

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靓, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽孢杆菌及其芽孢对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

臭氧对几种楠木气体交换参数的影响

李苗苗

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

摘要: 为研究不同臭氧处理对刨花楠 (*Machilus pauhoi*)、桢楠 (*Lindera setchuenensis*)、闽楠 (*Phoebe bournei*)、宜昌楠 (*Phoebe chekiangensis*) 和红楠 (*Machilus thunbergii*) 光合特性的影响, 在中国科学院千烟洲生态试验站开展开顶式气室 (open-top chambers, OTCs) 熏气实验, 测定了 4 种臭氧环境下不同楠木的气体交换参数: 净光合速率 (net photosynthetic rate, P_n)、气孔导度 (stomatal conductance, Cond)、蒸腾速率 (transpiration rate, T_r), 并对结果进行统计分析。结果表明, 臭氧胁迫改变了所有供试植物的 P_n 、Cond 变化趋势, 不同楠木表现出不同的反应。臭氧对光合作用的影响随着臭氧浓度、处理时间、季节因素的不同呈现动态变化, 且并非只有抑制效果, 短期内臭氧暴露甚至可以促进多数实验植物 P_n 达到峰值, 且该值高于对照组, 而且低、中浓度的臭氧处理使红楠和宜昌楠的光合作用明显增强; 此外臭氧还使 P_n 峰值时间提前, 破坏了 P_n 和 Cond 之间的正相关关系; 从光合特性角度发现抗性最强的是红楠, 其次闽楠, 比较敏感的是宜昌楠、刨花楠和桢楠。

关键词: 臭氧; 楠木; 光合作用; 敏感性; 千烟洲

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1888-14 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.05.051

Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants

LI Miao-miao

(Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: In order to investigate the effect of ozone on photosynthesis of *Machilus pauhoi*, *Lindera setchuenensis*, *Phoebe bournei*, *Phoebe chekiangensis* and *Machilus thunbergii*, the study was carried out in 12 open-top chambers (OTCs) with different levels of ozone in Qianyanzhou experimental station, and net photosynthesis rate (P_n) and stomatal conductance (Cond) were detected. The results indicated that ozone treatments changed the variation trend of photosynthesis of all tested plants, but ozone exposure did not always play an inhibitory role on them. In fact, photosynthesis changed with ozone concentration, experimental period, season and specific species. Exposed to ozone could even promote P_n to a peak in a short term, and the indicator of plants treated with ozone was higher than that of the control at this point. Low and medium concentrations of ozone treatment enhanced P_n of *Phoebe bournei* and *Machilus thunbergii*. The peak of treatment group also came earlier because of ozone. Furthermore, the positive correlation between P_n and Cond did not exist under the condition of ozone. *Machilus thunbergii* had the strongest resistance to ozone, followed by *Phoebe bournei*, by comparison, *Phoebe chekiangensis*, *Machilus pauhoi* and *Lindera setchuenensis* were more sensitive.

Key words: ozone; plant; photosynthesis; sensitivity; Qianyanzhou

平流层中的臭氧能够从太阳光中吸收高能紫外线, 减缓地球生命受到的紫外线损伤。但是在距地面 15 km 范围内的对流层, 特别是距地面 1~2 km 近地层内臭氧, 却能对地球上的人类和动植物及其生存环境产生危害^[1]。近年来, 随着化石燃料的大量使用和汽车尾气的排放致使臭氧前体物质排放量显著增加, 全球 O_3 表现出日益明显的增长趋势。有证据表明北半球中纬度的背景臭氧含量在过去的 30 年间持续增长, 每年大约为 0.5%~2%, 而 20 世纪 70 年代和 80 年代与 90 年代相比上升趋势更陡峭, 90 年代增长相对平稳, 相比工业革命前, 当前的 O_3 浓度已经增加了 36%。目前看来全球有接近 1/4 的国家和地区对流层的 O_3 浓度已经达到 60 $nL \cdot L^{-1}$ 。北半球每年的夏季臭氧会出现最大值, 全球化学传输模型研究表明, 对流层臭氧可达 344

$Tg \cdot a^{-1}$, 使用 IPCC 排放的模型预测的 21 世纪背景臭氧可能上升到超过国际公认的人类健康和环境标准。按照当前臭氧的发展趋势, 预计到 2100 年, 全球对流层可达 80 $nL \cdot L^{-1}$ ^[2]。

自 20 世纪 50 年代开始, 人们已经发现 O_3 污染对作物和野生植物的可见影响, 国内外研究表明 O_3 超过一定浓度能对植物产生急性和慢性伤害, 涉及植物的形态特征、年轮、气孔导度、膜系统和光合作用等方面, 例如诱导植物叶片气孔关闭, 阻碍 CO_2 的吸收, 减少植物体叶绿素含量, 使叶片黄化, 破坏光合组织, 加速叶片衰老, 影响光合作用效率, 矮化

收稿日期: 2014-06-12; 修订日期: 2014-12-27

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项 (201304313)

作者简介: 李苗苗 (1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为气候变化, E-mail: mmli@rcees.ac.cn

植株,改变细胞膜透性,影响细胞内的抗氧化系统等^[3-10]。随着全球臭氧浓度的增加以及污染范围的扩大,臭氧污染问题已经成为许多研究者和公众关注的焦点, O_3 直接导致了北美和欧洲森林生产力的降低,比较悲观的预估是到2100年将有接近50%的北半球森林受到 O_3 威胁^[11]。光合作用作为植物物质循环和能量转换的基础,同时也是对 O_3 最敏感的生理过程之一,容易受到环境条件和内部因素的影响,国内目前已陆续开展了 O_3 胁迫对水稻(*Oryza sativa*)、小麦(*Triticum aestivum*)、油菜(*Brassica chinensis*)、大豆(*Glycine max*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)和四季竹(*Oligostachyum lubricum*)等植物光合生理的研究^[5,12-16]。光合速率反映了一定外界条件下植物的光合能力, O_3 的强氧化性能导致高浓度 O_3 环境中植物的光合速率下降,光合作用受到抑制。白月明等^[17]利用OTC实验研究发现植物叶片的光合速率及变化幅度随 O_3 浓度增加而降低,但 O_3 对植物光合速率的影响与植物种类有较大关系。此外,研究人员对 O_3 处理下植物光合速率下降的原因进行了探究,长时间高浓度 O_3 处理促使植物 CO_2 同化率降低,可能是由于气孔导度的相对降低限制了 CO_2 和 H_2O 的进入植物体内,光合速率下调^[18],光合速率降低的原因被归纳为两类:气孔和非气孔限制因素^[19,20]。目前国内臭氧对植物光合生理的影响研究主要以农作物为主^[21,22],少有为树木尤其是南方树木光合生理影响的报道,且缺乏实验期间的连续测定,对其动态变化情况并不清楚。楠木是我国南方地区天然分布的常见珍贵树种,研究其臭氧敏感性具有一定的现实意义。本研究以江西泰和县灌溪镇的千烟洲试验站为实验基地,选取5种当地楠木:刨花楠、桢楠、闽楠、宜昌楠和红楠的幼苗为供试植物,进行臭氧暴露开顶式熏气实验,测定以净光合速率(P_n)和气孔导度(Cond)两种气体交换参数为主,从光合特性角度揭示森林树种对 O_3 胁迫的响应,鉴定不同楠木的臭氧敏感特性,并对其作用机制进行初步探究,以期在臭氧损害的鉴定指标、指示物种以及指导生态系统管理实践等方面提供一定的依据和参考。

1 材料与方法

1.1 实验区及供试材料

本实验地点是位于江西泰和县的中国科学院千烟洲试验站(115°04'13"E,26°44'48"N),地处中亚

热带常绿阔叶林区,具亚热带季风气候特征,属赣江中游典型红壤丘陵区,生态系统为典型的亚热带森林生态系统。海拔为100 m左右,温暖湿润,四季分明,年均温17.9℃,年日照时数1406 h,日照百分率约为32%,太阳年总辐射量4349 MJ·m⁻²;无霜期323 d,年均降水量1489 mm。供试植物为当地常见的人工林树种:刨花楠、桢楠、闽楠、宜昌楠和红楠的容器苗。

1.2 实验仪器与装置

用于测定气体交换的Li-6400便携式光合测定仪(美国LI-COR公司),以及自制的不锈钢管和无色透明钢化玻璃构建的开顶式气室(OTCs),主要由框架、室壁、通风系统及布气系统、过滤系统、 O_3 发生系统、 O_3 浓度控制系统、气室内 O_3 浓度自动采集监测系统组成,气室顶部安装雾化喷嘴进行高压喷雾,以保证浇水均匀并起到对气室降温的作用。其中臭氧发生系统利用臭氧发生器作为气源,采用的是济南三康环保公司的放电型发生器,通过将纯氧通入高频放电单元而产生臭氧;生出的臭氧通过分支管,用转子流量计控制其流量,配置不同的浓度,再借助风机送入气室。

1.3 实验设计

每个OTC内共放25个控根容器,均匀放置5种供试植物,每种植物设5个重复。实验共设置4个不同的 O_3 浓度水平,对每个OTC进行一种臭氧熏气处理,每个处理以OTC为单元设3次重复,共12个OTC。如表1,分别为:对照组CK(不通 O_3 的自然大气),即低浓度的 O_3 处理组1(O_3 体积分数为 $80 \times 10^{-9} \pm 10 \times 10^{-9}$)、 O_3 处理组2($140 \times 10^{-9} \pm 10 \times 10^{-9}$)、 O_3 处理组3(浓度为 $200 \times 10^{-9} \pm 10 \times 10^{-9}$)。2013年8月21日将容器苗移入控根育苗容器,培育一个月后,选择相对一致的健康盆栽苗移入OTC中,缓苗一段时间。10月1日,开始适应性熏气4 d,正式监测发生在10月6日~11月2日,下雨天停止熏气, O_3 熏气时间为每天09:00~17:00,阴雨天气停止熏气,测定相应指标。整个处理期间水肥适宜、除臭氧外其他环境条件保持一致。

