

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 19 期 Vol.32 No.19 **2012**

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 32 卷 第 19 期

2012 年 10 月 (半月刊)

目 次

中国野生东北虎数量监测方法有效性评估	张常智, 张明海, 姜广顺 (5943)
城市居民食物氮消费变化及其环境负荷——以厦门市为例	于 洋, 崔胜辉, 赵胜男, 等 (5953)
珠江口水域夏季小型底栖生物群落结构	袁俏君, 苗素英, 李恒翔, 等 (5962)
2010 年夏季雷州半岛海岸带浮游植物群落结构特征及其与主要环境因子的关系	龚玉艳, 张才学, 孙省利, 等 (5972)
阿根廷滑柔鱼两个群体间耳石和角质颞的形态差异	方 舟, 陈新军, 陆化杰, 等 (5986)
黄河三角洲滨海草甸与土壤因子的关系	谭向峰, 杜 宁, 葛秀丽, 等 (5998)
盘锦湿地净初级生产力时空分布特征	王莉雯, 卫亚星 (6006)
菜豆根瘤菌对土壤钾的活化作用	张 亮, 黄建国, 韩玉竹, 等 (6016)
花生植株和土壤水浸液自毒作用研究及土壤中自毒物质检测	黄玉茜, 韩立思, 杨劲峰, 等 (6023)
遮荫对金莲花光合特性和叶片解剖特征的影响	吕晋慧, 王 玄, 冯雁梦, 等 (6033)
火干扰对小兴安岭草丛、灌丛沼泽温室气体短期排放的影响	顾 韩, 牟长城, 张博文, 等 (6044)
古尔班通古特沙漠南部植物多样性及群落分类	张 荣, 刘 彤 (6056)
黄土高原樟子松和落叶松与其他树种枯落叶混合分解对土壤的影响	李 茜, 刘增文, 米彩红 (6067)
长期集约种植对雷竹林土壤氨氧化古菌群落的影响	秦 华, 刘卜榕, 徐秋芳, 等 (6076)
H ₂ O ₂ 参与 AM 真菌与烟草共生过程	刘洪庆, 车永梅, 赵方贵, 等 (6085)
北京山区防护林优势树种分布与环境的的关系	邵方丽, 余新晓, 郑江坤, 等 (6092)
旱直播条件下强弱化感潜力水稻根际微生物的群落结构	熊 君, 林辉锋, 李振方, 等 (6100)
不同森林类型根系分布与土壤性质的关系	黄 林, 王 峰, 周立江, 等 (6110)
臭氧胁迫下硅对大豆抗氧化系统、生物量及产量的影响	战丽杰, 郭立月, 宁堂原, 等 (6120)
垃圾填埋场渗滤液灌溉对土壤理化特征和草本花卉生长的影响	王树芹, 赖 娟, 赵秀兰 (6128)
稻麦轮作系统冬小麦农田耕作措施对氧化亚氮排放的影响	郑建初, 张岳芳, 陈留根, 等 (6138)
不同施氮措施对旱作玉米地土壤酶活性及 CO ₂ 排放量的影响	张俊丽, 高明博, 温晚霞, 等 (6147)
北方农牧交错区农业生态系统生产力对气候波动的响应——以准格尔旗为例	孙特生, 李 波, 张新时 (6155)
辽宁省能源消费和碳排放与经济增长的关系	康文星, 姚利辉, 何介南, 等 (6168)
基于 FARSITE 模型的丰林自然保护区潜在林火行为空间分布特征	吴志伟, 贺红士, 梁 宇, 等 (6176)
不同后作生境对玉米地天敌的冬季保育作用	田耀加, 梁广文, 曾 玲, 等 (6187)
云南紫胶虫种群数量对地表蚂蚁多样性的影响	卢志兴, 陈又清, 李 巧, 等 (6195)
阿波罗绢蝶种群数量和垂直分布变化及其对气候变暖的响应	于 非, 王 吟, 王绍坤, 等 (6203)
专论与综述	
海水养殖生态系统健康综合评价: 方法与模式	蒲新明, 傅明珠, 王宗灵, 等 (6210)
海草场生态系统及其修复研究进展	潘金华, 江 鑫, 赛 珊, 等 (6223)
水华蓝藻对鱼类的营养毒理学效应	董桂芳, 解绶启, 朱晓鸣, 等 (6233)
环境胁迫对海草非结构性碳水化合物储存和转移的影响	江志坚, 黄小平, 张景平 (6242)
生态免疫学研究进展	徐德立, 王德华 (6251)
研究简报	
喀斯特峰丛洼地不同森林表层土壤有机质的空间变异及成因	宋 敏, 彭晚霞, 邹冬生, 等 (6259)
准噶尔盆地东南缘梭梭种子雨特征	吕朝燕, 张希明, 刘国军, 等 (6270)



封面图说: 岸边的小白鹭——鹭科白鹭属共有 13 种, 其中有大白鹭、中白鹭、白鹭 (小白鹭)、黄嘴白鹭等, 体羽皆是全白, 世通称白鹭。夏季的白鹭成鸟繁殖时枕部着生两条狭长而软的矛状羽, 状若双辫, 肩和胸着生蓑羽, 冬季时蓑羽常全部脱落, 白鹭虹膜黄色, 嘴黑色, 脚部黑色, 趾呈黄绿色。小白鹭常常栖息于稻田、沼泽、池塘水边, 以及海岸浅滩的红树林里。白天觅食, 好食小鱼、蛙、虾及昆虫等。繁殖期 3—7 月。繁殖时成群, 常和其他鹭类在一起, 雌雄均参加营巢, 次年常到旧巢处重新修葺使用。

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

DOI: 10.5846/stxb201108271251

战丽杰, 郭立月, 宁堂原, 曾祥伟, 李彩虹, 李勇, 吴光磊, 王霞, 蒋高明. 臭氧胁迫下硅对大豆抗氧化系统、生物量及产量的影响. 生态学报, 2012, 32(19): 6120-6127.

Zhan L J, Guo L Y, Ning T Y, Zeng X W, Li C H, Li Y, Wu G L, Wang X, Jiang G M. Effect of silicon application on antioxidant system, biomass and yield of soybean under ozone pollution. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6120-6127.

