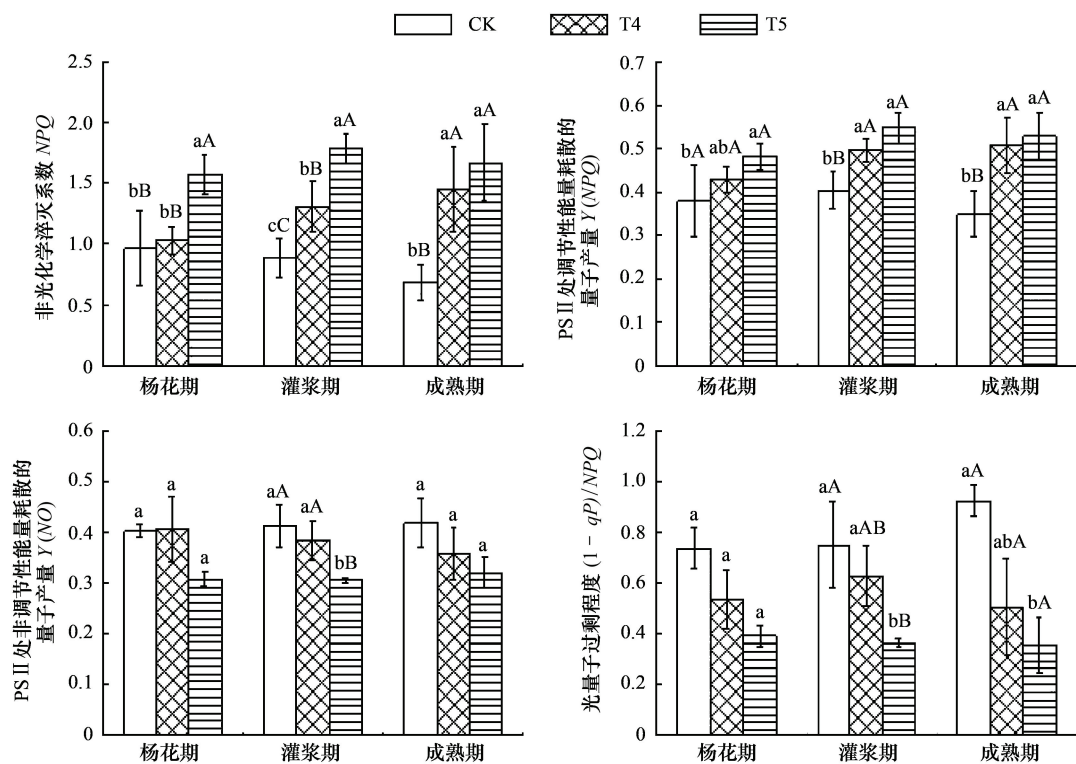


图 4 复合胁迫对冬小麦不同生育期能量耗散机制的影响

Fig.4 Effects of compound stress on the energy dissipation of winter wheat

随着太阳辐射减弱和表  $O_3$  浓度增加,PS II 处非调节性能量耗散的量子产量  $Y(NO)$  降低(图 4)。扬花期 T4 与 CK 相当;灌浆期和成熟期,T4 较 CK 降低 7.2%—14.4% (成熟期降幅最大),3 个生育期较 CK 差异均不显著 ( $P>0.05$ );T5 较 CK 下降 23.3%—26.2% (扬花期降幅最大),灌浆期 T5 较 CK 差异显著 ( $P<0.01$ ),T4、T5 处理间仅成熟期差异显著 ( $P<0.05$ ),且较 CK 大致呈  $CK>T4>T5$  变化。T4—T5 处

理降低了过剩光能对叶片的伤害。

由(图 4)可知,光量子过剩程度  $(1-qP)/NPQ$  下降。T4 较 CK 下降 16.4%—45.1% (成熟期降幅最大),与 CK 差异均不显著 ( $P>0.05$ );T5 较 CK 降低 47.1%—61.6% (成熟期降幅最大),灌浆和成熟期较 CK 差异均显著 ( $P<0.05$ )。T4、T5 处理间除灌浆期外差异均未达到显著水平 ( $P>0.05$ )。较 CK 大致呈  $CK>T4>T5$  变化趋势,与  $Y(NO)$  变化情况相似,

