

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

1960~2013年我国霾污染的时空变化 ..... 符传博, 唐家翔, 丹利, 何媛 (3237)

太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 ..... 王璐, 温天雪, 苗红妍, 高文康, 王跃思 (3249)

石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征 ..... 刘景云, 刘子锐, 温天雪, 魏俊龙, 黄小娟, 乔宝文, 王莉莉, 杨洋, 徐仲均, 王跃思 (3258)

南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 ..... 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 夏俊荣, 陆建刚, 刘刚, 杨孟, 李凤英, 盖鑫磊 (3268)

南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 ..... 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺 (3280)

上海崇明地区大气分形态汞污染特征 ..... 李舒, 高伟, 王书肖, 张磊, 李智坚, 王龙, 郝吉明 (3290)

三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量 ..... 王永敏, 赵铮, 孙涛, 王娅, 薛金平, 张成, 王定勇 (3300)

长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析 ..... 吴方堃, 孙杰, 余晔, 唐贵谦, 王跃思 (3308)

铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征 ..... 刘大钧, 汪家权 (3315)

祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究 ..... 贾文雄, 李宗省 (3322)

三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价 ..... 郭威, 殷淑华, 徐建新, 徐东昱, 高丽, 郝红, 高博 (3333)

太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素 ..... 车霏霏, 王大鹏, 甄卓, 颜昌宙, 王灶生 (3340)

太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 ..... 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (3348)

岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析 ..... 张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 徐昕 (3356)

西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例 ..... 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 蓝家程, 张宇 (3365)

不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析 ..... 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 耿若楠 (3375)

滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 ..... 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 余佑金, 丁帅, 王跃杰 (3384)

荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 ..... 黄廷林, 方开凯, 张春华, 周石磊, 曾明正, 刘飞, 夏超, 丛海兵 (3394)

富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析 ..... 张思敏, 李云梅, 王桥, 朱利, 王旭东, 温爽 (3402)

基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例 ..... 安新丽, 陈廷廷, 赵晗, 张又弛, 侯艳伟, 蔡超 (3413)

于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系 ..... 王祖伟, 王玮玮, 侯迎迎, 包姗姗, 王子璐, 王倩倩 (3423)

人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 ..... 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 黄翔峰 (3430)

共生细菌对盐生小球藻富集和转化硝酸盐的影响 ..... 许平平, 刘聪, 王亚, 郑燕恒, 张春华, 葛滢 (3438)

模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响 ..... 王兵, 温春翔, 肖波 (3447)

对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为 ..... 周琦, 蒋煜峰, 孙航, 慕仲锋, 张振国, 展惠英 (3453)

多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究 ..... 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (3460)

某微污染源自来水厂的纳滤深度处理效果研究 ..... 吴玉超, 陈吕军, 兰亚琼, 刘锐 (3466)

Fe<sup>0</sup>-PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制 ..... 卢欣, 李森, 唐翠梅, 辛佳, 林朋飞, 刘翔 (3473)

EDTA-nSiO<sub>2</sub> 纳米颗粒对 Cd<sup>2+</sup> 的吸附 ..... 蒋顺成, 秦睿, 李满林, 李荣华, 张增强, Amjad Ali, 梁文 (3480)

硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征 ..... 沈伟航, 朱能武, 尹富华, 吴平霄, 张彦鸿 (3488)

人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能 ..... 崔蒙蒙, 王殿升, 黄天寅, 刘锋 (3498)

生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能 ..... 牟锐, 沈志强, 周岳溪, 陈学民, 伏小勇, 谭蕾蕾, 瞿畏 (3508)

甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系 ..... 刘东, 张小婷, 张代钧, 曾善文, 卢培利 (3518)

光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制 ..... 胡倩, 阳海, 石妮, 胡乐天, 易兵 (3524)

宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 ..... 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (3532)

北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价 ..... 董捷, 黄莹, 李永霞, 张厚勇, 高甫威 (3540)