1.4 指标测定指标和计算方法

实验期间选择晴天上午对5种植株采用Li-6400光合仪在控光条件下测定(选择植株上部生长状况良好、长势一致、光照均一的全展叶片同一叶位测定,每个OTC中同种楠木选定3~5盆,每株测定3~5片叶子,每片叶读取9~15个观测值,取其平均值作为测定值),设定叶室内温度25℃,光强

$1\,000\,\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,由外接的 5 L 缓冲瓶维持测定期间 CO_2 浓度的稳定,测定净光合速率 [P_n , $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$],气孔导度 [Cond , $\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$],蒸腾速率 [T_r , $\text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$],该系统同时记录的数据还有当时的空气 CO_2 浓度、空气温度、叶片温度、相对湿度和光合有效辐射等环境因子。

表 1 处理组和对照组的臭氧梯度设置

Table 1 Ozone gradients of treatment groups and the control group	
OTCs 处理组	臭氧浓度
对照组	自然空气
处理 1 组	$70\times 10^{-9}\sim 90\times 10^{-9}$
处理 2 组	$130\times 10^{-9}\sim 150\times 10^{-9}$
处理 3 组	$190\times 10^{-9}\sim 210\times 10^{-9}$

1.5 数据处理与统计

应用 GraphPad Prism 5.0 和 SPSS 16.0 软件对实验数据进行统计分析和作图,数据用均值加减 $\pm$ 标准差表示。

2 结果与讨论

2.1 净光合速率变化特征及统计分析

本实验通过设置不同的臭氧浓度,增加测量频率,进一步细化光合作用的动态变化过程。统计分析结果如图 1~3 和表 2 所示,发现了不同楠木光合作用对臭氧的响应特征。

图 1 中的第 0 d 是测定的初始时间(即 10 月 6 日,下同),除对照组外,总体来看实验期间刨花楠的光合速率(即净光合速率,下同)是随时间波动式下降的,对照组与处理 1、2 和 3 组的光合速率变化趋势差异较大,10 月对照 OTC 的刨花楠光合速率经过短暂的降低后呈上升趋势,进入 10 月底及 11 月初下降。而处理 1、2、3 组的刨花楠在熏气初始时期短暂的增加,各熏气组的峰值均出现在 10 月 10 日(熏气第 10d),处理 1、2、3 组刨花楠光合速率峰值分别高于对照 18%、62% 和 24%,但未达显著水平($P>0.05$,图 2),而对照组的峰值出现在 10 月 30 日,随后下降。在初始熏气 10 d 左右时,臭氧对刨花楠 P_n 具有一定促进作用,随着熏气的持续,尤其在对照组的 P_n 明显增加的时间段,抑制作用逐渐占主导。而进入 10 月底 11 月初(11 月生长季将要结束)熏气处理结束时,各组的光合速率都降到最低,最终值未达显著差异(图 3 和表 2)。

桢楠的光合速率随时间逐渐降低,10 月中上旬对照组桢楠光合速率略呈上升趋势,各处理组的峰

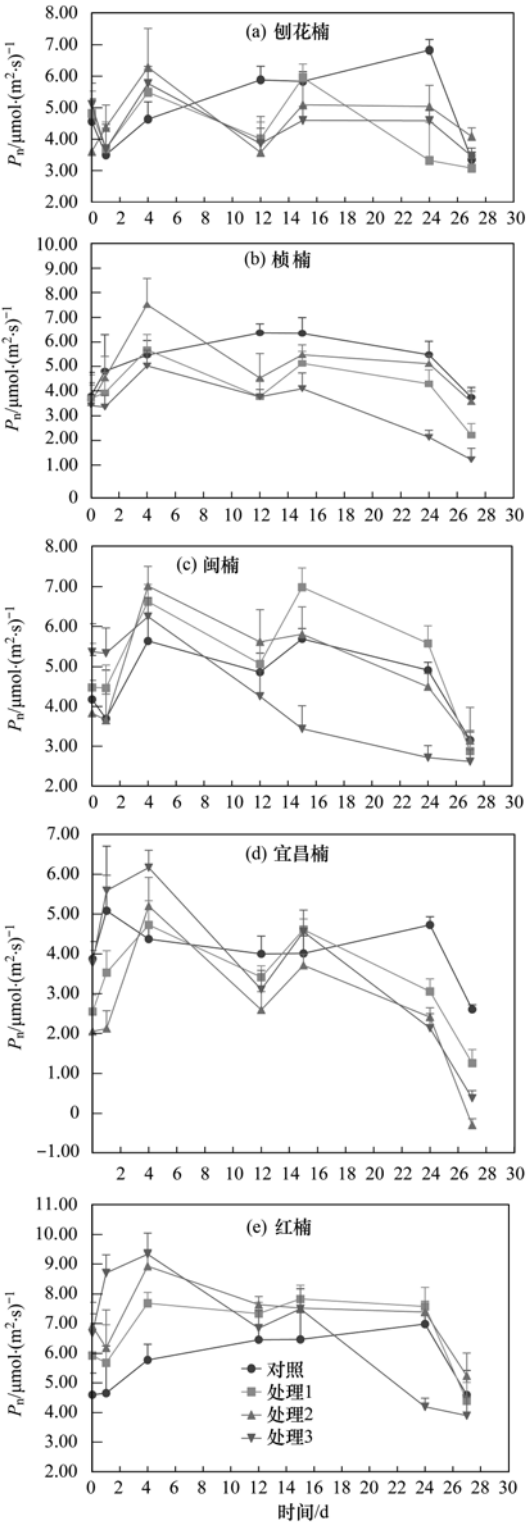
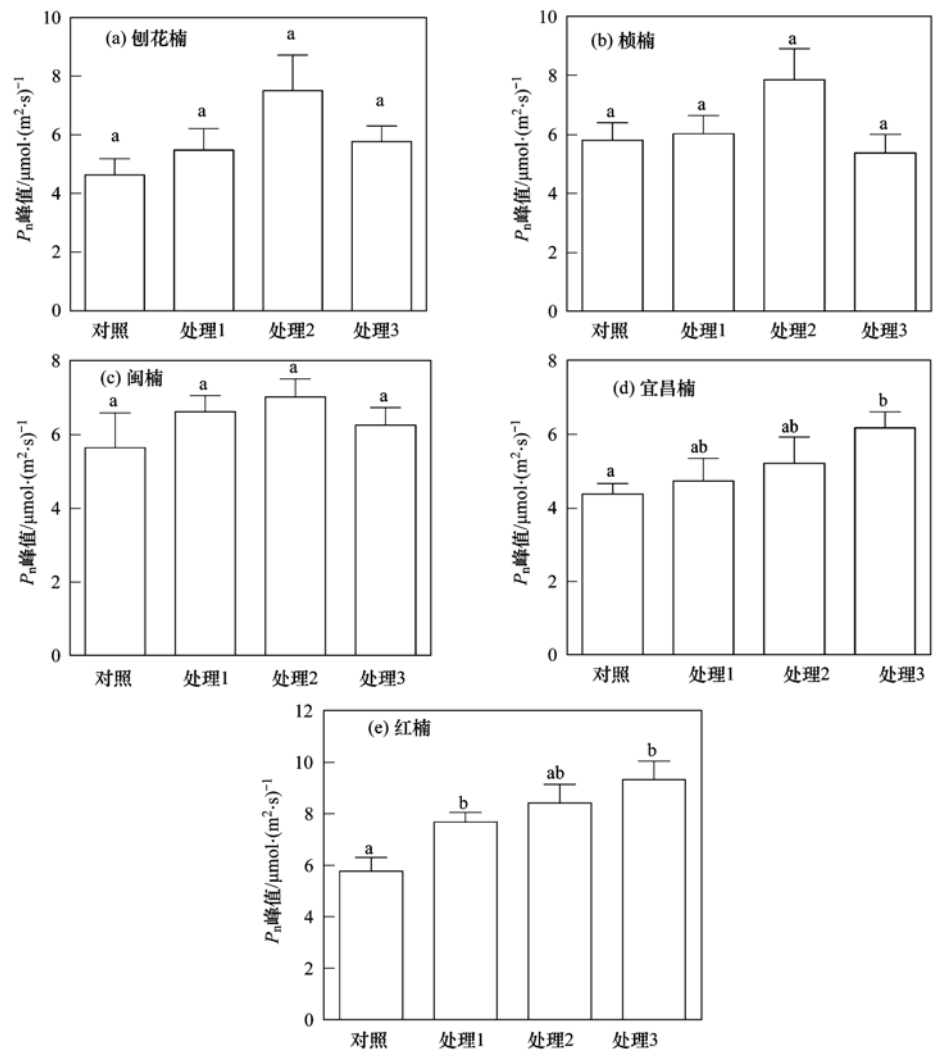


图 1 不同楠木的 P_n 变化趋势

Fig. 1 Photosynthetic rate variations of tested plants

值也出现在 10 月 10 日,10 月下旬开始下降,桢楠各处理组的整体变化趋势与刨花楠相似。熏气初期处理 1、2、3 组桢楠 P_n 短暂增加,10 月 10 日(即熏气第 10 d)出现峰值时,处理 1、2 组的峰值分别高于对照 4%、35%,差异不显著($P>0.05$),在这个