与 NPQ、 $Y(NPQ)$  变化趋势相反。复合胁迫明显抑制了 T4、T5 处理组冬小麦光量子过剩程度。

### 3 讨论

光合作用是植物生理的核心功能,其运转状况可用来表征植物的健康状况与活力<sup>[17]</sup>。冬小麦的光合作用对弱辐射和高浓度  $O_3$  非常敏感,而叶绿素荧光是研究植物光合功能的快速、无损探针<sup>[14,20]</sup>。光合系统天线色素分子吸收的光能有 3 个可能去向:大部分用于推动光化学反应,少量以荧光形式发射,过量的激发能以热耗散的形式耗散掉。光能在 3 种途径中分配比例的变化是光合机构运行状态的有效指示<sup>[21]</sup>。

$F_v/F_m$  为 PS II 反应中心的内禀荧光能转换效率,表征光合系统原初光能转换效率的高低,非胁迫条件下该参数的变化极小,在 0.8—0.85 之间,不受物种和生长条件影响,在辐射减弱胁迫条件下,T1、T2 的  $F_v/F_m$  较 CK 并无大的变化,表明辐射减弱对 PS II 反应中心的活性并无明显抑制作用,此时冬小麦虽已受到一定程度地胁迫但仍可通过增强热耗散(NPQ 和  $Y(NPQ)$  较 CK 显著增加)有效地保护 PS II 反应中心免遭过剩光能地严重伤害<sup>[22]</sup>。 $O_3$  胁迫显著降低了 T3 处理组冬小麦生育后期 PS II 反应中心的最大光量子产量  $F_v/F_m$ ,这是冬小麦叶片依赖叶黄素循环的热耗散特征之一,主要是由于热耗散导致传递给光化学反应中心的光能减少<sup>[20]</sup>;同时 PS II 捕光天线的 NPQ 增加、 $qP$  下降也可能导致  $F_v/F_m$  的显著下降<sup>[23]</sup>。许大全<sup>[20]</sup>认为  $F_o$  升高是光破坏的一个依据, $F_o$  升高和 D1 蛋白损失之间存在着良好的相关。但上述解释仅在部分情况下成立,大量研究显示  $F_o$  升高是 PS II 反应中心失活的结果,3 种胁迫条件下, $F_o$  值较 CK 显著升高,这是与 PS II 反应中心不同程度受损有关。图 1 可知 T1、T2 处理组  $L_{(PFD)}$  较 CK 降低;T3 较 CK 显著增加;T4、T5 处理组的  $L_{(PFD)}$  较 CK 也降低。表明辐射减弱对冬小麦的光合作用起到了积极的正效应,臭氧浓度增加对冬小麦的光合作用造成了严重的限制,复合胁迫使冬小麦的光合作用得以正常运行,辐射减弱一定程度上弥补了臭氧胁迫对冬小麦的负效应,因为 NPQ 的大小一定程度上反映了植株的热耗散能力,同时也反映了光能分配比例的情况,即经过长期辐射强度减

弱处理下的冬小麦已经适应了较低光照强度的生存条件,其更善于将过剩光能分配到调节性热耗散体系中,防止机体受到过剩光能的伤害<sup>[15]</sup>。 $Yield$  为 PS II 的实际光化学效率,扬花期 T1—T5 处理组较 CK 均显著下降。随着辐射减弱程度的增加,T2 的  $Yield$  值显著低于 T1 处理,T5 处理的  $Yield$  值显著低于 T4。 $O_3$  胁迫显著降低了 T3 光合诱导阶段 PS II 反应中心电荷分离的实际效率。本研究发现冬小麦在辐射减弱、 $O_3$  浓度增加、两因子同时作用下, $Yield$  明显降低,光能更多的向热耗散途径分配<sup>[24]</sup>,即 NPQ 显著增加。 $qP$  为光化学淬灭系数,逆境胁迫均降低了 5 个处理组的  $qP$  值,使 PS II 受体侧原初醌受体重新氧化  $Q_A$  的能力下降及卡尔文循环受抑制,即 T1—T5 处理组显著提高了冬小麦 PS II 的激发压( $1-qP$ ),导致 PS II 反应中心关闭的比例增加,进而引起 T1—T5 处理组  $Y(NPQ)$  的升高<sup>[25]</sup>。( $1-qP$ )/NPQ 表征光量子过剩程度。T1、T2、T4、T5 较 CK 降低,T3 较对照组 CK 有所升高,说明辐射减弱胁迫抑制了冬小麦的光能过剩,而臭氧胁迫一定程度上提高了同一光强下的光量子过剩程度,对冬小麦的光合作用造成负面影响。NPQ 为非光化学淬灭系数,表征植物耗散过剩光能为热的能力,即光保护能力<sup>[26]</sup>,其值增加表示光系统热耗散增强,同时也说明光保护机制仍能正常运行。随着太阳辐射减弱程度的增大和臭氧浓度增加,T1—T3 处理非光化学淬灭系数 NPQ 较 CK 升高( $T3>T1>T2>CK$ ),辐射减弱 40%时光保护能力有所减弱,但强于对照。复合胁迫条件下,T4、T5 较 CK 显著升高,呈  $T5>T4$  变化与辐射减弱程度较一致。逆境胁迫使 T1—T5 处理组的非光化学淬灭系数显著增加,光系统热耗散增强,在胁迫条件下,冬小麦仍能较好的自我调节正常运行光保护机制以更好地适应逆境生长<sup>[15]</sup>。 $Y(NPQ)$  为通过光保护途径以热的形式耗散掉的光能所占的比例,是光保护的重要指标,反映 PS II 处理过剩光能的能力,是 NPQ 保护机制的组成部分<sup>[27]</sup>。T1—T5 处理组  $Y(NPQ)$  显著增加,本研究发现辐射减弱和臭氧浓度增加均能使 PS II 处理过剩光能的能力得到显著增强<sup>[15]</sup>。 $Y(NO)$  表示因 PS II 反应中心关闭引起的以热和荧光的形式耗散掉的过剩光能所占的比例,是光伤害的重要指标,其上升表明光化学能量转换和保护性的调节机制(如热耗散)已不足以将