臭氧胁迫下硅对大豆抗氧化系统、 生物量及产量的影响

战丽杰¹, 郭立月^{1,2}, 宁堂原¹, 曾祥伟¹, 李彩虹², 李 勇²,
吴光磊¹, 王 霞³, 蒋高明^{2,1,*}

(1. 山东农业大学作物生物学国家重点实验室, 泰安 271018;

2. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093;

3. 山东省泰安市科学技术情报研究所, 泰安 271000)

摘要: 在全球变化情景下, 臭氧污染对作物产量将造成严重影响, 臭氧将成为未来农业重要胁迫因素。研究缓解臭氧胁迫技术措施有利于保障粮食安全, 其中硅元素添加可能是有效途径之一。利用开顶式同化箱(open top chambers, OTCs)装置, 设置两个 O₃ 浓度(大气 O₃ 浓度 <40 μg/kg 和高 O₃ 浓度约为 80 μg/kg)、两个硅浓度(0 和 100 μg/g), 研究不同 O₃ 浓度下硅对开花后大豆(*Glycine max*)株高、叶面积、叶绿素含量、抗氧化系统及产量的影响。结果表明: 在无臭氧胁迫下, 施硅可显著提高大豆根生物量、总生物量和单株籽粒重(14%、5%和20%)($P < 0.05$)。在 O₃ 胁迫下, 施硅能使大豆维持较高的叶面积, 显著提高大豆叶片叶绿素含量及 SOD、POD、CAT 活性, 显著降低 MDA 含量, 提高大豆根生物量、地上部生物量、总生物量、根冠比和单株籽粒重(29%、18%、19%、9%和17%)($P < 0.05$)。研究可为缓解 O₃ 对大豆危害提供合理可行的栽培管理措施与理论依据。

关键词: 硅; 臭氧; 大豆; 抗氧化系统; 产量

Effect of silicon application on antioxidant system, biomass and yield of soybean under ozone pollution

ZHAN Lijie¹, GUO Liyue^{1,2}, NING Tangyuan¹, ZENG Xiangwei¹, LI Caihong², LI Yong², WU Guanglei¹, WANG Xia³, JIANG Gaoming^{2,1,*}

1 State Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China

2 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

3 Institute for Science and Technology Information of Tai'an, Tai'an 271000, Shandong, China

Abstract: Ozone is believed to be an important environmental pollutant causing severe losses of crops production under global change scenarios. Technical countermeasures to easing ozone stress would help ensure food security, among which adding silicon might be one of the practical approaches. Open-top chambers (OTCs) were applied in determining the effects of ozone (normal air, <40 μg/kg O₃ or elevated O₃, (80±5) μg/kg, 7 h/d) and silicon (Si-free, 0 mg/kg or +Si, 100 μg/g) on plant height, leaf area, chlorophyll content, antioxidant system and yield of soybean after anthesis. Our results indicated that, under normal air condition, compared with Si-free treatments, +Si significantly increased the amount of

基金项目: 山东省人民政府泰山学者资助项目(00523902); 黄淮海平原区秸秆资源循环利用技术集成与示范; 种养一体化的农牧循环模式技术集成与示范, 国家科技支撑计划(2012BAD14B07-8)

收稿日期: 2011-08-27; 修订日期: 2011-11-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianggm@126.com

biomass of soybean roots, total biomass and grain weight per plant (14%, 5% and 20%) ($P < 0.05$). While under the elevated O_3 environment, against Si-free treatments, silicon application could maintain a high leaf area of soybean. Use of silicon also significantly increased chlorophyll content and SOD, POD, CAT activity, while decreased MDA content. The biomass of soybean roots, shoot, root-shoot ratio and yield of per plant were further improved by 29%, 18%, 19%, 9% and 17%, respectively ($P < 0.05$). Our findings might provide theoretical support for the reasonable soybean cultivation and management in alleviating the damage of ozone pollution.

Key Words: silicon; ozone; soybean; antioxidant enzyme; yield

全球变化对陆地生态系统的影响是多尺度、全方位、异常复杂的。臭氧(O_3)既是温室气体之一,又是最主要的光化学污染物^[1]。近几十年来,由于化石燃料和含 N 化肥的大量使用,大气中 NO_x 、VOCs 等合成 O_3 前体物含量剧增,导致近地面 O_3 浓度迅速增加^[2]。近地面过高 O_3 浓度不仅直接威胁人类和动物健康,对植物生长发育亦会产生深刻的影响^[3]。大量证据表明,全球大气 O_3 浓度升高已对栽培和野生植物产生肉眼可见的伤害,降低植物光合作用、抑制生长,造成生物量和产量下降^[4-6]。有报道指出, O_3 对中国农业生态系统将产生的影响可能会危及到世界粮食的供需平衡^[7],其中长江三角洲地区因 O_3 污染造成小麦产量损失约 66.93 万 t,水稻为 59.86 万 t,直接经济损失分别达 5.39 亿元和 9.36 亿元人民币^[8]。开展 O_3 污染对作物产量影响及其对策研究对保障粮食安全具有重要意义。

O_3 主要通过气孔进入植物体内,首先会对叶片产生伤害。 O_3 会对叶片造成可见伤害^[9],显著降低株高、叶面积^[10-11];增加叶片 MDA、活性氧含量,提高膜透性,加剧膜脂过氧化作用^[12-13],减少叶绿素含量;改变叶绿体结构,降低光合酶的数量和活性,降低光合速率^[14],改变光合产物的分配;抑制植物生长、降低生物量,导致作物减产^[15]。因此,减少作物对 O_3 吸收,或通过一定技术措施缓解或抵消其危害,是植物生理生态学家长期努力的研究目标。已有研究表明,喷施植物生长调节剂如乙烯利^[16]、抗氧化物质如外源抗坏血酸^[17],抗氧化酶活性的外源物质如乙叉二脲(Ethylenediurea, EDU)等^[18,19]都能够显著减轻 O_3 对植物的伤害。以往研究预示出, O_3 对植物的影响可以通过栽培管理进行调控。

硅对植物的生长具有促进作用,可提高植物抗逆性。有人发现,硅能促进植物生长发育^[20-22],提高作物抗病虫性,增强植株的机械强度(改善株型、叶片挺立、抗倒伏),提高抗旱性、抗寒性、耐盐性和耐重金属毒性等^[23-26]。然而,过去的研究多集中于 O_3 对农作物和植物生长及其机理的研究,而通过施硅这一栽培措施预防或减缓 O_3 对作物影响的研究较少,施硅能否缓解 O_3 对植物的伤害? 对此问题由于缺乏具体实验研究还无法回答。由于硅可以提高作物的抗逆性(抗病虫性、抗旱性、耐盐性等),因此,假设施硅可在一定程度上缓解 O_3 污染对作物危害,并减少产量损失。