图中不同小写字母表示差异显著(显著性水平见表2),下同

图2 不同臭氧处理对植物 P_n 峰值的影响

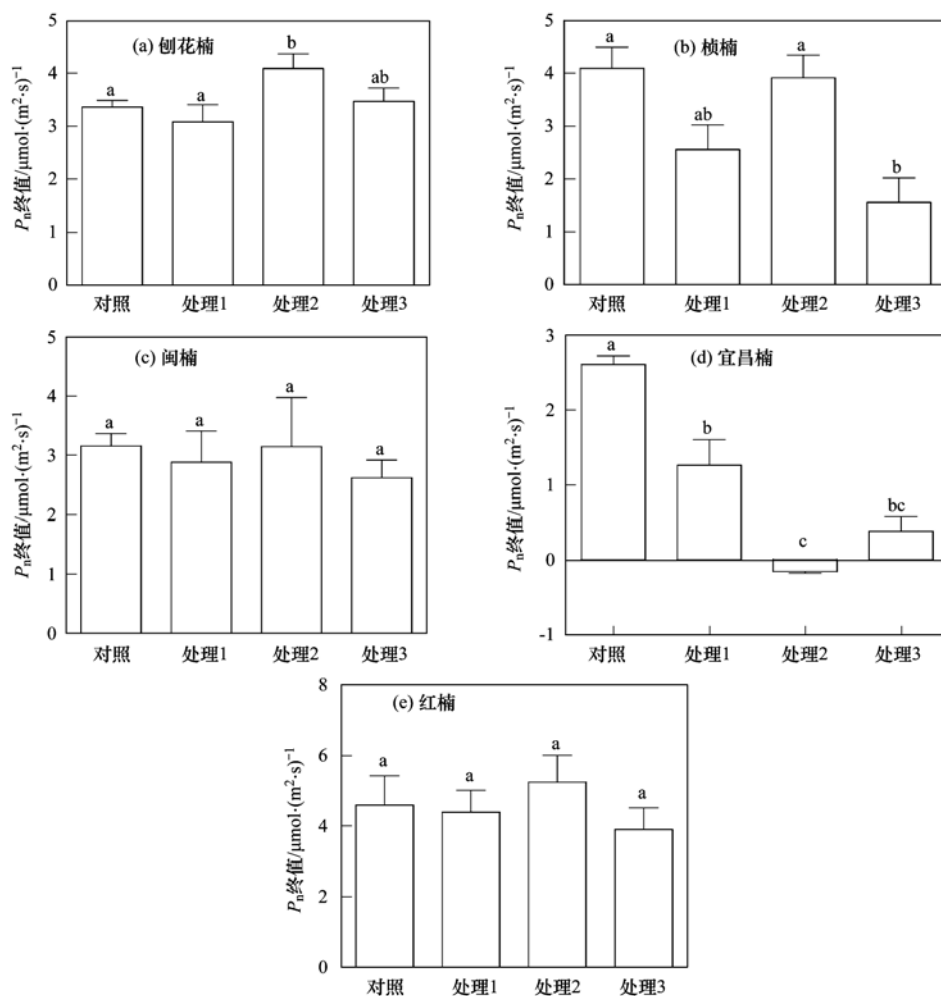
Fig. 2 Effects of ozone on the peak of P_n

阶段只有高浓度处理3组的桢楠 P_n 最低,受到抑制,但未达显著水平($P>0.05$). 实验中后期 P_n 一直下降直到熏气结束,此时对照组的 P_n 最高,熏气结束时,与对照相比处理组1、2、3 光合速率分别降低了38%、5%和62%,浓度最高的处理组3降低最明显,达到显著水平($P<0.05$),同时2、3 处理之间差异显著($P<0.05$). 认为臭氧熏气在实验初期对桢楠的光合作用有短暂的促进,之后随着熏气的持续,臭氧对光合的抑制作用逐渐显现,而且浓度越高的组抑制作用越强(图1~3和表2).

闽楠对照组与处理1、2 组的光合速率变化趋势总体一致,同刨花楠和桢楠相同的是均于10月10日各组出现峰值,且处理1、2、3 均比对照高,但差异不显著($P>0.05$),后期 P_n 值呈波浪式的下降,处理3 组的闽楠在熏气初期增加到峰值后

一直下降直到熏气结束并在此时出现最小值. 相比对照组,一定浓度和时间范围内的臭氧处理对闽楠的光合有一定促进作用,处理1 组的闽楠 P_n 值在整个熏气期间一直高于对照,处理2 的也高于或接近对照组,只有高浓度处理3 组的闽楠 P_n 相比对照组明显下降,熏气结束时达到17% ($P>0.05$),而处理1 和2 对其光合作用反而有促进效果(图1~3和表2).

与上述3 种植物相似的是宜昌楠在实验初期 P_n 有短暂的上升,随后处理各组的 P_n 降低且变化趋势基本一致,而对照组的宜昌楠在10月底之前一直比较平稳,且也在10月10日出现峰值,此时处理组的 P_n 均高于对照,随着熏气的持续积累,抑制效应则逐渐明显,尤其是在对照组的光合作用随着季节变化明显增强的时间段,宜昌楠处理组的 P_n 反而

图3 不同臭氧处理对植物 P_n 终值的影响Fig. 3 Effects of ozone on the terminal value of P_n

迅速减小。虽然实验前期臭氧对宜昌楠的光合有所促进,但实验后期对照组整体高于处理组,各组 P_n 最小值都出现在熏气即将结束时,最终处理1、2、3分别比对照降低52% ($P < 0.01$)、123% ($P < 0.001$)、85% ($P < 0.001$),均达极显著水平,中高浓度的臭氧处理降低幅度更大,因此臭氧对宜昌楠的光合作用有明显的抑制效果(图1~3和表2)。

红楠与其他植物表现出相似的特征,熏气初期 P_n 增加,10月10日出现峰值,与对照组相比处理1、2、3组分别显著升高33%、55%、62% ($P < 0.05$),实验前期臭氧浓度越高的组表现出对光合的促进作用越强,达到一定的积累时间后,促进效果开始减弱,逐渐接近对照组,处理3组红楠在熏气20d时开始出现抑制,可能是由于处理3的臭氧浓度超过了红楠的伤害阈值。因此臭氧熏气在短期内对红楠的光合作用有促进效果,但随着熏气的持续,不同的臭氧浓度会对光合作用体现出不同的效果,

促进或是抑制与具体的臭氧浓度有关,而在处理1和处理2的浓度下的熏气期间,臭氧对红楠主要为促进光合作用,就光合作用来看,与其他4种植物相比,红楠的抗性最强,可初步认定为臭氧抗性植物(图1~3和表2)。

叶是植物进行光合作用的重要组织,也是其水分和营养积累的重要场所。臭氧环境中叶片是臭氧胁迫最重要的感应器,在造成可见叶片伤害的同时会引起叶片内光合作用的变化。光合作用是植物最基本的生理过程,同时也是对外界环境比较敏感的重要生理过程。光合速率反映了在一定光强、温度和水分条件下植物的光合能力^[11,20,21]。以往的研究中,大量实验证实强氧化性导致高浓度 O_3 环境中植物的光合作用受到抑制、光合速率下降^[1,4,13,14,22~24],但多是基于短期的熏气实验或者较长研究期的某次结果得出的结论,不具有代表性,缺乏连续测定值检验该结论的可靠性,也不能确定植

物在实验期间的动态变化过程. 本研究发现臭氧对光合作用并非一味的抑制作用,是随熏气浓度、处理时间、季节因素以及植物种类而动态变化. 臭氧暴露对不同楠木起到不同的作用,对刨花楠、桢楠和宜昌楠表现出先促进后抑制的过程,随着熏气时间的延长,这种作用逐渐趋于明显,最终 P_n 减小的程度均达到显著水平或极显著水平;臭氧对闽楠光合作用的影响则与浓度相关,低浓度处理组表现出促进作用,高浓度的表现为抑制作用;而实验期间臭氧对红楠主要为促进作用,但是高浓度的处理 3 组在后期对红楠也表现出明显的抑制作用. 因此认为臭氧不仅可以抑制光合,一定浓度范围和积累时间内的臭氧也能产生明显的促进作用,但存在一个阈值,超过这个值后即使是对臭氧具有一定抗性的植物也会受到抑制,比如红楠和闽楠,红楠在 P_n 峰值处显著高于对照,臭氧对红楠的促进作用比闽楠更强,但两者的促进作用都会随着熏气时间的累积而减弱,最终 P_n 与对照组差距逐渐减小,甚至在结

束时已无显著差异. 根据方差分析结果(图 2、3,表 2),与对照相比,刨花楠、桢楠和闽楠各臭氧处理组的 P_n 峰值无显著变化($P>0.05$),中低臭氧处理使红楠的 P_n 峰值分别显著升高($P<0.05$),臭氧对植物的峰值影响显著的并不多,大多对 P_n 终值影响显著. 并非臭氧浓度越高抑制越明显,短期内臭氧暴露可以促进大多数实验植物的 P_n 达到最大值,多数情况下该值(峰值)甚至都高于对照组的楠木,短期内低、中浓度的臭氧处理不仅没有使各植物的光合作用减弱,反而使其光合作用明显增强如宜昌楠和红楠;根据净光合速率的变化趋势(图 1)还发现,楠木对照组和处理组的 P_n 峰值出现时间不一致,一般而言臭氧处理组在 10 月 10 日(熏气第 10 d)出现峰值,而对照组的峰值出现于 10 月中下旬,因此臭氧使楠木 P_n 峰值提前到来. 另外,各组 P_n 最小值都出现在熏气结束时(11 月初),除了臭氧胁迫的因素外,根据对照组的趋势(图 1),还可能与当地的生长季即将结束有关.