植物吸收的过剩光能完全耗散掉,此时植物可能已经受到损伤,或继续照光将受到损伤<sup>[20]</sup>。T1、T2 处理组  $Y(NO)$  较对照下降,辐射减弱对冬小麦后期的光伤害起到抑制作用,且随着辐射减弱程度的增加,抑制作用越明显, $Y(NO)$  下降是由于逆境胁迫中冬小麦的热耗散能力得到增强即增强了冬小麦处理过剩光能的能力上升所影响的。复合作用抑制 T4、T5 的光伤害,保证了冬小麦光系统功能的正常进行及冬小麦的正常生长发育<sup>[20]</sup>。

#### 4 结论

(1) 在太阳辐射减弱和地表臭氧浓度增加复合胁迫下,冬小麦叶片吸收的光能更多的向调节性热耗散途径分配。

(2) 在复合胁迫条件下,辐射减弱一定程度上能使冬小麦较好的自我调节正常运行光保护机制以更好地适应逆境生长。

(3) 虽然长三角地区的冬小麦对地表太阳辐射减弱和臭氧浓度增加具有很强的适应性,地表 O<sub>3</sub> 浓度升高和弱辐射仍将是我国粮食生产与粮食安全面临的一大挑战。

#### References:

- [ 1 ] Zhao D, Luo Y, Gao G, Zhu C H, Shen Y B. Long-term changes and essential climatic characteristics of Sunshine Duration over China during 1961—2007. *Resources Science*, 2010, 32(4): 701-711.
- [ 2 ] Xia X G, Li Z Q, Holben B, Wang P C, Eck T, Chen H B, Cribb M, Zhao Y X. Aerosol optical properties and radiative effects in the Yangtze Delta Region of China. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 122(12): 1-16.
- [ 3 ] UNEP. Assessment Report, Center for Clouds, Chemistry and Climate (C<sub>4</sub>). San Diego: University of California, 2002.
- [ 4 ] Yin Q, Zhang H, He J H. Long-term change of surface total solar radiation and influencing factors over East China in recent 48 years. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, 6(1): 37-46.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] Stockwell W R, Kramm G, Scheel H E, Mohnen V A, Seiler W. Ozone formation, destruction and exposure in Europe and the United States. *Ecological Studies*, 1997, 127: 1-38.
- [ 7 ] Fiscus E L, Booker F L, Burkey K O, Usda A. Crop responses to ozone: uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning. *Plant, Cell and Environment*, 2005, 28(8): 997-1011.
- [ 8 ] Meehl G A, Stocker T F, Collins W D, Friedlingstein P, Gaye A T, Gregory J M, Kitoh A. *Global Climate Projections*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 747-845.
- [ 9 ] WenYuan Tang, ChunSheng Zhao, FuHai Geng, Li Peng, GuangQiang Zhou, Wei Gao, JianMing Xu and XueXi Tie. Study of ozone “weekend effect” in Shanghai. *Science in China Series D: Earth Sciences*.2008,9(51):1350-1364.
- [ 10 ] Luo C, Zhou X J, Lam K S, Wang T, Chameides W L, John J C S. A nonurban ozone air pollution episode over eastern China: observations and model simulations. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(D2): 1889-1908.
- [ 11 ] Liu J D, Zhou X J, Yu Q, Yan P, Guo J P, Ding G A. Simulation of the impact of ozone on rice canopy photosynthesis. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(3): 289-294.
- [ 12 ] Liu Y Q, Sun X Y, Wang Y, Liu Y. Effects of shades on the photosynthetic characteristics and chlorophyll II fluorescence parameters of *urtica dioica*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3458-3464.
- [ 13 ] Zhou X H, Wang G X, Feng B B. Influence of the growth and photosynthetic characteristics of potato *crispus* in light. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4): 1342-1347.
- [ 14 ] Mou H R, Jiang D, Dai T B, Jing Q, Cao W X. Effect of Shading on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics in wheat flag leaves. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(2): 599-606.
- [ 15 ] Zheng Y F, Zhao Z, Wu R J, Hu C D, Liu H J. Effects of Long-term ozone exposure on chlorophyll a fluorescence and gas exchange of winter-wheat leaves. *Environmental Science*, 2010, 31(2): 472-479.