红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应 ..... 贾广梅, 马玲玲, 徐殿斗, 成杭新, 周国华, 杨国胜, 罗敏, 路雨楠, 刘志明 (3547)

外源锌刺激水稻对土壤镉的累积效应 ..... 辜娇峰, 杨文骏, 周航, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (3554)

改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应 ..... 杨兰, 李冰, 王昌全, 刘倾城, 张庆沛, 肖瑞, 李一丁 (3562)

生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果 ..... 周普雄, 严颀, 余震, 王跃强, 朱艺, 周顺桂 (3575)

长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响 ..... 赵慧慧, 肖娴, 裴孟, 赵远, 梁玉婷 (3582)

应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响 ..... 曾清苹, 何丙辉 (3590)

三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化 ..... 隋心, 张荣涛, 许楠, 刘赢男, 柴春荣, 王继丰, 付晓玲, 钟海秀, 倪红伟 (3598)

外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 排放的短期影响 ..... 胡敏杰, 任鹏, 黄佳芳, 仝川 (3606)

模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO<sub>2</sub> 通量变化及其影响因素 ..... 杜兰兰, 王志齐, 王蕊, 李如剑, 吴得峰, 赵慢, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (3616)

太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性 ..... 严俊霞, 郝忠, 荆雪雷, 李洪建 (3625)

生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响 ..... 王月玲, 耿增超, 王强, 尚杰, 曹胜磊, 周凤, 李鑫, 刘福义, 张萍 (3634)

氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响 ..... 辛月, 尚博, 陈兴玲, 冯兆忠 (3642)

冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响 ..... 李洪建, 杨艳, 严俊霞 (3650)

堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究 ..... 李丹, 何小松, 席北斗, 高如泰, 张慧, 黄彩红, 党秋玲 (3660)

酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响 ..... 刘寒冰, 杨兵, 薛南冬 (3670)

《环境科学》征订启事 (3517) 《环境科学》征稿简则 (3561) 信息 (3289, 3321, 3422)

# 氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响

辛月<sup>1,2,3</sup>, 尚博<sup>1,2</sup>, 陈兴玲<sup>4</sup>, 冯兆忠<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; 4. 长春市林业科学研究院, 长春 130117)

**摘要:** 基于开顶式气室 臭氧(O<sub>3</sub>)熏蒸装置, 研究了人工模拟氮沉降对 O<sub>3</sub> 胁迫下青杨光合特性的影响. 结果表明, 随着 O<sub>3</sub> 浓度的升高, 净光合速率( $P_n$ )、电子传递速率(ETR)、PS II 反应中心激发能捕获效率( $F'_v/F'_m$ )、光化学猝灭系数(qP)、最大羧化速率( $V_{cmax}$ )和最大电子传递速率( $J_{max}$ )显著降低, 胞间 CO<sub>2</sub> 浓度( $c_i$ )显著升高, 但气孔导度( $G_s$ )变化不显著, 生长季末期生物量也显著下降. 而氮沉降在一定程度上提高了青杨的光合能力以及生物量. 与单一 O<sub>3</sub>、氮沉降相比, 两者交互作用并未显著影响植物光合特性. 该研究结果为应对全球变化背景下青杨的防护提供科学依据.

**关键词:** 臭氧; 氮沉降; 青杨; 光合特性; 生物量

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3642-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.09.048

## Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of *Populus cathayana*

XIN Yue<sup>1,2,3</sup>, SHANG Bo<sup>1,2</sup>, CHEN Xing-ling<sup>4</sup>, FENG Zhao-zhong<sup>1,2,3\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Centre for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 4. Changchun Academy of Forestry, Changchun 130117, China)