表 2 不同臭氧处理对植物 P_n 、Cond、 T_r 峰值和终值的影响¹⁾

Table 2 Effects of ozone on the peak and terminal value of P_n , Cond and T_r						
项目	P_n 峰值	P_n 终值	Cond 峰值	Cond 终值	T_r 峰值	T_r 终值
刨花楠对照组	4.64 ± 0.55a	3.36 ± 0.13a	0.046 ± 0.004a	0.037 ± 0.004a	1.28 ± 0.09a	0.80 ± 0.06a
刨花楠处理组 1	5.49 ± 0.73a	3.09 ± 0.32a	0.069 ± 0.0109b *	0.061 ± 0.005b **	1.73 ± 0.21b *	1.14 ± 0.08b **
刨花楠处理组 2	7.51 ± 1.21a	4.09 ± 0.27b *	0.064 ± 0.008b	0.042 ± 0.009ab	1.53 ± 0.19ab	0.94 ± 0.12ab
刨花楠处理组 3	5.77 ± 0.56a	3.47 ± 0.25ab	0.079 ± 0.007b ***	0.065 ± 0.005 b	1.96 ± 0.14b ***	1.19 ± 0.09b * *
桢楠对照组	5.81 ± 0.59a	4.09 ± 0.40a	0.037 ± 0.004a	0.037 ± 0.004a	0.91 ± 0.12a	0.80 ± 0.07a
桢楠处理组 1	6.02 ± 0.62a	2.56 ± 0.46ab	0.045 ± 0.003a	0.045 ± 0.003a	0.84 ± 0.11a	0.89 ± 0.05a
桢楠处理组 2	7.85 ± 1.06a	3.91 ± 0.43a	0.043 ± 0.004a	0.043 ± 0.004a	0.92 ± 0.12a	0.81 ± 0.06a
桢楠处理组 3	5.37 ± 0.63a	1.56 ± 0.46b *	0.04 ± 0.0002a	0.04 ± 0.0002a	0.86 ± 0.08a	0.99 ± 0.05a
闽楠对照组	5.64 ± 0.95a	3.16 ± 0.21a	0.042 ± 0.002a	0.026 ± 0.002a	0.66 ± 0.06a	0.59 ± 0.05a
闽楠处理组 1	6.62 ± 0.43a	2.88 ± 0.52a	0.023 ± 0.002b ***	0.048 ± 0.004b **	1.23 ± 0.15b **	0.93 ± 0.08b **
闽楠处理组 2	7.02 ± 0.49a	3.14 ± 0.83a	0.022 ± 0.003b **	0.034 ± 0.004a	0.81 ± 0.08a	0.59 ± 0.09ab
闽楠处理组 3	6.25 ± 0.47a	2.62 ± 0.30a	0.013 ± 0.003c ***	0.042 ± 0.003b **	0.84 ± 0.11ab	0.77 ± 0.05b *
宜昌楠对照组	4.38 ± 0.28a	2.61 ± 0.12a	0.044 ± 0.002a	0.055 ± 0.004a	1.26 ± 0.11a	1.18 ± 0.08a
宜昌楠处理组 1	4.73 ± 0.61ab	1.26 ± 0.34b **	0.012 ± 0.001b ***	0.042 ± 0.002b *	1.04 ± 0.11a	0.85 ± 0.04b **
宜昌楠处理组 2	5.21 ± 0.72ab	-0.29 ± 0.15c ***	0.019 ± 0.002b ***	0.036 ± 0.004b *	0.65 ± 0.07b * * *	0.70 ± 0.08b **
宜昌楠处理组 3	6.17 ± 0.44b *	0.38 ± 0.19bc ***	0.028 ± 0.004b **	0.044 ± 0.003b	1.01 ± 0.06a	1.00 ± 0.05a
红楠对照组	5.77 ± 0.53a	4.60 ± 0.83a	0.047 ± 0.006a	0.041 ± 0.006a	1.17 ± 0.07a	0.86 ± 0.12a
红楠处理组 1	7.69 ± 0.36b *	4.40 ± 0.62a	0.026 ± 0.001b **	0.048 ± 0.003a	1.49 ± 0.12b *	0.95 ± 0.04a
红楠处理组 2	8.94 ± 0.56b *	5.24 ± 0.77a	0.026 ± 0.003b *	0.046 ± 0.008a	1.56 ± 0.27ab	0.87 ± 0.14a
红楠处理组 3	9.34 ± 0.71b *	3.90 ± 0.62a	0.030 ± 0.002b *	0.036 ± 0.005a	1.06 ± 0.09a	0.77 ± 0.14a

1) * * * 表示 $P<0.001$, * * 表示 $P<0.01$, * 表示 $P<0.05$

2.2 气孔导度变化趋势及相关统计分析

ΔCond 表示各臭氧处理组与对照组气孔导度之差, $\Delta\text{Cond}>0$ 表示臭氧处理组的气孔导度值大于对照组. 由图 4 可看出,除宜昌楠外各组 Cond 变化较为一致,相比对照均表现出先增大、减小又变大的趋势. 臭氧迫使刨花楠的气孔导度增加,中间出现

过气孔导度减小的阶段,对气孔导度峰值和终值进行方差分析(图 5、6,表 2),发现 10 月 10 日,处理 1、2、3 分别比对照的气孔导度提高了 50% ($P<0.05$)、39% ($P<0.05$)、83% ($P<0.001$),终值分别提高了 64% ($P<0.05$)、13% ($P>0.05$)、76% ($P<0.05$). 桢楠的 ΔCond 与刨花楠变化趋势相

似,实验初期臭氧使其气孔导度先增加,中期气孔导度减小,最终处理1、2、3组的臭氧迫使桢楠的气孔导度提高了21% ($P > 0.05$)、16% ($P > 0.05$)、9% ($P > 0.05$),因此认为臭氧促进桢楠气孔导度增加的效果并不明显. 闽楠与桢楠、刨花楠的 ΔCond 变化趋势有所不同,实验前期和中期的气孔导度降低效果比较明显,10月20日左右达到最小值,处理1、2、3分别比对照降低45% ($P < 0.001$)、48% ($P < 0.01$)、69% ($P < 0.001$),均达到极显著水平,高浓度的臭氧作用最强,且1、2处理和3之间存在显著差异. 到11月初时闽楠气孔导度有所增加,处理1、2、3组的臭氧迫使闽楠气孔导度提高了88% ($P < 0.01$)、31% ($P > 0.05$)、62% ($P < 0.01$),且处理1、2间差异显著,但整体上看臭氧主要迫使闽楠气孔导度降低;对于宜昌楠,除了处理3的植物在前期有短暂的增加外,一直表现为气孔导度降低,10

月20日达到最低值,处理1、2、3分别比对照降低均55% ($P < 0.001$)、57% ($P < 0.001$)、35% ($P < 0.01$),达到极显著水平,而终值降低也分别达到24%、35%、20% ($P < 0.05$),总体看来臭氧主要促使宜昌楠的气孔导度降低,但并非浓度最高的臭氧降低效果最强. 红楠的 ΔCond 变化特征与刨花楠趋势相似(处理3除外),处理3主要使气孔导度降低,处理1、2则提高气孔导度,最终中低浓度的臭氧处理使得红楠气孔导度增加,高浓度的促使气孔导度减小,但均未达到显著水平 ($P > 0.05$). 植物的气孔导度一般都是先增加、降低、再增加(宜昌楠除外,先增加,后降低),这与大多数高浓度 O_3 环境下植物通常气孔导度较低或升高^[18]的研究结果并不一致,而是随着熏气时间有所变化的,而且发现气孔导度的峰值和光合速率的峰值出现时期并不相同,不同植物气孔导度的峰值时间也不相同.