大豆(*Glycine max*)是我国重要的油料作物,对 O_3 污染较敏感,极易在 O_3 胁迫下引起减产。本文利用盆栽试验,研究 O_3 胁迫下施硅对大豆株高、叶面积、叶绿素含量、抗氧化系统、生物量及产量的影响,并探讨其生理机制,以期减轻 O_3 污染对大豆的危害提出合理可行的栽培管理措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验在山东农业大学生态系统定位研究站进行,该站位于山东省平邑县蒋家庄($35^{\circ}27'N$, $117^{\circ}50'E$)。多年平均气温 $13.2^{\circ}C$,平均无霜期 212 d,平均年降水量 770.2 mm,耕地为中低产田,面临的臭氧污染较轻。试验采用聚氯乙烯盆(直径 25 cm,深 28 cm),每盆装土 7 kg,试验土壤含有机质 16.30 g/kg,全氮 2.00 g/kg,全磷 0.60 g/kg,全钾 6.30 g/kg,速效氮 132.3 mg/kg,速效磷 11.1 mg/kg,含水量 13.6%,pH6.73。试验用 OTC 外观为高 2.2 m、边长 1 m 的八面体结构,由铝合金和玻璃构建而成,主要由通风、过滤和输气系统组成。 O_3 由臭氧发生器(CF-KG1,北京)产生,用 O_3 监测器(APOA-360, Horiba, Japan)对 OTC 中的 O_3 浓度进行实时监测。

试验为二因素随机区组设计,设3次重复。A因素为两个 O_3 浓度:大气(O_3 浓度 $<40\ \mu\text{g}/\text{kg}$)和高浓度 O_3 (O_3 浓度约为 $80\ \mu\text{g}/\text{kg}$)。B因素为两个硅浓度:0和 $100\ \mu\text{g}/\text{g}$ (硅/风干土),硅以硅酸钠形式提供,于播种时施入到土壤中。共4个处理组合,即CK(不施硅,大气)、+Si($100\ \mu\text{g}/\text{g}$ 硅,大气)、+ O_3 (不施硅, $80\ \mu\text{g}/\text{kg}\ O_3$)、+Si+ O_3 ($100\ \mu\text{g}/\text{g}$ 硅, $80\ \mu\text{g}/\text{kg}\ O_3$)。

1.2 植物材料

以夏大豆品种荷豆12为试验材料,该品种为有限结荚习性,种子由山东省菏泽市农业科学院提供。2010年6月24日播种,每盆播种6粒,第3片复叶完全展开后定苗,每盆保留3株。为适应OTC内光照及温度环境,在开花前一周将盆栽大豆移到OTC中,每个OTC放置18盆。试验期间保证水分充足,排除水、肥、病虫害、杂草等非试验因素影响。8月3日,大豆进入初花期,开始进行 O_3 熏蒸。每天熏蒸时间为9:00—16:00。于9月22日停止熏蒸。

1.3 植物生长性状测定

于 O_3 熏蒸后第0、8、16、24、32、40和48天分别取样,每个处理随机取3株大豆,测量株高和叶面积,叶面积采用剪纸法。将植株分为根、茎、叶、荚4部分,于 $105\ ^\circ\text{C}$ 杀青30 min, $75\ ^\circ\text{C}$ 烘干至恒量。4部分干物质质量之和为单株生物量;地上部生物量包括茎、叶、荚3部分。待大豆成熟后,于每个OTC中各收获24株大豆,测定单株结荚数和籽粒数,待籽粒自然风干后,测定单株籽粒干物质质量。将相同处理的单株籽粒混合,测定百粒重。

1.4 生理指标测定

分别于熏蒸后第0、8、16、24、32和40天取样。在各个OTC中随机选取相同叶位的功能叶,放入液氮中保存以备室内生化指标的测定,每个处理3个重复,各测定3次,取平均值作为该重复的测定值。叶绿素含量测定采用Arnon法^[27];丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸法^[28];过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法,以1 min内 A_{470} 降低0.1为一个酶活单位,超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑还原法^[29];过氧化氢酶(CAT)活性测定采用紫外分光光度计法^[30],以1 min内 A_{240} 降低0.1为一个酶活单位。

1.5 数据处理

采用Microsoft Excel 2003软件处理数据,文中数据均为各处理的平均数 $\pm$ 标准偏差。采用DPS v7.05软件进行显著性分析($\alpha=0.05$)和极显著分析($\alpha=0.01$),SigmaPlot 10.0软件作图。

2 结果

2.1 株高

由图1可以看出,熏蒸 O_3 大豆株高明显低于未熏蒸 O_3 大豆株高,在熏蒸处理16 d,+ O_3 处理的株高与CK、+Si、+Si+ O_3 处理差异显著($P<0.05$),与CK比株高降低了7%,其它时期,CK、+Si、+ O_3 、+Si+ O_3 处理间均无显著差异($P>0.05$)。说明施硅在一定程度上可缓解臭氧胁迫对大豆株高的影响。

2.2 叶面积和叶绿素含量

由图2可以看出,在无臭氧胁迫下,施硅处理(+Si)与不施硅处理(CK)无显著差异($P>0.05$);臭氧胁迫下,施硅处理(+Si+ O_3)与不施硅处理(+ O_3)在24 d叶面积增加了17%($P<0.05$);不施硅条件下,16、24、32 d,通 O_3 处理(+ O_3)与不通 O_3 处理(CK)差异显著($P<0.05$),叶面积分别降低了15%、17%、15%;施硅条件下,通 O_3 处理(+Si+ O_3)与不通 O_3 处理(+Si)无显著差异($P>0.05$)。

O_3 熏蒸后,大豆叶片叶绿素含量降低。CK、+Si、+Si+ O_3 处理的叶绿素含量变化趋势基本一致,均呈现先升后降的趋势,+ O_3 处理的叶绿素含量呈持续下降趋势(图2B)。无臭氧胁迫下,在处理32 d,施硅处理的叶绿素含量显著($P<0.05$)高于不施硅处理(3%);臭氧胁迫下,施硅

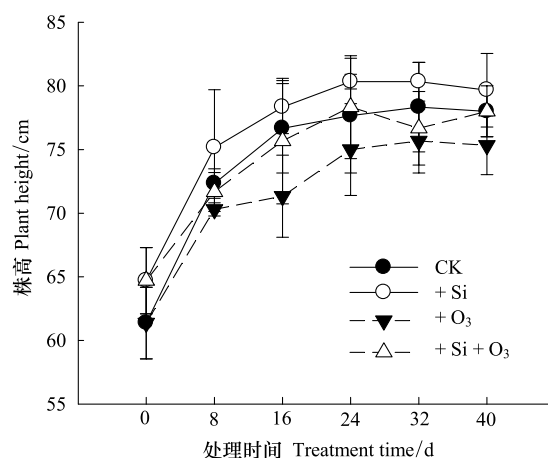


图1 不同处理对大豆株高的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on plant height of soybean
处理时间0、8、16、24、32、40指大豆开花后第0、8、16、24、32、40天,即臭氧熏蒸第0、8、16、24、32、40天

处理的叶绿素含量在 8、16、24、32、40 d 与不施硅处理差异显著 ($P < 0.05$), 分别提高了 4%、8%、9%、9%、8%, 16 d 以后差异极显著 ($P < 0.01$); 在不施硅条件下, 在 8、16、24、32、40 d, 通 O_3 处理与不通 O_3 处理差异极显著 ($P < 0.01$); 在施硅条件下, 通 O_3 处理与不通 O_3 处理在 8、16、24 d 差异显著 ($P < 0.05$), 在 32、40 d 差异极显著 ($P < 0.01$)。