**Abstract:** The open top chambers were used to explore the influences of nitrogen deposition on the response of photosynthetic characteristics of *Populus cathayana* to ozone. The results showed that the net photosynthetic rate ( $P_n$ ), apparent electron transport rate (ETR), excitation energy capture efficiency of PS II reaction center ( $F'_v/F'_m$ ), coefficient of photochemical quenching (qP), the maximum of carboxylation efficiency ( $V_{cmax}$ ) and the maximum rate of electron transport ( $J_{max}$ ) were significantly decreased with the increasing O<sub>3</sub> concentration. However, intercellular CO<sub>2</sub> concentration ( $c_i$ ) was significantly increased and stomatal conductance ( $G_s$ ) remained unchanged. There was significant difference in biomass at the end of growing season. However, in a certain extent, nitrogen deposition improved photosynthetic capacity and biomass of *P. cathayana*. The interaction of O<sub>3</sub> and nitrogen deposition was not significant in terms of plant photosynthetic characteristics. The current results provided scientific basis for the protection of *P. cathayana* in response to the global O<sub>3</sub> concentration and nitrogen deposition increase.

**Key words:** ozone; nitrogen deposition; *Populus cathayana*; photosynthetic characteristics; biomass

随着工业化与城市化的快速发展, 人类化石燃料消耗、氮肥使用及汽车尾气排放持续增加, 导致对流层臭氧(O<sub>3</sub>)浓度升高<sup>[1,2]</sup>的同时氮沉降加剧<sup>[3,4]</sup>. 近 30 年来, 全球 O<sub>3</sub> 浓度正以每年 0.5% ~ 2.0% 的速度增加<sup>[5]</sup>. 2015 ~ 2050 年 O<sub>3</sub> 浓度将会继续上升 20% ~ 25%, 至 2100 年将达到 40% ~ 60%<sup>[6]</sup>. 中国 O<sub>3</sub> 污染尤为严重, 华北平原白天小时 O<sub>3</sub> 浓度最大值已超过 300 nmol·mol<sup>-1</sup>, 已经对植物造成伤害<sup>[7]</sup>. 而我国是继欧洲、美国之后的又一氮沉降集中区<sup>[3]</sup>, 其中有些森林生态系统氮沉降已经达到 50 kg·(hm<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>, 远高于 10 ~ 20 kg·(hm<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup> 的森林生态系统氮承载阈值<sup>[8]</sup>, 这将严重影响森林生态系统服务功能及健康<sup>[9]</sup>. 大气

O<sub>3</sub> 浓度和氮沉降的增加将扰乱生态系统的平衡, 已成为重大的全球性环境问题<sup>[6]</sup>.

O<sub>3</sub> 及氮沉降均影响了决定植物生物量的光合生理特性. O<sub>3</sub> 浓度升高会对植物产生氧化伤害, 引起气孔导度下降, 光合速率降低, 生长缓慢, 生产力下降, 从而表现为森林衰退, 农作物减产等<sup>[10~13]</sup>. 而氮沉降在一定范围内可以有效提高植物的光合能力, 提高生长, 增加生物量累积, 但过量则会造成土壤酸化, 营养失衡, 因而氮沉降对森林生态系统结构

收稿日期: 2016-03-25; 修订日期: 2016-04-26

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目; 荒漠与绿洲生态国家重点实验室开放课题项目(G2015-02-02)

作者简介: 辛月(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污染生态学, E-mail: yuexin2013@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: fzz@cees.ac.cn

和功能起到重要作用<sup>[14~16]</sup>。李德军等<sup>[14]</sup>对不同森林树种的研究表明,  $O_3$  和氮沉降交互作用多被分为协同作用与拮抗作用两种。Lippert 等<sup>[15]</sup>发现高氮使得  $O_3$  暴露下挪威云杉的光合作用降低。Pell 等<sup>[16]</sup>研究表明: 适量氮处理下,  $O_3$  降低山杨生物量累积; 当氮过量时, 山杨对  $O_3$  的敏感性降低。但 Watanabe 等<sup>[17]</sup>却未发现氮沉降对  $O_3$  暴露下民枞的生长及光合有显著性影响。因此, 两者的交互作用与树种、 $O_3$  暴露浓度、氮水平以及本身所处的气候环境有关。