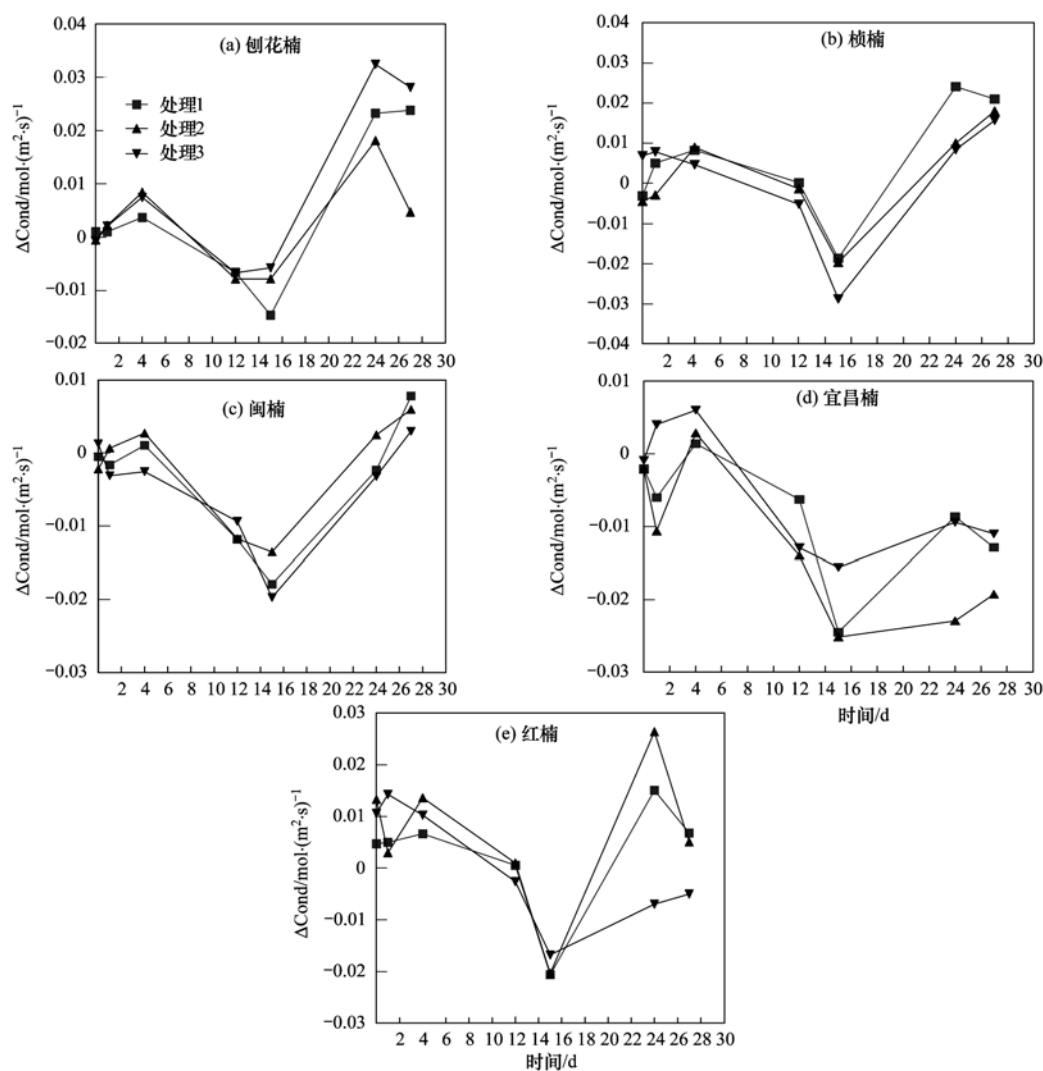


图4 不同楠木 ΔCond 随时间的变化

Fig. 4 ΔCond variation of tested plants

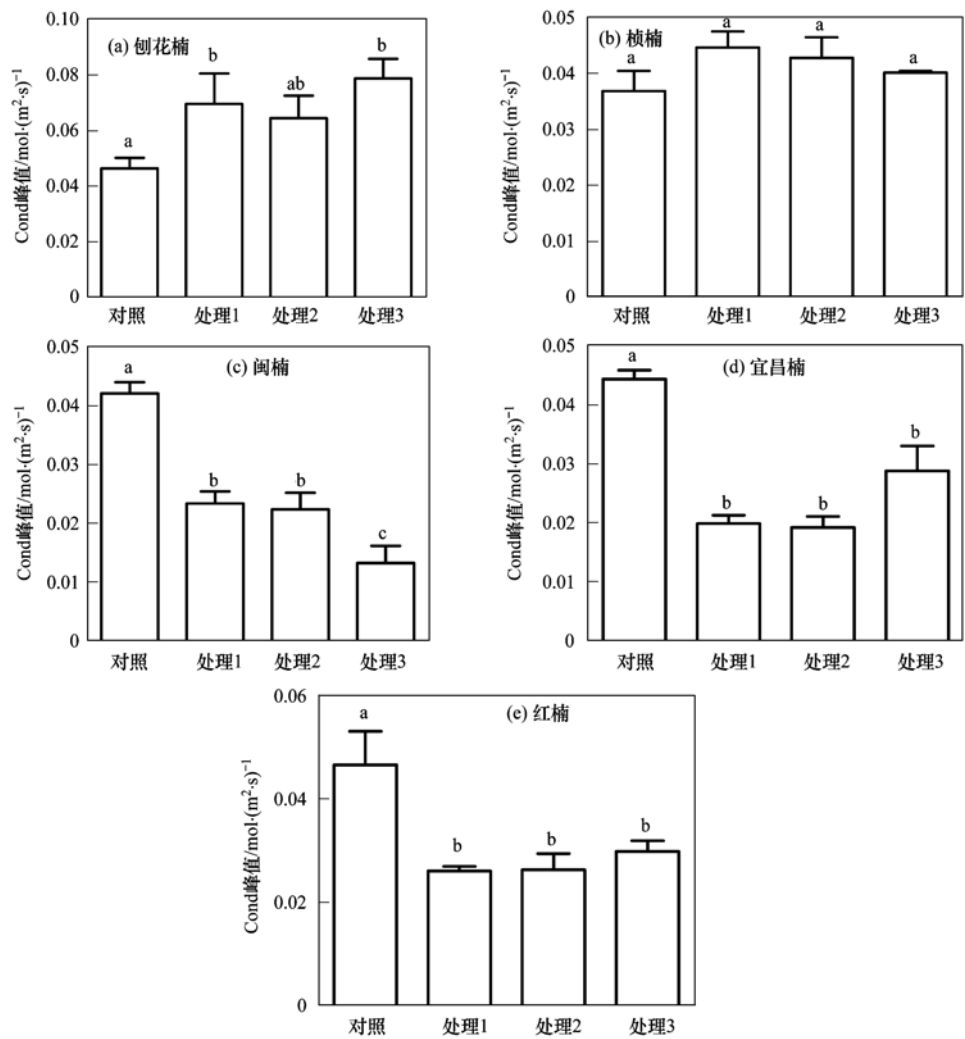


图5 不同臭氧处理对植物 Cond 峰值的影响
Fig. 5 Effects of ozone on the peak of Cond

研究表明控制着呼吸、光合、蒸腾等生理过程的气孔是植物与外界进行气体交换的通道,具有一定的可塑性,高浓度 O_3 可能会影响气孔的开闭,影响气孔导度的大小^[25~27],并对植物的生长和发育产生一定的影响. 高浓度 O_3 环境下植物通常气孔导度较低. 但也有研究表明,敏感性不同的植物其气孔导度对 O_3 的反应并不同. Davison 等^[12] 研究发现,几乎所有车前草 (*Plantain herb*) 种群的气孔导度在 O_3 熏气的开始几个小时均减小,这种表现更明显的是某些对 O_3 敏感的种群,但气孔导度降低效应随处理时间的延长而越发不明显,且敏感种群的改变相对更大. Hassan 等^[28] 设置不同的臭氧梯度,结果发现高 O_3 浓度显著降低了萝卜 (*Raphanus sativus*) 和芜菁 (*Brassica rape*) 的光合速率,但提高了二者的气孔导度,而且萝卜的光合速率随 O_3 浓度增加而下降,而气孔导度却随之升高. 虽然大多数的

研究得出的结论都是 O_3 促使气孔导度减小、阻力增加,但也存在少数相反的观点. 认为一定条件下的 O_3 可以促使植物的气孔张开,保卫细胞和副卫细胞的膨压控制着气孔的开关反应,当气孔导度达到一定程度后气孔阻力变小, O_3 进入叶片的主要因素则变成其他阻力,此时 O_3 吸入量则不再主要受气孔导度大小的影响^[29~31]. 本研究结果也发现,对 O_3 敏感性不同的其气孔导度对 O_3 的反应并不相同,且有一个动态变化的过程,臭氧使得大部分植物气孔导度先增加、减小最后再增大.

2.3 净光合速率和气孔导度的关系

研究表明植物叶片 O_3 的吸入量与气孔导度大小呈正比,气孔导度越大, O_3 吸入量越大,气孔导度与植物受害程度之间呈正比,植物 O_3 敏感性的不同一定程度上归因于气孔导度的差异^[16~21]. 对臭氧比较敏感,对净光合速率和气孔导度进行相关分析,

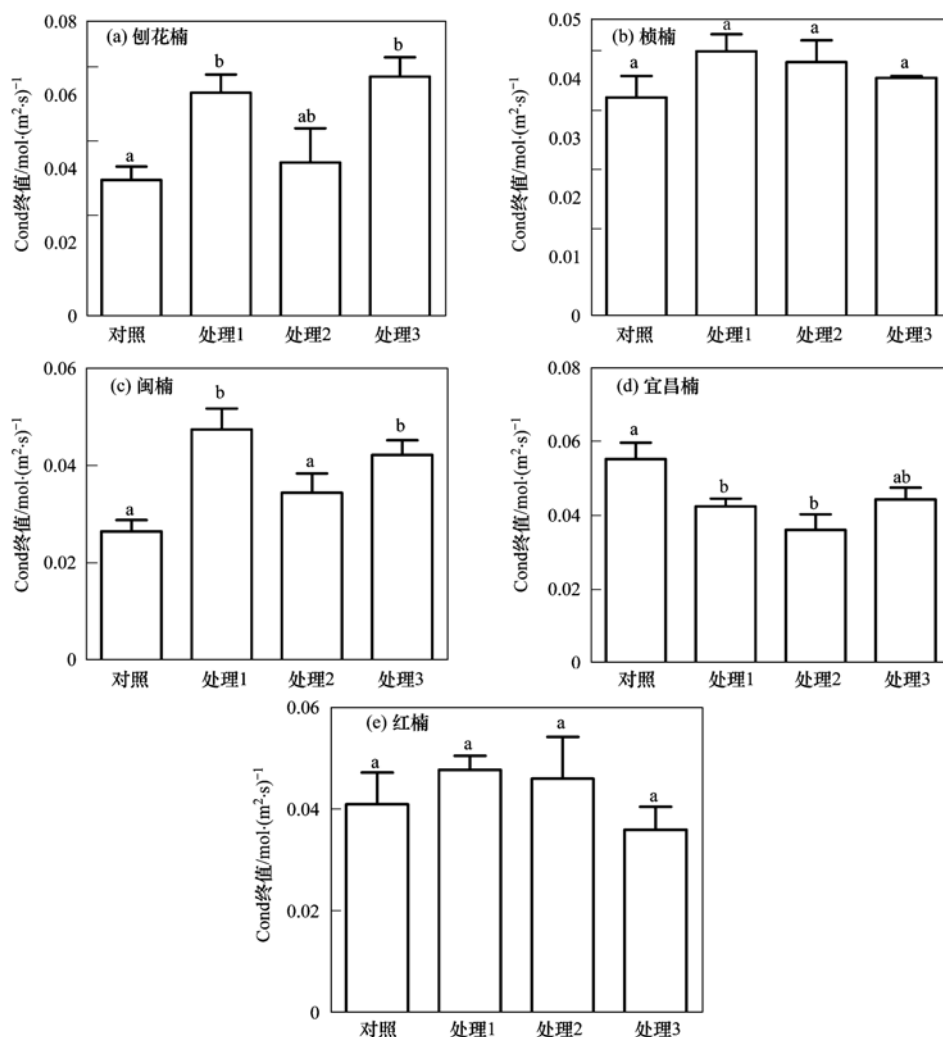


图6 不同臭氧处理对植物 Cond 终值的影响

Fig. 6 Effects of ozone on the terminal value of Cond

得到结果如图7~11和表3所示。

刨花楠对照组的 P_n 和 Cond 极显著正相关 ($r = 0.68^{***}$, $P < 0.001$), P_n 随着气孔导度的增加而增加, 处理组1、3的 P_n 和 Cond 值无相关性 ($P > 0.05$), 处理2的 P_n 和 Cond 值相关性很低 ($r = 0.46^{***}$, $P < 0.001$), 各臭氧处理组的刨花楠在气孔导度达到一定的程度后甚至随 Cond 的增加 P_n 表现出稳或降低的趋势, 因此臭氧熏气改变了刨花楠 P_n 和 Cond 之间的正相关关系 (图7和表3)。