- [ 16 ] Kivimäenpää M, Selldén G, Sutinen S. Ozone-induced changes in the chloroplast structure of conifer needles, and their use in ozone diagnostics. *Environmental Pollution*, 2005, 137(3): 466-475.
- [ 17 ] Calatayud A, Iglesias D J, Talón M, Barreno E. Effects of 2-month ozone exposure in spinach leaves on photosynthesis, antioxidant systems and lipid peroxidation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2006, 41(9): 839-845.
- [ 18 ] Liang J, Zhu J G, Zeng Q, Xie Z B, Liu G, Tang H Y, Cao J L, Zhu C W. Effects of O<sub>3</sub>-Free (ozone-free air control enrichment) on gas exchange and chlorophyll II fluorescence of rice leaf. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4): 613-618.
- [ 19 ] Wang C Y, Bai Y M. *The ozone and aerosols concentration effects on crops research*. Beijing: China Meteorological Press, 2007.
- [ 20 ] Xu D Q. *Efficiency of Photosynthesis*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2002: 157-261.
- [ 21 ] Klughammer C, Schreiber U. Complementary PS II quantum yields calculated from simple fluorescence parameters

- measured by PAM fluorometry and the Saturation Pulse method. PAMApp Lication Notes, 2008, 1(3): 27-35.
- [22] Yang X H, Zou Q, Zhao S J. Photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence in leaves of cotton plants grown in full light and 40% sunlight. Chinese Journal of Plant Ecology, 2005, 29(1): 8-15.
- [23] Zhou Y T, Ma H Q, Liang L J, Hong H, Hu L T, Sun M, Wu C B. Photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence in leaves of catharanthus grown under different light intensities. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(11): 3589-3595.
- [24] Jia S F, Dong S T, Wang K J, Zhang J W, Liu P. Effects of weak light stress on grain yield and photosynthetic traits of maize. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(11): 2456-2461.
- [25] Gao S S, Zhu Y S, Feng H. Effects of continuous shading on growth and development and fluorescent index of chlorophyll for seedling stage of Tomato. Liaoning Agricultural Sciences, 2005, (3): 31-32.
- [26] Zheng Q W, Wang X K, Feng Z Z, Song W B, Feng Z W. Ozone effects on chlorophyll content and lipid peroxidation in the in Situ leaves of winter wheat, Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(11): 2240-2244.
- [27] Cailly A L, Rizza F, Genty B, Harbinson J. Fate of excitation at PSII in leaves. The non-Photochemical side. Plant Physiology and Biochemistry, 1996, (special issue): 86.
- [11] 刘建栋, 周秀骥, 于强, 颜鹏, 郭建平, 丁国安. 近地层大气臭氧对水稻光合作用影响的数值模拟. 环境科学学报, 2003, 23(3): 289-294.
- [12] 刘悦秋, 孙向阳, 王勇, 刘音. 遮荫对异株荨麻光合特性和荧光参数的影响. 生态学报, 2007, 27(8): 3458-3464.
- [13] 周晓红, 王国祥, 冯冰冰. 光照对菹草 (*Potamogeton crispus*) 幼苗生长发育和光合荧光特性的影响. 生态环境, 2008, 17(4): 1342-1347.
- [14] 牟会荣, 姜东, 戴廷波, 荆奇, 曹卫星. 遮荫对小麦旗叶光合及叶绿素荧光特性的影响. 中国农业科学, 2008, 41(2): 599-606.
- [15] 郑有飞, 赵泽, 吴荣军, 胡程达, 刘宏举. 臭氧胁迫对冬小麦叶绿素荧光及气体交换的影响. 环境科学, 2010, 31(2): 472-479.
- [18] 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] 王春乙, 白月明. 臭氧和气溶胶浓度变化对农作物的影响研究. 北京: 气象出版社, 2007.
- [20] 许大全. 光合作用效率. 上海: 上海科学技术出版社, 2002: 157-261.
- [22] 杨兴洪, 邹琦, 赵世杰. 遮荫和全光下生长的棉花光合作用和叶绿素荧光特征. 植物生态学报, 2005, 29(1): 8-15.
- [23] 周忆堂, 马红群, 梁丽娇, 洪鸿, 胡丽涛, 孙敏, 吴能表. 不同光照条件下长春花的光合作用和叶绿素荧光. 动力学特征, 2008, 41(11): 3589-3595.
- [24] 贾世芳, 董树亭, 王空军, 张吉旺, 刘鹏. 弱光胁迫对玉米产量及光合特性的影响. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2456-2461.
- [25] 高绍森, 朱延姝, 冯辉. 连续遮光对番茄苗期生长发育和叶绿素荧光指标影响的研究. 辽宁农业科学, 2005, (3): 31-32.
- [26] 郑启伟, 王效科, 冯兆宗, 宋文质, 冯宗炜. 臭氧对原位条件下冬小麦叶片光合色素、脂质过氧化的影响. 西北植物学报, 2005, 25(11): 2240-2244.