杨树(*Populus*)是世界中纬度平原地区木材产量最高、栽培面积最大的速生用材树种之一, 被广泛用于集约栽培, 为提供生物资源和改良环境起到重要作用。我国是杨树产业大国, 天然林面积约 300 万  $hm^2$ , 人工林面积约 700 万  $hm^2$ <sup>[18, 19]</sup>。杨树资源分布、品种数量及其人工林面积都处于世界领先地位, 广泛用于生态防护林和工业用材林。国外关于杨树  $O_3$  敏感性的研究已有相关报道, 高浓度  $O_3$  会导致杨树光合色素含量下降, 光合能力下降, 相对生长速率下降, 生物量累积减少等<sup>[20~22]</sup>。

国内当前  $O_3$  浓度已远远超过了树木生长的受害临界水平<sup>[23]</sup>, 北京地区已超过 70  $nmol \cdot mol^{-1}$ <sup>[24]</sup>, 对杨树已造成了明显的可见伤害<sup>[25]</sup>, 因此对杨树进行  $O_3$  胁迫效应的研究尤为重要。但目前国内关于  $O_3$  与氮沉降共同作用影响的研究只是针对香樟和小麦<sup>[17, 26]</sup>, 未见针对杨树的相关报道。本实验利用开顶式气室(open top chambers, OTCs)对  $O_3$  和氮沉降对杨树光合和生物量方面的影响进行研究, 阐明氮沉降对杨树  $O_3$  敏感性的影响及相应的光合生理生态机制, 以期应对全球背景下  $O_3$  浓度升高与氮沉降加剧对杨树的防护提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设计

该实验区位于北京市昌平区马池口镇种子站(E116°13', N40°19'), 属于大陆性季风气候, 年平均气温 11.8℃, 年降水量 550 mm。采用的是由长春林业科学研究院提供的青杨(*Populus cathayana*)扦插苗。2015 年 5 月将长势较为一致的幼苗统一移入 20 L 的圆形花盆中, 所用土为当地表层土壤, 其中含氮量为 0.9  $g \cdot kg^{-1}$ 。所有幼苗全部移入开顶式气室(OTCs), 以适应气室内环境, 之后进行  $O_3$  熏蒸处理。

OTCs 为高 2.0 m、边长 1.0 m 的正八面柱体,

为减少外界气体对气室内气体的影响, 在柱体顶端增加了一个高 1 m、倾斜角为 45°的收缩口。气室由钢架和钢化玻璃组成。共设置 3 个  $O_3$  水平: CF(过滤大气,  $[O_3] < 40 nmol \cdot mol^{-1}$ )、NF(环境大气  $[O_3]$ )、NF40(环境大气  $[O_3] + 40 nmol \cdot mol^{-1} [O_3]$ ), 每个  $O_3$  水平设 3 个 OTC 重复。每个 OTC 中幼苗随机分为 3 组, 每组至少 5 株, 分别设为空白对照(N0)、施氮 50  $kg \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$ (N50)、施氮 100  $kg \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$ (N100)。以尿素为氮源, 分别在 6 月 24 日、7 月 12 日、7 月 31 日、8 月 20 日、9 月 5 日分为 5 次浇灌于盆内土壤表层, 空白对照浇等体积(100 mL)的自来水。整个实验期间每个氮水平每盆共施加 0 g(N0)、0.445 g(N50)和 0.890 g(N100)。实验期间各个罩子的  $O_3$  浓度由美国热电公司 49i 臭氧分析仪监测,  $O_3$  熏蒸时间为 6 月 5 日至 9 月 8 日。每日熏气时间最长为 11 h(08:00 ~ 19:00), 阴雨天停止熏气。实验期间所有  $O_3$  处理(CF、NF、NF40)的实际监测的平均  $O_3$  浓度和 AOT40(实验期间小时  $O_3$  浓度超过 40  $nmol \cdot mol^{-1}$  的累计值)分别为 34.3、52.1、80.3  $nmol \cdot mol^{-1}$  和 4.4、16.0、38.7  $\mu mol \cdot mol^{-1} \cdot h$ 。实验期间每 3~5 d 将 OTC 内植株随机移动, 以消除气室内部间差异可能引起的影响<sup>[27]</sup>。