如图8和表3所示, 跟刨花楠相似, 桢楠对照组的 P_n 和 Cond 值中度相关 ($r = 0.70^{***}$, $P < 0.001$), 达到极显著水平, 处理组1、3的 P_n 和 Cond 无相关性 ($P > 0.05$), 处理2的 P_n 和 Cond 相关性不明显 ($r = 0.47^{***}$, $P < 0.001$), 4个实验组中只有对照组的 P_n 和 Cond 显著正相关, P_n 随着气孔导度的增加而增加, 臭氧熏气组均没有明显的正相关

关系, 因此臭氧暴露也改变了桢楠 P_n 和 Cond 之间的正相关关系, 且气孔导度达到一定的程度后 P_n 不再随 Cond 的增加而增加。

闽楠对照组的 P_n 和 Cond 中度正相关 ($r = 0.65^{***}$, $P < 0.001$), 达到极显著水平, 处理组1和处理3的 P_n 和 Cond 值无相关性 ($P > 0.05$), 处理2的 P_n 和 Cond 值低度相关 ($P < 0.0001$), 与刨花楠和桢楠相似, 4个实验组中只有对照组的 P_n 和 Cond 显著正相关, 臭氧熏气组均没有明显的正相关关系, 气孔导度达到一定的程度后 P_n 甚至随 Cond 的增加表现出稳定或降低的趋势, 臭氧熏气改变了闽楠的 P_n 和 Cond 之间的正相关关系 (图9和表3)。

与其它植物不同的是, 宜昌楠对照组的 P_n 和 Cond 无相关性 ($P > 0.05$), 因此宜昌楠本身的光合速率与气孔导度关系不大, 并且处理1和3的 $r < 0$ ($P > 0.05$), 所有实验组之间的气孔导度和光合作

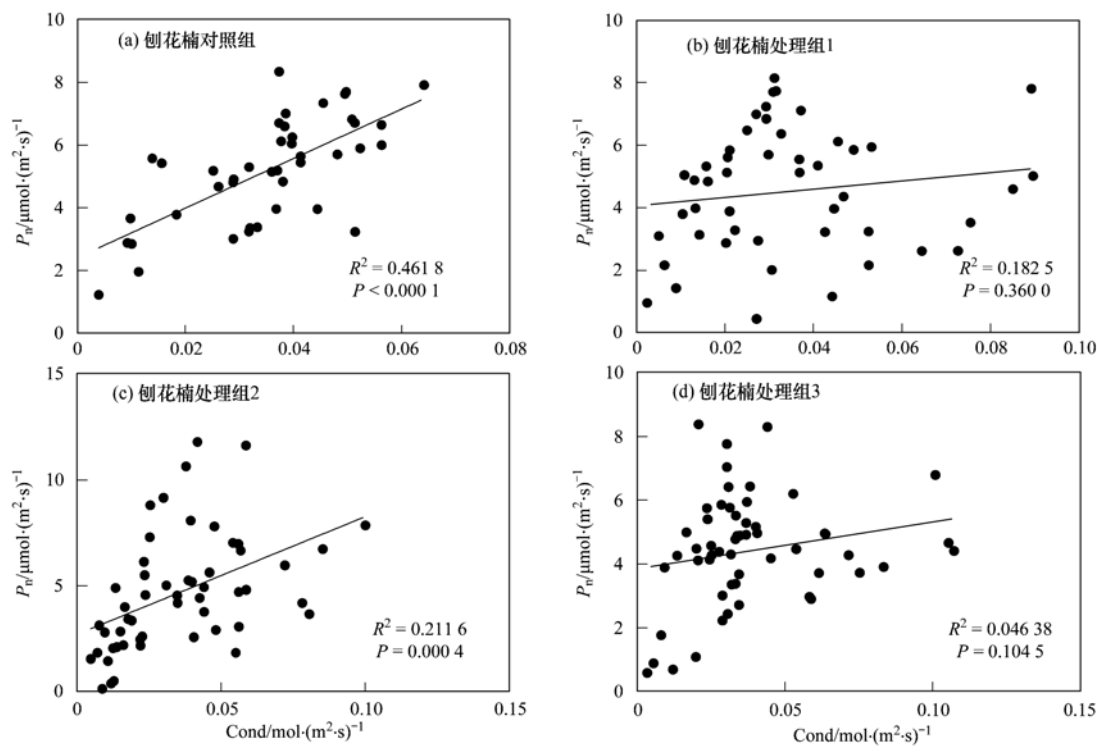


图7 刨花楠各 O₃ 处理组 P_n 和 Cond 的相关性

Fig. 7 Correlation between P_n and Cond of *Machilus pauhoi* treated with ozone

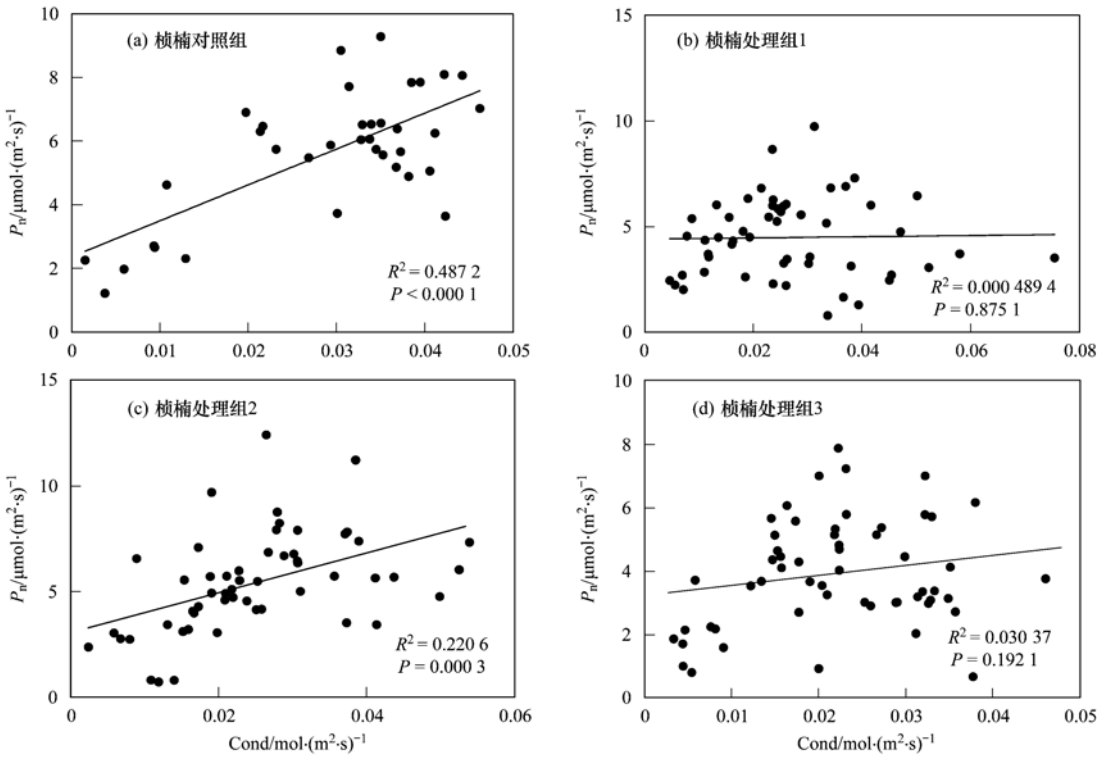
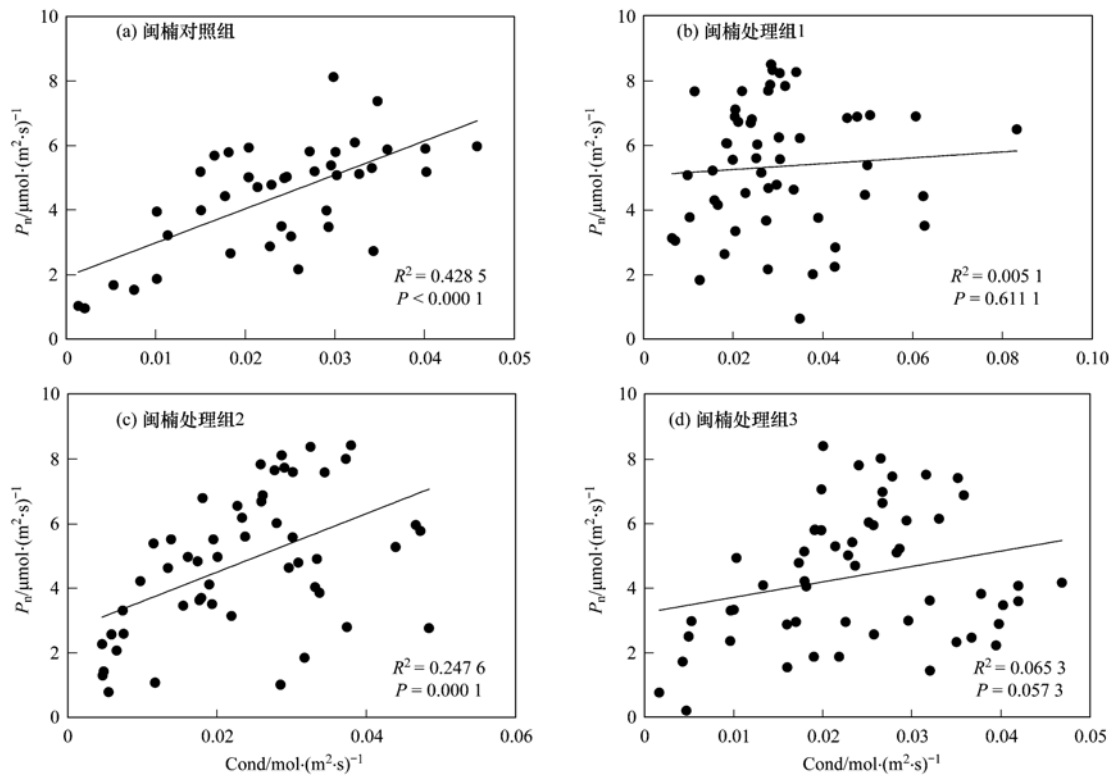
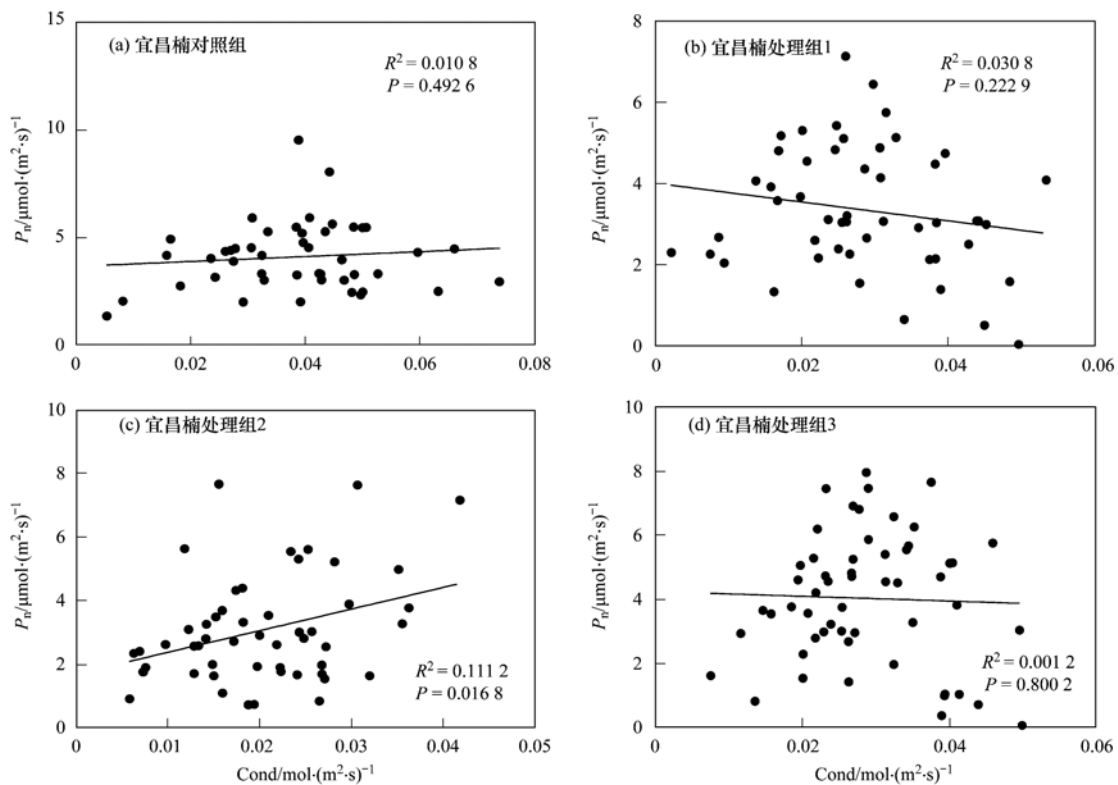