#### 参考文献:

- [1] 赵东, 罗勇, 高歌, 祝昌汉, 申彦波. 1961年至2007年中国日照的演变及其关键气候特征. 资料科学, 2010, 32(4): 701-711.
- [4] 尹青, 张华, 何金海. 近48年华东地区地面太阳总辐射变化特征和影响因子分析. 大气与环境光学学报, 2011, 6(1): 37-46.
- [9] 周秀骥. 长江三角洲低层大气与生态系统相互作用研究. 北京: 气象出版社, 2004.



# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.10 May, 2014 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

- Landscape sustainability and landscape sustainability science ..... ZHAO Wenwu, FANG Xuening (2453)
- A diagnostic framework of payments for ecosystem services and associated case studies .....  
..... ZHU Wenbo, WANG Yang, LI Shuangcheng (2460)
- Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants .....  
..... LIU Chunying, CHEN Chunli, GONG Xiaofeng, et al (2470)
- Ecological effects of predator chemical cues in aquatic ecosystem ..... QIN Guangqiu, LU Haoliang, TANG Zhenzhu, et al (2481)
- Secondary substances and their ecological effects on seed dispersal in vertebrate-dispersed fleshy fruit plants .....  
..... PAN Yang, LUO Fang, LU Changhu (2490)

### Autecology & Fundamentals

- Responses of CH<sub>4</sub> uptake rates to simulated N deposition in a nature forest in mid-subtropical China .....  
..... CHEN Chaoqi, YANG Zhijie, LIU Xiaofei, et al (2498)
- Ecological characteristics of *Phragmites australis* and their relationship to water-salt indicators in dry habitats of the southern  
marginal zones of the Tarim Basin, China ..... GONG Lu, ZHU Meiling, TASHPOLAT · Tiyp, et al (2509)
- Threshold effect of soil moisture on photosynthetic and physiological parameters in *Rosa xanthina* L. and its photosynthetic  
productivity classification ..... ZHANG Shuyong, XIANG Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (2519)
- Contrasting responses of soil respiration to litter manipulation in subtropical *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata*  
plantations ..... YU Zaipeng, WAN Xiaohua, HU Zhenhong, et al (2529)
- Potassium application for increased jasmonic acid content and defense enzyme activities of wheat leaves infested by aphids .....  
..... WANG Yi, ZHANG Yueling, SU Janwei, et al (2539)
- Combined effects of elevated O<sub>3</sub> concentration and reduced solar irradiance on photosynthetic activity and energy dissipation  
of winter wheat ..... SUN Jian, ZHENG Youfei, et al (2548)
- Colonization dynamics of *Bacillus cereus* B3-7 on wheat roots and control efficiency against sharp eyespot of wheat .....  
..... HUANG Qiubin, ZHANG Ying, LIU Fengying, et al (2559)
- Quantitative study of water consumption characteristics of winter wheat under deficit irrigation .....  
..... ZHANG Xingjuan, XUE Xuzhang, GUO Wenzhong, et al (2567)
- Assessment on the ecological fitness of anti-fungal transgenic rice ..... LI Wei, GUO Jianfu, YUAN Hongxu, et al (2581)
- A proteomic analysis of *Arachis hypogaea* leaf in responses to enhanced ultraviolet-B radiation .....  
..... DU Zhaokui, LI Junmin, ZHONG Zhangcheng, et al (2589)
- Composition of fatty acids from suspended particulate matter in southern South China Sea .....  
..... LIU Huaxue, KE Changliang, LI Chunhou, et al (2599)
- The influence of age, flock size, habitat, and weather on the time budget and the daily rhythm of wintering Siberian Cranes  
in Poyang Lake ..... YUAN Fangkai, LI Yankuo, LI Fengshan, et al (2608)
- The energy budget and water metabolism heat regulation of tree sparrows *Passer montanus* of toba compensatory regeneration .....  