### 1.2 指标测定

#### 1.2.1 光合特性指标测定

采用 Li-6400 便携式光合测定仪(美国 LI-COR 公司)在不同生长阶段(8 月 9 日、9 月 5 日)测定叶片的气体交换参数和叶绿素 a 荧光参数。其中气体交换参数包括净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )和胞间  $CO_2$  浓度( $c_i$ ); 叶绿素 a 荧光参数包括: PS II 反应中心激发能捕获效率( $F'_v/F'_m$ )、光化学猝灭系数(qP)、电子传递速率(ETR)。具体测定方法: 晴天上午 09:00 ~ 12:00, 每处理选取 4~5 株作为待测植株, 每株选取 2~3 片中部邻近健康叶片。瞬时光合测定时设定的光强为 1 200  $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$ ,  $CO_2$  浓度为 380  $\mu mol \cdot mol^{-1}$ , 气温控制在环境温度  $\pm 1^\circ C$ , 相对湿度为 45%  $\pm 5\%$ 。9 月 6、7 日两天测定光合速率- $CO_2$  浓度响应曲线通过设定不同  $CO_2$  浓度对应的光合速率进行拟合, 开始测量前, 叶片同样暴露于 1 200  $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$  饱和光强下进行 15~30 min 光诱导, 以使光系统 II 充分开放, 测量期间叶室光强、温湿度与瞬时值测定过程中保持一致。最大羧化速率( $V_{cmax}$ )、最大电子传递速率( $J_{max}$ )根据 Sharkey 等<sup>[28]</sup>的方法拟合确定。

1.2.2 生物量测定

2015年9月中旬,对所有实验幼苗进行收获,以原始扦插枝条分叉处以上1 cm为基准将实验幼苗分为地上、地下部分,对根际吸附的土壤颗粒进行小心清洗.植株各部分于80℃烘箱烘干至恒重,称量并计算植株生物量及地上部分与地下部分生物量比值.