图8 桢楠各 O₃ 处理组 P_n 和 Cond 相关性

Fig. 8 Correlation between P_n and Cond of *Lindera setchuenensis* treated with ozone

用之间的相关关系不明显或表现为负(图 10 和表 3),即气孔导度本身并非宜昌楠光合速率的控制因素,因此气孔导度的改变可能并不会直接影响光合速率的大小,光合速率下降可能归因于其他方面,需

图9 闽楠各 O_3 处理组 P_n 和 Cond 相关性Fig. 9 Correlation between P_n and Cond of *Phoebe bournei* treated with ozone图10 宜昌楠各 O_3 处理组的 P_n 和 Cond 相关性Fig. 10 Correlation between P_n and Cond of *Phoebe chekiangensis* treated with ozone

要进一步深入研究.

与除宜昌楠的其他 3 种植物相似,红楠对照组的 P_n 和 Cond 极显著正相关 ($r = 0.73^{***}$, P

< 0.001 ,图 11),处理组 1、和 3 的 P_n 和 Cond 值无相关性 ($P > 0.05$),且处理 3 的 $r < 0$,处理组 2 相关性很低 ($P < 0.001$),4 个处理组中只有对照

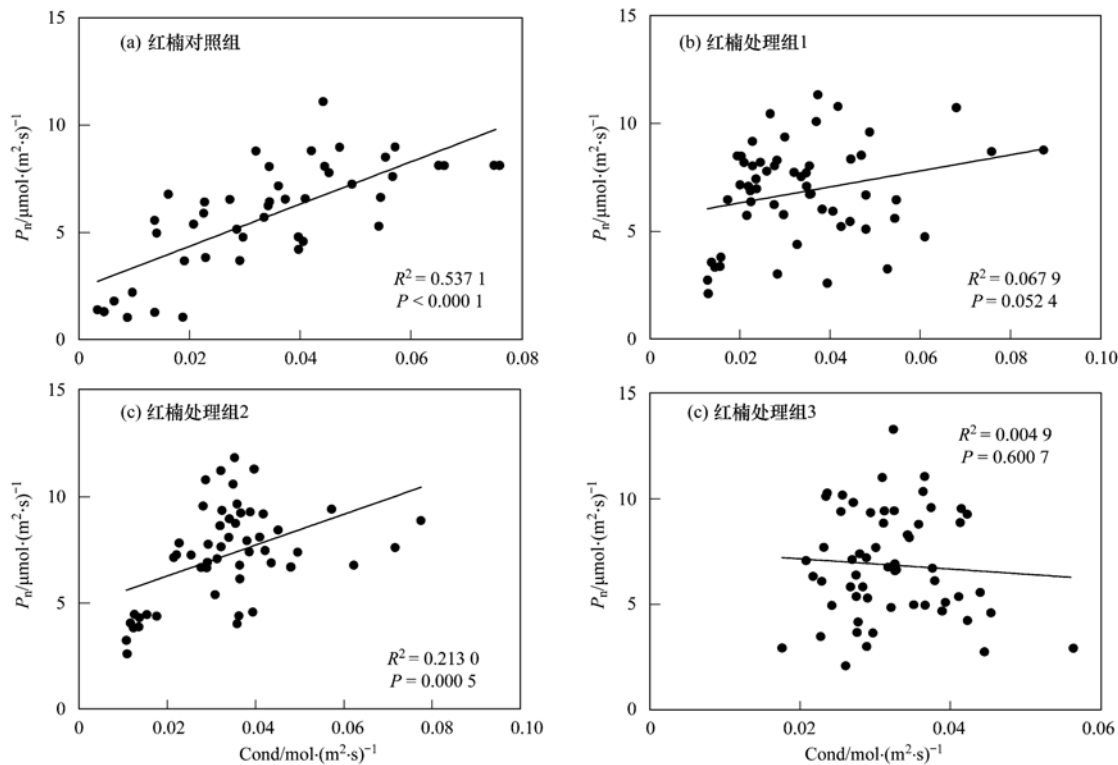


图 11 红楠各 O₃ 处理组的 P_n 和 Cond 相关性

Fig. 11 Correlation between P_n and Cond of *Machilus thunbergii* treated with ozone

表 3 P_n 、 T_r 与 Cond 之间的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficient among P_n , T_r and Cond			
变量组别		P_n	T_r
刨花楠 Cond	对照	0.68 ***	0.918 ***
	处理 1	0.135	0.926 ***
	处理 2	0.46 **	0.935 ***
	处理 3	0.215	0.952 ***
桢楠 Cond	对照	0.698 ***	0.937 ***
	处理 1	0.022	0.843 ***
	处理 2	0.47 ***	0.913 ***
	处理 3	0.239	0.952 ***
闽楠 Cond	对照	0.655 ***	0.894 ***
	处理 1	0.072	0.801 ***
	处理 2	0.498 ***	0.918 ***
	处理 3	0.256	0.853 ***
宜昌楠 Cond	对照	0.104	0.853 ***
	处理 1	-0.176	0.852 ***
	处理 2	0.333 *	0.888 ***
	处理 3	-0.035	0.908 ***
红楠 Cond	对照	0.729 ***	0.937 ***
	处理 1	0.261	0.923 ***
	处理 2	0.462 ***	0.923 ***
	处理 3	-0.07	0.843 ***

1) 表中数据为相关性分析的相关系数,其中 *** 表示 $P < 0.001$, ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

组的 P_n 和 Cond 显著正相关, P_n 随着气孔导度的增加而增加,臭氧处理改变了刨花楠的 P_n 和 Cond 之间的正相关关系,熏气组均没有明显的正相关关系.