..... YANG Zhihong, WU Qingming, YANG Miao, et al (2617)
- The effect of low-dose of pesticide on predation of spider and its preliminary mechanisms ..... LI Rui, LI Na, LIU Jia, et al (2629)
- Response of the alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Coleoptera: Chrysomelidae) to overwintering protection and  
its controlling effect on alligator weed *Alternanthera philoxeroides* (Amaranthaceae: Alternanthera) .....  
..... LIU Yufang, WANG Xiuxiu, LI Fei, et al (2638)

### Population, Community and Ecosystem

- The effect of climate change on the population fluctuation of the Siberian crane in Poyang Lake ..... LI Yankuo, QIAN Fawen, SHAN Jihong, et al (2645)
- Characteristics of soil phosphorus fractions in wetlands with various restoration age in caizi lake, Anhui Province ..... LIU Wenjing, ZHANG Pingjiu, DONG Guozheng, et al (2654)
- Multivariate analysis of the relations between phytoplankton assemblages and environmental factors in Chagan Lake Wetland ..... LI Ranran, ZHANG Guangxin, ZHANG Lei (2663)
- Diversity of methanogen communities in tidal freshwater and brackish marsh soil in the Min River estuary ..... ZENG Zhihua, YANG Minhe, SHE Chenxing, et al (2674)
- The influence of environment and phylogenic background on variation in leaf and fine root traits in the Yanhe River catchment, Shaanxi, China ..... ZHENG Ying, WEN Zhongming, SONG Guang, et al (2682)
- Changes of soil properties in re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in hengyang of Hunan Province, South-central China ..... YANG Ning, ZOU Dongsheng, YANG Manyuan, et al (2693)
- Vulnerability assessment on the mangrove ecosystems in qinzhou bay under sea level rise ..... LI Shasha, MENG Xianwei, GE Zhenming, et al (2702)
- Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in southern China ..... DU Hu, ZENG Fuping, WANG Kelin, et al (2712)
- Fungal diversity in *Cunninghamia lanceolata* plantation soil ..... HE Yuanhao, ZHOU Guoying, WANG Shenjie, et al (2725)
- Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in Horqin Sandy Land ..... ZHANG Lamei, LIU Xinping, ZHAO Xueyong, et al (2737)
- Characteristics of carbon storage and sequestration of *Robinia pseudoacacia* forest land converted by farmland in the Hilly Loess Plateau Region ..... SHEN Jiapeng, ZHANG Wenhui (2746)

### Landscape, Regional and Global Ecology

- Forest microclimate change along with the succession and response to climate change in south subtropical region ..... LIU Xiaodong, ZHOU Guoyi, CHEN Xiuzhi, et al (2755)
- Drought variations of winter wheat in different growth stages and effects of climate trend in Huang-Huai-Hai Plain, China ..... XU Jianwen, JU Hui, LIU Qin, et al (2765)

### Resource and Industrial Ecology

- A method of environment assessment of mineral resources planning for shanxi provinces base on GIS ..... LIU Wei, DU Peijun, LI Yongfeng (2775)
- A new approach to assess the water footprint of hydropower: a case study of the Miyun reservoir in China ..... ZHAO Dandan, LIU Junguo, ZHAO Xu (2787)

# 《生态学报》2014 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,280 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 祖元刚

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 34 卷 第 10 期 (2014 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 10 (May, 2014)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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		



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