1.3 数据处理及分析

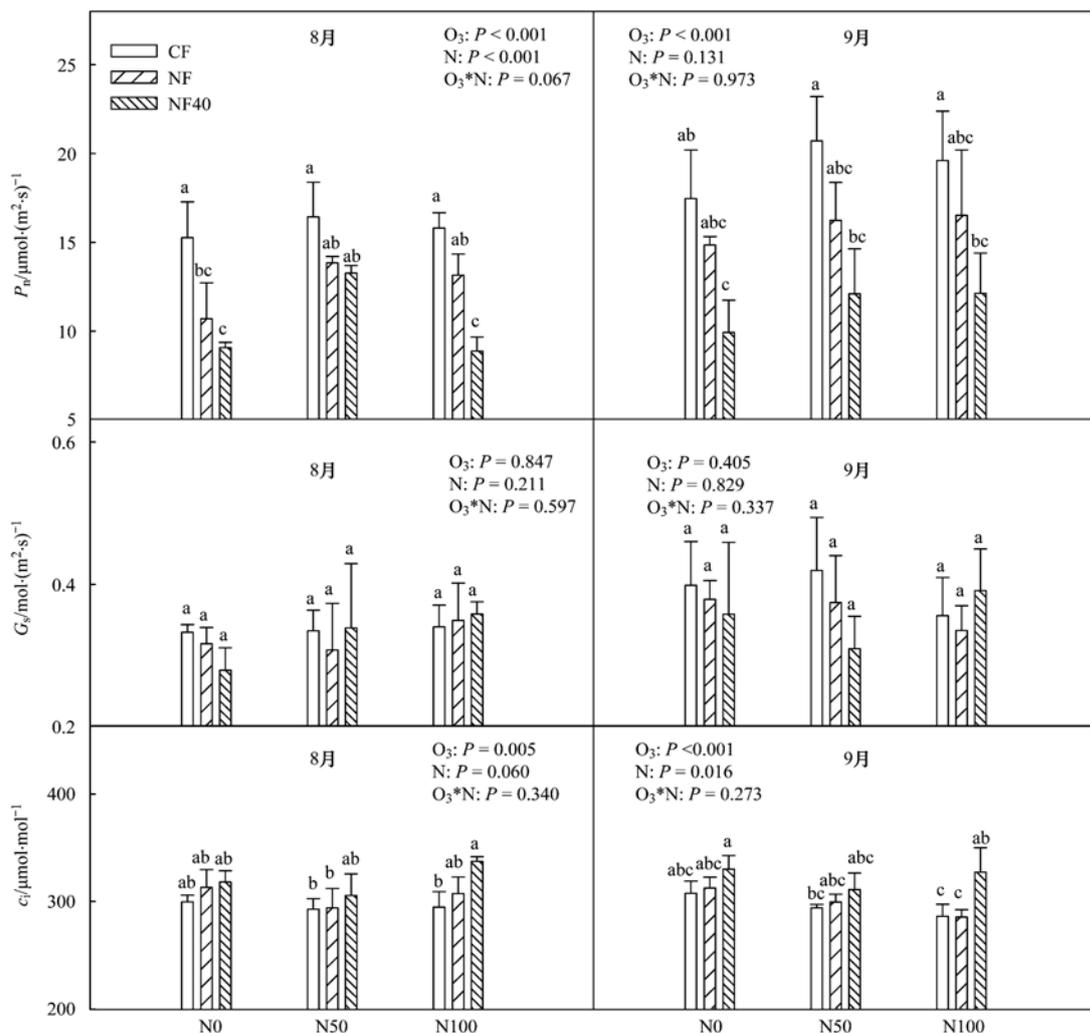
实验数据先用Excel 2010进行初步整理,然后运用JMP 10.0进行双因素方差分析检验O<sub>3</sub>和氮处理的主效应及其交互效应显著性.之后采用Tukey's HSD进行多重比较,进行不同处理之间的显著性结果分析. P≤0.05认为是处理间达到显著性差异.运用Sigmaplot 10.0绘制光合作用特性指标与O<sub>3</sub>和氮的关系图,图中不同字母表示差异显著(P≤0.05).其中O<sub>3</sub>、N、O<sub>3</sub>\*N分别表示臭氧、氮沉降及其两者的交互作用

对各指标影响的统计结果(P值).

2 结果与分析

2.1 臭氧浓度升高和氮沉降对气体交换参数的影响

由图1可知,无论8月还是9月的测量中,O<sub>3</sub>处理显著降低了青杨的净光合速率(P<0.001),与对照相比,两个生长阶段NF40处理下的P<sub>n</sub>分别降低了34.3%和40.9%.随着氮水平的升高,P<sub>n</sub>呈现先升高后降低的趋势.两个生长阶段N50、N100时,P<sub>n</sub>比N0分别升高了24.3%、7.9%(8月)和16.1%、14.2%(9月).而氮处理仅仅在8月起到显著性影响,9月的氮处理并未使P<sub>n</sub>出现显著性差异(P=0.131).8月结果中,O<sub>3</sub>浓度升高至NF40时,N50比N0显著升高了46.3%.而9月只升高了21.9%.由方差分析可知,O<sub>3</sub>和氮对青杨的净光合速率在两次测量时期均未出现显著的交互作用(8



图中 O<sub>3</sub>、N、O<sub>3</sub>\*N 分别表示臭氧、氮沉降及其两者的交互作用对各指标影响的统计结果(P值)

图1 臭氧和氮沉降对青杨叶片气体交换参数的影响

Fig. 1 Effects of elevated O<sub>3</sub> and nitrogen deposition on gas exchange parameters of the *Populus cathayana* leaves

月  $P=0.067$ 、9 月  $P=0.973$ ).