因此臭氧浓度越高时,刨花楠的气孔导度越大,光合作用越受抑制;对于桢楠和闽楠,臭氧浓度越高,气孔导度相对越低,光合作用越受抑制;臭氧使宜昌楠气孔导度降低,光合作用也受抑制,但并非臭氧浓度越高的组气孔导度越低,光合作用受到的抑制越强,甚至在 P_n 峰值时期,臭氧浓度越高的组光合作用相对是最强的.低浓度的臭氧能促进红楠气孔开度增大,光合作用增强,而超过一定浓度和积累时间则会使其气孔导度变小,光合速率降低.因此,臭氧的促进或者抑制作用是会随臭氧浓度和熏气积累的时间发生变化的,与植物种类有关.

3 结论

(1) 结合臭氧对净光合速率和气孔导度的作用,5 种供试植物的 O₃ 敏感性不同,其 P_n 和 Cond 表现出对臭氧胁迫的不同响应.桢楠臭氧处理组的

Cond 比对照组低, P_n 也低; 刨花楠和宜昌楠 P_n 相比对照均是先升高后降低, 但这两种植物的 Cond 变化则不同, 刨花楠的 Cond 先降低后增加, 证明气孔开度减小时, 光合作用加强, Cond 增大时, 光合作用反而受抑制, 而宜昌楠则是气孔开度变大时光合作用增强, 降低时光合减弱; 臭氧暴露对闽楠和红楠的影响比较相似, 对二者的光合作用主要表现为促进效应, 该效应受处理浓度和积累时间的影响, 中、低臭氧会使其光合作用一直加强, 而高浓度的臭氧暴露则不同, 处理前期两种楠木的 P_n 也增加, 到后期会变成抑制作用, 而中低浓度的处理对红楠的气孔导度主要为促进作用, 证明二者的气孔导度增加会引起 P_n 增加, 不同的是红楠的气孔导度增加, 而闽楠气孔导度降低。

(2) 臭氧对光合作用并非只有抑制效果, 而是随臭氧浓度、处理时间及季节因素的改变呈动态变化, 也并非臭氧浓度越高抑制越明显, 短期内臭氧暴露甚至可以促进大多数供试植物的 P_n 增加到最大, 其峰值高于(或接近)对照植物, 臭氧对刨花楠、桢楠和宜昌楠刚开始有短暂的促进效果, 中后期主要表现为抑制作用, 臭氧浓度越高的, 抑制作用越明显, 随着熏气过程的持续, 该作用也更加明显; 臭氧浓度越大的组受到的影响越大; 而低、中浓度的臭氧处理不仅没有使闽楠和红楠的 P_n 降低, 反而使其光合作用明显增强, 因此一定浓度和积累时间内的臭氧能对闽楠和红楠产生明显的促进作用, 超过一定范围后即使是对臭氧具有一定抗性的植物也会受到抑制, 红楠和闽楠在峰值处的 P_n 显著高于对照, 但是两者的促进作用都会随着熏气时间的延长而减弱, 与对照组的差距逐渐缩小, 前期(熏气 10 d)臭氧对红楠的光合作用有显著地促进, 20 d 后作用减弱, 终值与对照已无显著差异; 此外, 臭氧能够促使植物 P_n 峰值出现的时间提前。

(3) 实验发现多数植物(宜昌楠除外)对照组的净光合速率与气孔导度存在显著的正相关关系, 而臭氧处理破坏了这种相关关系, 臭氧处理下各组植物的 Cond 与 P_n 之间不再具有相关性, 但 Cond 和 T_r 之间的正相关关系并未受影响。不能对 P_n 降低的原因笼统地用气孔导度的增大或者减小进行解释, 光合作用减弱还可能由非气孔限制因素导致的。而宜昌楠的两个指标之间并未发现存在这种相关性, 本实验还无法得出确切结论, 需要进一步的研究探索这种相关性在不同植物中是否具有普遍性。

(4) 对 5 种植物的臭氧敏感性进行综合分析,

从光合特性角度发现臭氧抗性最强的是红楠, 其次闽楠, 比较敏感的是宜昌楠、刨花楠和桢楠; 臭氧暴露下 Cond 增加的植物一般其光合作用受到抑制, 如刨花楠和桢楠, 而对于抗性较强的如红楠, 则取决于臭氧浓度和熏气时间, 中低浓度的处理会导致 Cond 增加, 光合作用增强, 但高浓度处理达到一定时间后光合作用则会受到抑制。因此较敏感的植物多数情况下在臭氧暴露下气孔导度是增加的, 气孔导度减小则能够在一定程度上保护植物缓解臭氧伤害, 但不能单从气孔导度的变化来判断植物的臭氧敏感性, 需要综合分析。

参考文献:

- [1] 许宏, 杨景成, 陈圣宾, 等. 植物的臭氧污染胁迫效应研究进展[J]. 植物生态学报, 2007, **31**(6): 1205-1213.
- [2] Fiscus E L, Booker F L, Burkey K O. Crop responses to ozone: uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning [J]. Plant, Cell & Environment, 2005, **28**(8): 997-1011.
- [3] 李秋静, 卢广超, 薛立, 等. 臭氧与干旱交叉胁迫对 3 树种幼苗光合生理的影响[J]. 广东林业科技, 2014, **30**(2): 45-52.
- [4] 李硕, 郑有飞, 吴荣军, 等. 臭氧污染胁迫下植物营养生长及防护研究[J]. 中国农业科技导报, 2014, **16**(1): 117-124.
- [5] 张国友, 何兴元, 唐玲, 等. 高浓度臭氧对蒙古栎叶片酚类物质含量和总抗氧化能力的影响[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(3): 725-728.
- [6] 曹际玲, 朱建国, 曾青, 等. 对流层臭氧浓度升高对植物光合特性影响的研究进展[J]. 生物学杂志, 2012, **64**(1): 66-70.
- [7] 阮亚男, 何兴元, 陈玮, 等. 臭氧浓度升高对油松抗氧化系统活性的影响[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(5): 1032-1037.
- [8] 杨连新, 王余龙, 石广跃, 等. 近地层高臭氧浓度对水稻生长发育影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(4): 901-910.
- [9] Bielenberg D G, Lynch J P, Pell E J. A Decline in nitrogen availability affects plant responses to ozone [J]. New Phytologist, 2001, **151**(2): 413-425.
- [10] 寇太记, 于伟伟, 刘德鸿, 等. 臭氧污染对不同品种小麦养分吸收与分配的影响[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(2): 644-649.
- [11] Ryerson T B, Trainer M, Holloway J S, et al. Observations of ozone formation in power plant plumes and implications for ozone control strategies[J]. Science, 2001, **292**(5517): 719-723.
- [12] Davison A W, Reiling K. A rapid change in ozone resistance of *Plantago major* after summers with high ozone concentrations [J]. New Phytologist, 1995, **131**(3): 337-344.
- [13] 赵天宏, 金东艳, 王岩, 等. 臭氧胁迫对大豆酚类化合物含量和抗氧化能力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, **44**(4): 708-715.

- [14] Noormets A, McDonald E P, Dickson R E, *et al.* The effect of elevated carbon dioxide and ozone on leaf-and branch-level photosynthesis and potential plant-level carbon gain in Aspen [J]. *Trees*, 2001, **15**(5): 262-270.
- [15] 张巍巍. 臭氧浓度升高对银杏与油松活性氧及抗氧化系统的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2007. 32-33.
- [16] 黄爽, 赵天宏, 金东艳, 等. 城市蒙古栎对近地层臭氧浓度升高的光合生理响应[J]. *辽宁林业科技*, 2009, (5): 1-4, 34.
- [17] 白月明, 王春乙, 温民. 大豆对臭氧、二氧化碳及其复合效应的响应[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(3): 545-549.
- [18] Reig-Armiñana J, Calatayud V, Cerveró J. Effects of ozone on the foliar histology of the mastic plant (*Pistacia lentiscus* L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **132**(2): 321-323.
- [19] 郑启伟, 王效科, 冯兆忠, 等. 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[J]. *西北植物学报*, 2005, **25**(11): 2240-2244.
- [20] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, **33**: 317-345.
- [21] 耿春梅, 王宗爽, 任丽红, 等. 大气臭氧浓度升高对农作物产量的影响[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(3): 239-245.
- [22] Krupa S V. Atmospheric ozone: Formation and effects on vegetation [J]. *Environment Pollution*, 1988, **50**(1-2): 101-137.
- [23] 李轩然, 刘琪璟, 蔡哲, 等. 千烟洲针叶林的比叶面积及叶面积指数[J]. *植物生态学报*, 2007, **31**(1): 93-101.
- [24] Akimoto K, Sudo K. Global source attribution of tropospheric ozone: long-range transport from various source regions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2007, **112**(D12), doi: 10.1029/2006JD007992.
- [25] 董文霞, 陈宗懋. 大气臭氧浓度升高对植物及其昆虫的影响[J]. *生态学报*, 2006, **26**(11): 3878-3884.
- [26] 郑有飞, 赵泽, 吴荣军, 等. 臭氧胁迫对冬小麦叶绿素荧光及气体交换的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 472-479.
- [27] 列淦文, 叶龙华, 薛立. 臭氧胁迫对植物主要生理功能的影响[J]. *生态学报*, 2014, **34**(2): 294-306.
- [28] Hassan I A, Ashmore M R, Bell J N B. Effects of O₃ on the stomatal behaviour of Egyptian varieties of radish [J]. *New Phytologist*, 1994, **128**(2): 243-249.
- [29] Novak K, Cherubini P, Saurer M, *et al.* Ozone air pollution effects on tree-ring growth, $\delta^{13}\text{C}$, visible foliar injury and leaf gas exchange in three ozone-sensitive woody plant species[J]. *Tree Physiology*, 2007, **27**(7): 941-949.
- [30] Gryparis A, Forsberg B, Katsouyanni K, *et al.* Acute effects of ozone on mortality from the “air pollution and health A European Approach” Project [J]. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2004, **170**(10): 1080-1087.
- [31] Heath R L. Initial events in injury to plants by air pollutants [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1980, **31**: 395-431.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoextraction of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行