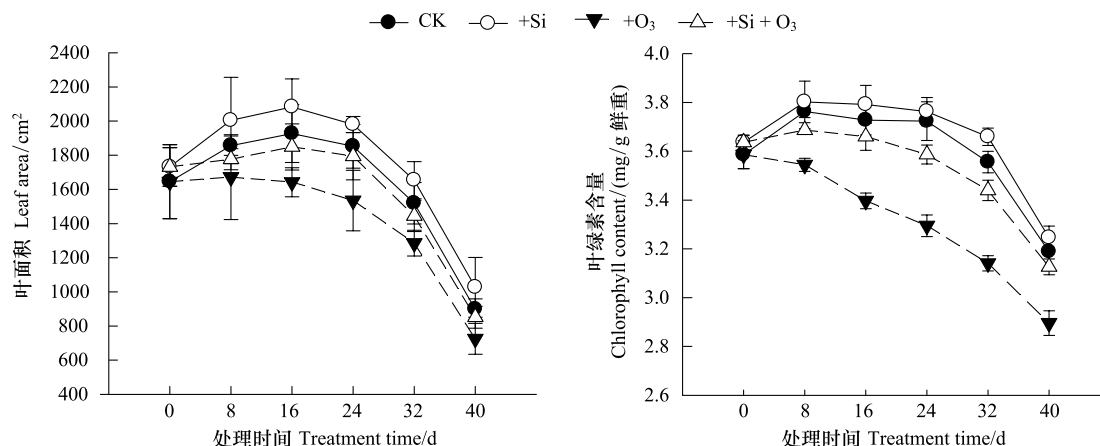


图2 不同处理对大豆开花后叶面积和叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on leaf area and chlorophyll content of soybean after anthesis

2.3 叶片抗氧化系统及膜脂过氧化

由图3可以看出, O_3 熏蒸后大豆叶片的 SOD 活性呈先升后降的趋势, 在处理 24 d 时活性最高: 表现为 $+Si + O_3 > +O_3 > +Si > CK$, 各处理间差异显著 ($P < 0.05$), $+Si + O_3$ 处理和 $+O_3$ 处理差异极显著 ($P < 0.01$); 处理 16、32、40 d 均表现为 $+Si + O_3 > +O_3 > +Si$, CK , $+Si$ 处理和 CK 处理无显著差异 ($P > 0.05$)。

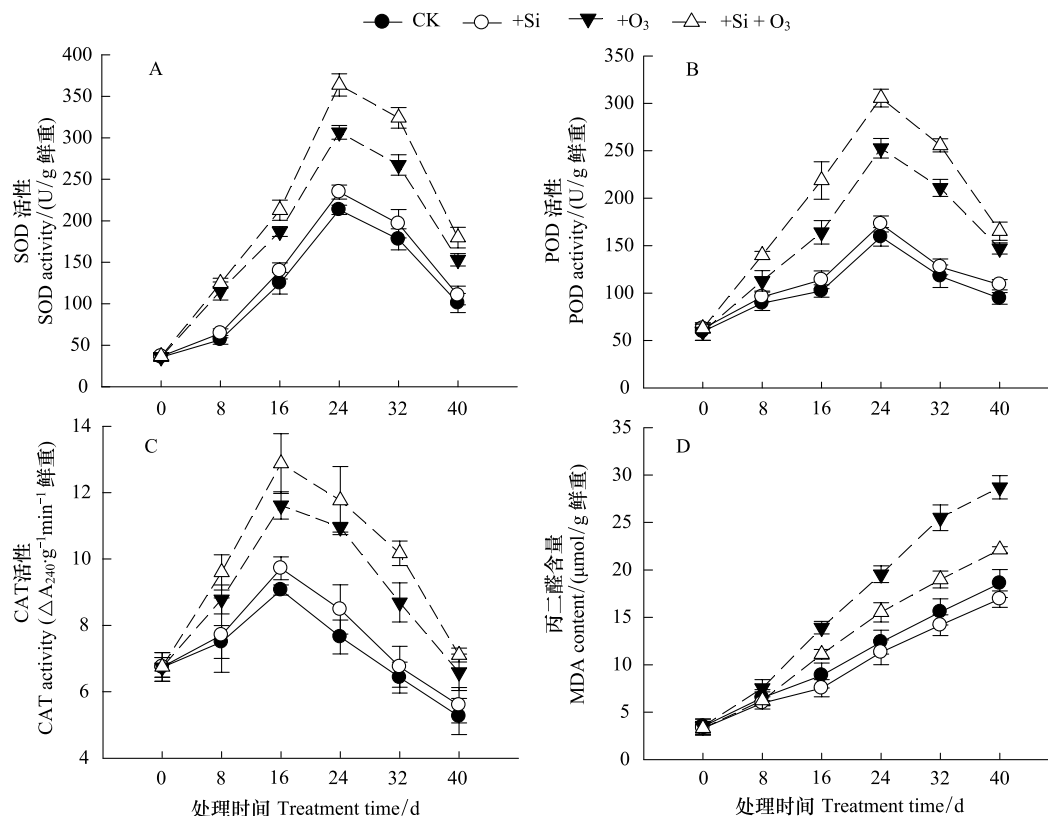


图3 不同处理对大豆开花后抗氧化系统及脂质过氧化的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on antioxidant system and lipid peroxidation of soybean leaves after anthesis

POD 活性变化与 SOD 活性变化趋势一致,呈单峰曲线变化,在处理第 24 天活性最大(图 3)。处理 8—32 d 表现为 $+Si+O_3>+O_3>+Si, CK$, $+Si+O_3$ 处理和 $+O_3$ 处理差异极显著($P<0.01$), $+Si$ 处理和 CK 处理无显著差异($P>0.05$);处理第 40 天表现为 $+Si+O_3>+O_3>+Si>CK$,各处理间差异显著($P<0.05$)。

整个处理期间,CAT 活性变化呈先升后降趋势,处理 16 d 达到峰值(图 3)。整个处理期间, $+Si$ 处理的 CAT 活性高于 CK 处理,但无显著差异($P>0.05$); $+O_3$ 处理的 CAT 活性高于 CK 处理,在处理 16—32 d 差异极显著($P<0.01$),在处理 40 d 差异显著($P<0.05$); $+Si+O_3$ 处理的 CAT 活性高于 $+O_3$ 处理,在处理 16 d 差异极显著($P<0.01$),在处理 32 d 差异显著($P<0.05$)。说明施硅可显著提高 O_3 胁迫下大豆叶片中 CAT 活性,提高其抗 O_3 胁迫的能力。