两个生长阶段下,不同  $O_3$  和氮处理对  $G_s$  均没有显著性差异(图1). 但 8 月氮处理下青杨的  $G_s$  呈现上升趋势,而 9 月为下降趋势.  $c_i$  随着  $O_3$  浓度升高呈显著上升趋势( $P<0.01$ ),与对照相比,两个生长阶段 NF40 处理下的  $c_i$  分别升高了 8.3%、9.0%. 氮处理在 9 月才达到显著性差异( $P=0.016$ ),N50 与 N100 影响差异减少,均比 N0 降低了 5%. 由方差分析可知, $O_3$  和氮交互作用对  $G_s$ 、 $c_i$  均没有显著影响. 对  $O_3$  升高条件下青杨气孔损伤的修复作用不显著.

## 2.2 臭氧浓度升高和氮沉降对叶绿素 a 荧光参数的影响

由图 2 可知,两个生长阶段下, $O_3$  处理显著降

低了杨树的  $F_v'/F_m'$ 、ETR 和  $qP$  ( $P<0.01$ ),与对照相比,两个生长阶段 NF40 处理下分别降低了 12.4%、27.2% 和 17.6% (8 月)与 19.6%、40.6% 和 25.5% (9 月). 而两个生长阶段中氮处理仅对  $F_v'/F_m'$  和 ETR 起到显著性差异,且 ETR 达到极显著水平( $P=0.002$ ). 随着氮水平的升高,8 月  $F_v'/F_m'$  和 ETR 均呈现先升高后降低的趋势,与对照相比,N50、N100 分别升高了 9.2%、2.8% 和 19.3%、5.6%. 尽管与对照相比,两个生长阶段 N50、N100 下青杨叶片的  $qP$  分别升高了 10.3%、2.5% (8 月)和 10.1%、11.5% (9 月),但氮处理对在 8、9 月两个生长时期均未出现显著作用(8 月  $P=0.105$ 、9 月  $P=0.171$ ). 随着青杨的不断生长,两种氮处理的差异减小. 由方差分析可知, $O_3$  和氮对青杨的