在整个处理期间,MDA 含量呈上升的趋势。在处理 16—40 d 表现为 $+O_3>+Si+O_3>CK, +Si$, CK 处理与 $+Si$ 处理无显著差异($P>0.05$), $+O_3$ 处理与 $+Si+O_3$ 处理在 16 d 差异显著($P<0.05$),在 24—40 d 差异极显著(图 3, $P<0.01$)。说明在 O_3 胁迫下,大豆叶片中 MDA 含量增加,加剧了膜脂过氧化程度,施硅可显著降低 O_3 胁迫下大豆叶片中 MDA 含量,减缓膜脂过氧化程度。

2.4 干物质积累量及分配

生物量是作物同化产物的积累,是形成产量的物质基础,其数量的大小及分配模式必然影响经济产量的高低。由图 4 可知,根生物量呈先升后降的趋势,在处理 32 d 达到峰值。处理 16—48 d 表现为 $+Si>CK>+Si+O_3>+O_3$,各处理间差异显著($P<0.05$),说明施硅可显著提高无臭氧胁迫下和臭氧胁迫下大豆根生物量。

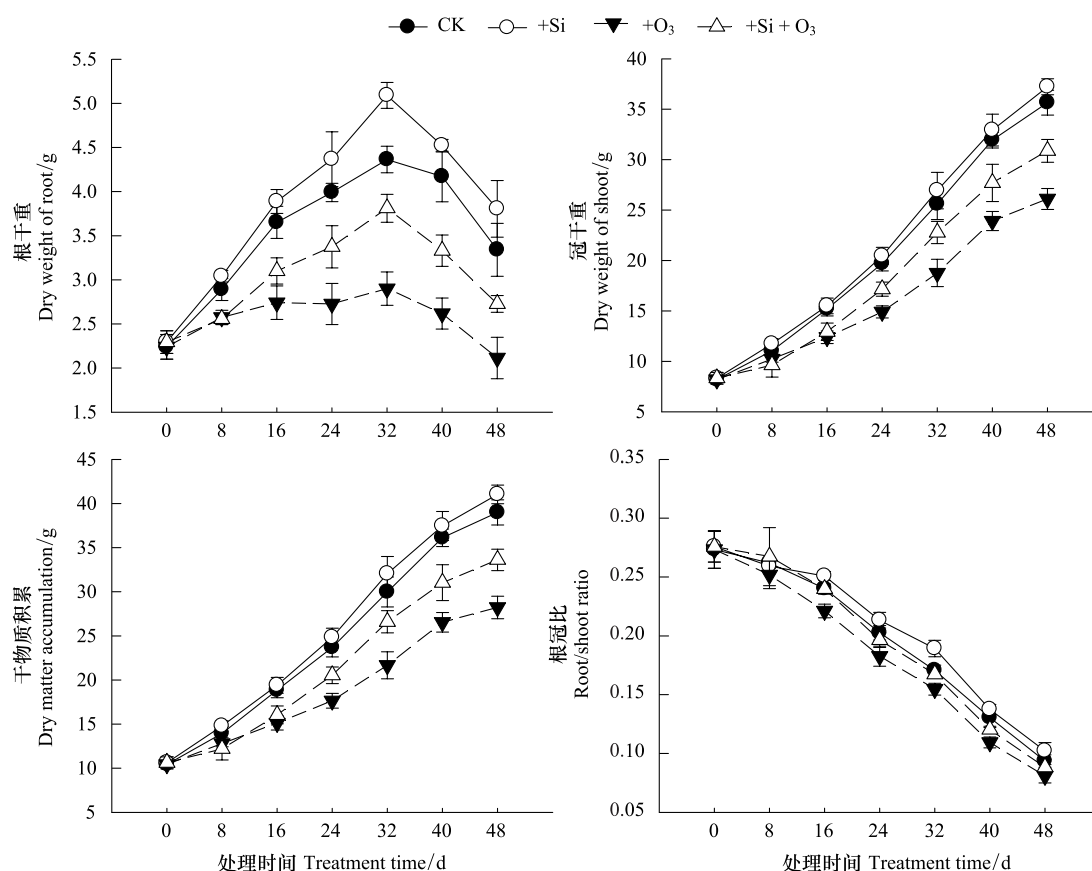


图 4 不同处理对大豆开花后根干重、冠干重、单株干物质及根冠比积累的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on dry weight of root, dry weight of shoot, dry matter accumulation per plant and root to shoot ratio of soybean after anthesis

整个处理期间,地上部生物量呈持续上升的趋势(图 4)。处理 16、40 d 表现为 $CK, +Si>+Si+O_3>+O_3$, CK 处理和 $+Si$ 处理无显著差异($P>0.05$);处理 24、32、48 d 表现为 $+Si>CK>+Si+O_3>+O_3$,各处理间差异显著($P<0.05$)。说

明施硅可显著提高臭氧胁迫下大豆地上部生物量。

总生物量的变化趋势与地上部生物量的变化趋势一致,呈持续上升的趋势(图4)。处理16 d 表现为 CK、+Si>+Si+O₃>+O₃,CK 处理和+Si 处理无显著差异($P>0.05$);处理24—48 d 表现为+Si>CK>+Si+O₃>+O₃,各处理间差异显著($P<0.05$)。说明施硅可显著提高无臭氧胁迫下和臭氧胁迫下大豆总生物量。

整个处理期间,根冠比的变化趋势与地上部生物量、总生物量的变化趋势相反,呈持续下降的趋势(图4)。处理16—32 d 表现为+Si>CK、+Si+O₃>+O₃,CK 处理与+Si+O₃ 处理无显著差异($P>0.05$);处理40 d,CK 和+Si、+Si+O₃ 和+O₃ 处理间无显著差异($P>0.05$),CK 和+O₃、+Si 和+Si+O₃ 处理间差异极显著($P<0.01$);处理48 d,+Si+O₃ 处理与+O₃ 处理无显著差异($P>0.05$),CK 处理与+Si 处理差异显著($P<0.05$),CK 和+O₃、+Si 和+Si+O₃ 处理间差异极显著($P<0.01$)。说明与无臭氧胁迫下相比,臭氧胁迫下可显著降低根冠比,施硅可以显著提高臭氧胁迫下根冠比。

2.5 单株产量及产量构成要素

由表1可知,CK 处理的单株结荚数和单株籽粒数与+Si 处理无显著差异($P>0.05$),与+O₃ 处理差异极显著($P<0.01$);+Si+O₃ 处理的单株结荚数和单株籽粒数与+O₃ 处理无显著差异($P>0.05$),与+Si 处理差异显著($P<0.05$),+Si+O₃ 处理的单株籽粒数与+Si 处理差异极显著($P<0.01$),说明臭氧胁迫可显著降低大豆的单株结荚数和单株籽粒数。各处理的单株籽粒重表现为+Si>CK、+Si+O₃>+O₃,CK 处理与+Si+O₃ 处理无显著差异($P>0.05$),说明施硅可显著提高无臭氧胁迫下和臭氧胁迫条件下的单株籽粒重。

表1 不同处理对大豆产量构成因素的影响

Table 1 Effects of different treatments on components of soybean yield

处理 Treatment	单株结荚数 Pod number per plant	单株籽粒数 Seeds per plant	百粒重 100 seeds weight/g	单株籽粒重 Seeds yield per plant/g
CK	26.3±1.20abA	53.0±2.52abAB	19.7±0.11aA	10.4±0.55bAB
+Si	28.0±0.58aA	59.0±1.53aA	19.9±0.14aA	11.7±0.34aA
+O ₃	21.3±0.67cB	42.7±1.45cC	18.8±0.51aA	8.0±0.13cC
+Si+O ₃	23.3±1.20bcAB	48.3±0.88bcBC	19.5±0.21aA	9.4±0.11bBC

同列数据后标不同小写字母者表示差异显著($P<0.05$),标不同大写字母者表示差异极显著($P<0.01$)

3 讨论

臭氧进入植物叶片并积累到一定程度时,可破坏细胞膜和叶绿体结构^[31,32],造成可见伤害症状,添加具保护性作用的元素如硅在一定程度上可缓解臭氧胁迫。本试验结果表明,随处理时间延长,不施硅臭氧胁迫下大豆叶面积和叶绿素含量都显著下降,这与前人研究结果一致^[32]。然而,施硅明显缓解了 O₃ 胁迫下大豆叶面积和叶绿素含量的下降程度,说明硅添加对大豆 O₃ 胁迫有一定的缓解效应。这可能是由于施硅能提高叶绿体膜结构的完整度,并减轻基粒超微结构的损伤。

臭氧通过气孔扩散进入植物叶片细胞间空隙,溶解于与细胞壁结合的水中,并经反应形成一系列活性氧自由基(AOS)。AOS 攻击细胞膜,以其极强的氧化性对细胞膜质进行过氧化,导致膜系统损伤和细胞伤害^[33]。SOD、CAT、POD 是植物抗氧化酶系统中的3种重要的保护酶,有利于维持作物体内活性氧产生和淬灭动态平衡,从而阻抑膜脂过氧化进程^[34]。本研究发现,O₃ 胁迫下大豆叶片抗氧化酶活性增强,从而有利于抵抗氧化胁迫。MDA 是脂膜过氧化产物,是衰老生理的重要指标,其含量高低说明了脂膜过氧化程度。在处理前期,抗氧化系统酶活性较高时,膜脂过氧化过程受到抑制,MDA 含量较低;随氧化胁迫时间延长,作物叶片衰老加剧,抗氧化酶不足以清除产生的活性氧,导致膜脂过氧化进程加快,MDA 含量急剧增加,说明叶片受到活性氧伤害加剧,膜系统受害加重。外源硅显著降低 MDA 含量,减轻大豆叶片膜脂过氧化程度,说明施硅处理维持 O₃ 胁迫下细胞膜的完整性,从而保证了植物体内各种代谢的正常进行,提高大豆抵御 O₃ 胁迫的能力。这可能是沉积在细胞脂外体的凝胶态硅或可溶性硅提高细胞膜的稳定性,提高膜透性,降低了 O₃ 胁迫诱导的膜质过氧化作用。施硅也明显提高了 O₃ 胁迫下大豆叶片 SOD、CAT、POD 酶活性,有利于活性氧清除,其

机理可能是硅启动了植株体内多元化的防御机制,激活一个与生化变化相连的级联反应^[35-37]。进入植物体的硅并非只是通过沉积在细胞壁上起支持和保护作用,还可能参与生物和非生物胁迫下植物体内的代谢和生理活动。

生物量是作物同化产物积累的量,是形成产量的物质基础,其大小及分配模式必然影响经济产量。前人研究表明, O_3 可能对韧皮部组织有直接作用,导致同化物向外运输的能力降低^[38], O_3 胁迫下,地上地下及总生物量和产量均下降显著,且根生物量的减小高于地上部分,致使根冠比降低。我们发现,添加硅有效缓解了 O_3 胁迫导致的地上部、地下部以及总生物量下降程度,改善了 O_3 胁迫下根冠比。这可能是硅通过维持叶绿体细胞内的离子平衡,增强保护酶活性,达到保护光合结构和稳定光合色素的作用,进而促进叶绿体的光合作用能力,有利于光合产物的积累。在 O_3 胁迫下,大豆单株结荚数、单株籽粒数和单株粒重都显著降低(表 3),这与其他作物(小麦、水稻)的研究结果相似^[39]。外源硅添加使 O_3 胁迫下大豆单株结荚数、单株籽粒数和单株粒重都有显著提高,这说明硅可减轻 O_3 胁迫对大豆造成的产量损失。

综上所述,在大豆开花后进行 O_3 熏蒸处理,大豆植株叶面积、叶绿素含量、抗氧化系统及产量都受到了较大影响;硅有效缓解了 O_3 对大豆造成的氧化胁迫,尤其减轻 O_3 胁迫对大豆造成的产量损失; O_3 对植物的危害可以通过栽培管理进行调控。在本试验基础上,如何采用合理栽培管理措施,提高植物对 O_3 的适应性和抗性,将 O_3 危害降到最低,这是今后研究的重点。

References:

- [1] Ashmore M R, Bell J N B. The role of ozone in global change. *Annals of Botany*, 1991, 67: 39-48.
- [2] Zheng X D, Chen C Y, Cui H, Qin Y, Chan L Y, Zheng Y G, Yusiang L. Characteristics of vertical ozone distribution in the lower troposphere in the Yangtze River Delta at Lin'an in the spring of 2001. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 2005, 48(9): 1519-1528.
- [3] McKee D J. *Tropospheric Ozone: Human Health and Agricultural Impacts*. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1994: 19-39.
- [4] Yang L X, Wang Y X, Zhao Z 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.
- [5] Liu F, Wang X K, Zhu Y G. Assessing current and future ozone-induced yield reductions for rice and winter wheat in Chongqing and the Yangtze River Delta of China. *Environmental Pollution*, 2009, 157(2): 707-709.
- [6] Rai R, Agrawal M, Agrawal S B. Assessment of yield losses in tropical wheat using open top chambers. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(40): 9543-9554.
- [7] Chameides W L, Li X S, Tang X Y, Zhou X J, Chao L, Kiang C S, John J St, Saylor R D, Liu S C, Lam K S, Wang T, Giorgi F. Is O_3 pollution affecting crop yield in China? *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(7): 867-870.
- [8] 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 Sciences*, 2003, 15(3): 360-362.
- [9] Guidi L, Cagno R D, Soldatini G F. Screening of bean cultivars for their response to ozone as evaluated by visible symptoms and leaf chlorophyll fluorescence. *Environmental Pollution*, 2000, 107(3): 349-355.
- [10] Wang C Y, Bai Y M, Wen M, Huang H. Effects of double CO_2 and O_3 on growth and yields in soybean. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2004, 25(6): 6-10.
- [11] Bai Y M, Wang C Y, Wen M, Guo J P. Influences of different ozone concentrations and fumigation days on spinach growth and yield. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(12): 1971-1975.
- [12] Zheng Q W, Wang X K, Feng Z Z, Ouyang Z Y, Xie J Q. Impact of different ozone exposure regimes on photosynthetic rate, biomass and yield of field-grown oilseed rape. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2006, 1(4): 323-329.
- [13] Jin M H, Feng Z W. Effects of ozone on membrane protective system of winter wheat leave. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3): 444-447.
- [14] Meyer U, Kollner B, Willenbrink J, Krause G H M. Effects of different ozone exposure regimes on photosynthesis, assimilates and thousand grain weight in spring wheat. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 78(1): 49-45.
- [15] Pleijel H, Eriksen A B, Danielsson H, Bondesson N, Sellden G. Differential ozone sensitivity in an old and a modern Swedish wheat cultivar-grain yield and quality, leaf chlorophyll and stomatal conductance. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 56(1): 63-71.
- [16] McKee I F, Long S P. Plant growth regulators control ozone damage to wheat yield. *New Phytologist*, 2001, 152(1): 41-51.
- [17] 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 O_3 stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1131-1137.
- [18] Hassan I A. Physiological and biochemical response of potato (*Solanum tuberosum* L. cv. Kara) to O_3 and antioxidant chemicals: possible roles of antioxidant enzymes. *Annals of Applied Biology*, 2006, 148(3): 197-206.

- [19] Tiwari S, Agrawal M, Manning W J. Assessing the impact of ambient ozone on growth and productivity of two cultivars of wheat in India using three rates of application of ethylenediurea (EDU). *Environmental Pollution*, 2005, 138(1): 153-160.
- [20] Gao X P, Zou C Q, Wang L J, Zhang F S. Silicon improves water use efficiency in maize plants. *Journal of Plant Nutrition*, 2004, 27(8): 1457-1470.
- [21] Ando H, Kakuda K, Fujii H, Suzuki K, Ajiki T. Growth and canopy structure of rice plants grown under field conditions as affected by Si application. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2002, 48(3): 429-432.
- [22] Hossain M T, Mori R, Soga K, Wakabayashi K, Kamisaka S, Fujii S, Yamamoto R, Hoson T. Growth promotion and an increase in cell wall extensibility by silicon in rice and some other Poaceae seedlings. *Journal of Plant Research*, 2002, 115(1117): 23-27.
- [23] Ma J F, Takahashi E. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Amsterdam: Elsevier Science, 2002, 73-106.
- [24] Liang Y C, Zhu J, Li Z J, Chu G X, Ding Y F, Zhang J, Sun W C. Role of silicon in enhancing resistance to freezing stress in two contrasting winter wheat cultivars. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 64(3): 286-294.
- [25] Ma J F, Yamaji N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*. 2006, 11(8): 392-397.
- [26] Alvarez J, Datnoff L E, Snyder G H. The economic potential of silicon for integrated management and sustainable rice production. *Crop Protection*, 2001, 20(1): 43-48.
- [27] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 1949, 24(1): 1-5.
- [28] Kramer G F, Norman H A, Krizek D T, Mirecki R M. Influence of UV-B radiation on poly amines, lipid peroxidation and membrane lipids in cucumber. *Phytochemistry*, 1991, 30(7): 2101-2108.
- [29] Giannopoulou C N, Ries S K. Superoxide dismutase I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, 1977, 59(2): 309-314.
- [30] Aebi H. Catalase in vitro. *Methods Enzymol*, 1984, 105: 121-126.
- [31] Zhao T H, Shi Y, Huang G H. Effect of doubled CO₂ and O₃ concentration and their interactions on ultrastructure of soybean chloroplast. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12): 2229-2232.
- [32] Li C H, Li Y, Wuyun T N, Wu G L, Jiang G M. Effects of high concentration ozone on soybean growth and grain yield. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(9): 2347-2352.
- [33] Wohlgemuth H, Mittelstrass K, Kschieschan S, Bender J, Weigel H J, Overmyer K, Kangasjarvi J, Sandermann H, Langebartels C. Activation of an oxidative burst is a general feature of sensitive plants exposed to the air pollutant ozone. *Plant, Cell and Environment*, 2002, 25: 717-726.
- [34] Jin M H, Feng Z W, Zhang F Z. Effects of ozone on membrane lipid peroxidation and antioxidant system of rice leaves. *Environmental Science*, 2000, 21(3): 1-5.
- [35] Belanger R R, Bowen P A, Ehret D L, Menzies J G. Soluble silicon: Its role in crop and disease management of green-house crops. *Plant Disease*, 1995, (79)4: 329-336.
- [36] Ma J F, Yamaji N. Functions and transport of silicon in plants. *Cellular and Molecular Life Science*, 2008, 65: 3049-3057.
- [37] Liang Y C, Sun W C, Zhu Y G, Christie P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. *Environmental Pollution*, 2007, 147: 422-428.
- [38] Grantz D A, Farrar J F. Acute exposure to ozone inhibits rapid carbon translocation from source leaves of Pima cotton. *Journal of Experimental Botany*. 1999, 50(336): 1253-1262.
- [39] Bai Y M, Guo J P, Wang C Y, W M. The reaction and sensitivity experiment of O₃ on rice and winter wheat. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(1): 13-16.

参考文献:

- [4] 杨连新,王云霞,赵秩鹏,朱建国, J. D. Sun, 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.
- [10] 王春乙,白月明,温民,黄辉. CO₂ 和 O₃ 浓度倍增及复合效应对大豆生长和产量的影响. *环境科学*, 2004, 25(6): 6-10.
- [11] 白月明,王春乙,温民,郭建平. 臭氧浓度和熏气时间对菠菜生长和产量的影响. *中国农业科学*, 2004, 37(12): 1971-1975.
- [12] 郑启伟,王效科,冯兆忠,冯宗炜,欧阳志云,谢居清. 不同臭氧熏气方式对油菜光合速率、生物量和产量的影响. *生态毒理学报*, 2006, 1(4): 323-329.
- [13] 金明红,冯宗炜. 臭氧对冬小麦叶片膜保护系统的影响. *生态学报*, 2000, 20(3): 444-447.
- [17] 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.
- [31] 赵天宏,史奕,黄国宏. CO₂ 和 O₃ 浓度倍增及其交互作用对大豆叶绿体超微结构的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2229-2232.
- [32] 李彩虹,李勇,乌云塔娜,吴光磊,蒋高明. 高浓度臭氧对大豆生长发育及产量的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(9): 2347-2352.
- [34] 金明红,冯宗炜,张福珠. 臭氧对水稻叶片膜脂过氧化和抗氧化系统的影响. *环境科学*, 2000, 21(3): 1-5.
- [39] 白月明,郭建平,王春乙,温民. 水稻与冬小麦对臭氧的反应及其敏感性试验研究. *中国生态农业学报*, 2002, 10(1): 13-16.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 19 October, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Assessment of monitoring methods for population abundance of Amur tiger in Northeast China	5943
..... ZHANG Changzhi, ZHANG Minghai, JIANG Guangshun (5943)	
Changes of residents nitrogen consumption and its environmental loading from food in Xiamen	5953
..... YU Yang, CUI Shenghui, ZHAO Shengnan, et al (5953)	
Analysis of the meiobenthic community in the Pearl River Estuary in summer	5962
..... YUAN Qiaojun, MIAO Suying, LI Hengxiang, et al (5962)	
Community characteristics of phytoplankton in the coastal area of Leizhou Peninsula and their relationships with primary environmental factors in the summer of 2010	5972
..... GONG Yuyan, ZHANG Caixue, SUN Xingli, et al (5972)	
Morphological differences in statolith and beak between two spawning stocks for <i>Illex argentinus</i>	5986
..... FANG Zhou, CHEN Xinjun, LU Huajie, et al (5986)	
Relationships between coastal meadow distribution and soil characteristics in the Yellow River Delta	5998
..... TAN Xiangfeng, DU Ning, GE Xiuli, et al (5998)	
Variation analysis about net primary productivity of the wetland in Panjin region	6006
..... WANG Liwen, WEI Yaxing (6006)	
Mobilization of potassium from Soils by <i>rhizobium phaseoli</i>	6016
..... ZHANG Liang, HUANG Jianguo, HAN Yuzhu, et al (6016)	
Autotoxicity of aqueous extracts from plant, soil of peanut and identification of autotoxic substances in rhizospheric soil	6023
..... HUANG Yuqian, HAN Lisi, YANG Jinfeng, et al (6023)	
Effects of shading on the photosynthetic characteristics and anatomical structure of <i>Trollius chinensis</i> Bunge	6033
..... LV Jinhui, WANG Xuan, FENG Yanmeng, et al (6033)	
Short-term effects of fire disturbance on greenhouse gases emission from sedge and shrubs forested wetland in Lesser Xing'an Mountains, Northeast China	6044
..... GU Han, MU Changcheng, ZHANG Bowen, et al (6044)	
Plant species diversity and community classification in the southern Gurbantunggut Desert	6056
..... ZHANG Rong, LIU Tong (6056)	
Effects of mixing leaf litter from <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> and <i>Larix principis-rupprechtii</i> with that of other trees on soil properties in the Loess Plateau	6067
..... LI Qian, LIU Zengwen, MI Caihong (6067)	
Effects of long-term intensive management on soil ammonia oxidizing archaea community under <i>Phyllostachys praecox</i> stands	6076
..... QIN Hua, LIU Borong, XU Qiufang, et al (6076)	
Hydrogen peroxide participates symbiosis between AM fungi and tobacco plants	6085
..... LIU Hongqing, CHE Yongmei, ZHAO Fanggui, et al (6085)	
Relationships between dominant arbor species distribution and environmental factors of shelter forests in the Beijing mountain area	6092
..... SHAO Fangli, YU Xinxiao, ZHENG Jiangkun, et al (6092)	
Analysis of rhizosphere microbial community structure of weak and strong allelopathic rice varieties under dry paddy field	6100
..... XIONG Jun, LIN Huifeng, LI Zhenfang, et al (6100)	
Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties	6110
..... HUANG Lin, WANG Feng, ZHOU Lijiang, et al (6110)	
Effect of silicon application on antioxidant system, biomass and yield of soybean under ozone pollution	6120
..... ZHAN Lijie, GUO Liye, NING Tangyuan, et al (6120)	
Effect of landfill leachate irrigation on soil physiochemical properties and the growth of two herbaceous flowers	6128
..... WANG Shuqin, LAI Juan, ZHAO Xiulan (6128)	
Nitrous oxide emissions affected by tillage measures in winter wheat under a rice-wheat rotation system	6138
..... ZHENG Jianchu, ZHANG Yuefang, CHEN Liugen, et al (6138)	
Effects of different fertilizers on soil enzyme activities and CO ₂ emission in dry-land of maize	6147
..... ZHANG Junli, GAO Mingbo, WEN Xiaoxia, et al (6147)	
The response of agro-ecosystem productivity to climatic fluctuations in the farming-pastoral ecotone of northern China: a case study in Zhunger County	6155
..... SUN Tesheng, LI Bo, ZHANG Xinshi (6155)	
The relationship between energy consumption and carbon emission with economic growth in Liaoning Province	6168
..... KANG Wenxing, YAO Lihui, HE Jienan, et al (6168)	
Spatial distribution characteristics of potential fire behavior in Fenglin Nature Reserve based on FARSITE Model	6176
..... WU Zhiwei, HE Hongshi, LIANG Yu, et al (6176)	
Chill conservation of natural enemies in maize field with different post-crop habitats	6187
..... TIAN Yaojia, LIANG Guangwen, ZENG Ling, et al (6187)	
Effect of population of <i>Kerria yunnanensis</i> on diversity of ground-dwelling ant	6195
..... LU Zhixing, CHEN Youqing, LI Qiao, et al (6195)	
Response of <i>Parnassius apollo</i> population and vertical distribution to climate warming	6203
..... YU Fei, WANG Han, WANG Shaokun, et al (6203)	
Review and Monograph	
Integrated assessment of marine aquaculture ecosystem health: framework and method	6210
..... PU Xinming, FU Mingzhu, WANG Zongling, et al (6210)	
Seagrass meadow ecosystem and its restoration: a review	6223
..... PAN Jinhua, JIANG Xin, SAI Shan, et al (6223)	
Nutri-toxicological effects of cyanobacteria on fish	6233
..... DONG Guifang, XIE Shouqi, ZHU Xiaoming, et al (6233)	
Effect of environmental stress on non-structural carbohydrates reserves and transfer in seagrasses	6242
..... JIANG Zhijian, HUANG Xiaoping, ZHANG Jingping (6242)	
Advances in ecological immunology	6251
..... XU Deli, WANG Dehua (6251)	
Scientific Note	
The causes of spatial variability of surface soil organic matter in different forests in depressions between karst hills	6259
..... SONG Min, PENG Wanxia, ZOU Dongsheng, et al (6259)	
Characteristics of seed rain of <i>Haloxylon ammodendron</i> in southeastern edge of Junggar Basin	6270
..... LÜ Chaoyan, ZHANG Ximing, LIU Guojun, et al (6270)	

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

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

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

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

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

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

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 32 卷 第 19 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 19 (October, 2012)

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:1000717	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 70.00 元