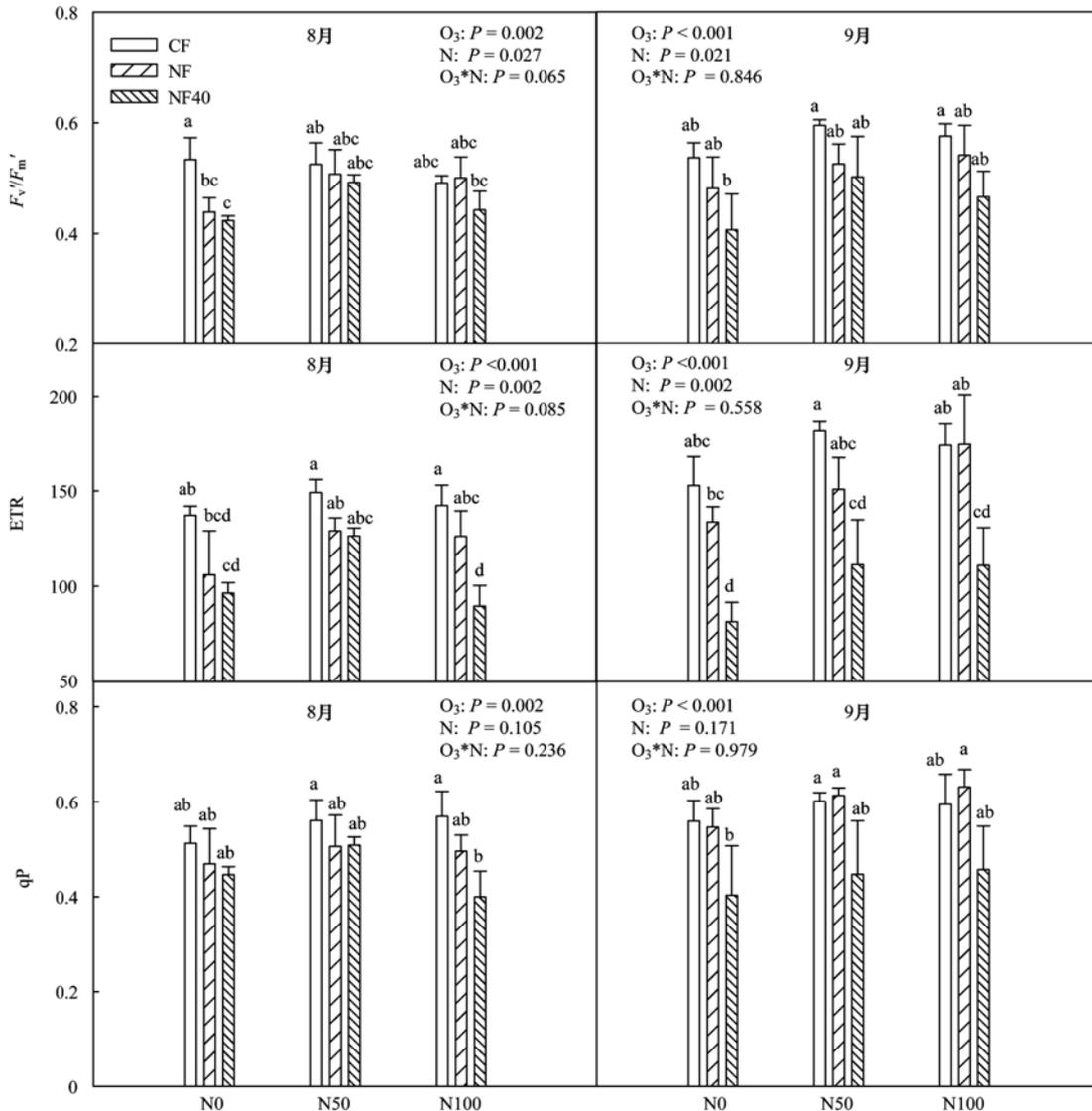


图 2  $O_3$  和氮沉降对青杨叶片叶绿素 a 荧光参数的影响

Fig. 2 Effects of elevated  $O_3$  and nitrogen deposition on chlorophyll a fluorescence parameters of the *Populus cathayana* leaves

$F'_v/F'_m$ 、ETR 和 qP 均未出现显著的交互作用 ( $P > 0.05$ )。

**2.3 臭氧浓度升高和氮沉降对最大羧化速率 ( $V_{cmax}$ ) 与最大电子传递速率 ( $J_{max}$ ) 的影响**

由图 3 可知,9 月不同  $O_3$  和氮处理对最大羧化速率 ( $V_{cmax}$ ) 和最大电子传递速率 ( $J_{max}$ ) 均产生显著性差异 ( $P < 0.001$ )。与对照相比,NF40 处理下的

$V_{cmax}$ 、 $J_{max}$  分别降低了 32.4%、26.4%。随着氮水平的升高, $V_{cmax}$  与  $J_{max}$  呈现先升高后降低的趋势,N50 处理最高,N50、N100 比 N0 分别升高了 36.5%、14.6% ( $V_{cmax}$ ) 与 40.6%、20.9% ( $J_{max}$ )。  $O_3$  和氮对青杨叶片的  $V_{cmax}$ 、 $J_{max}$  产生了显著的交互作用 ( $P = 0.013$ 、 $P = 0.017$ )。  $O_3$  浓度升高至 NF40 时,N50 的  $V_{cmax}$ 、 $J_{max}$  比 N0 显著高 83.3% 和 69.1%。

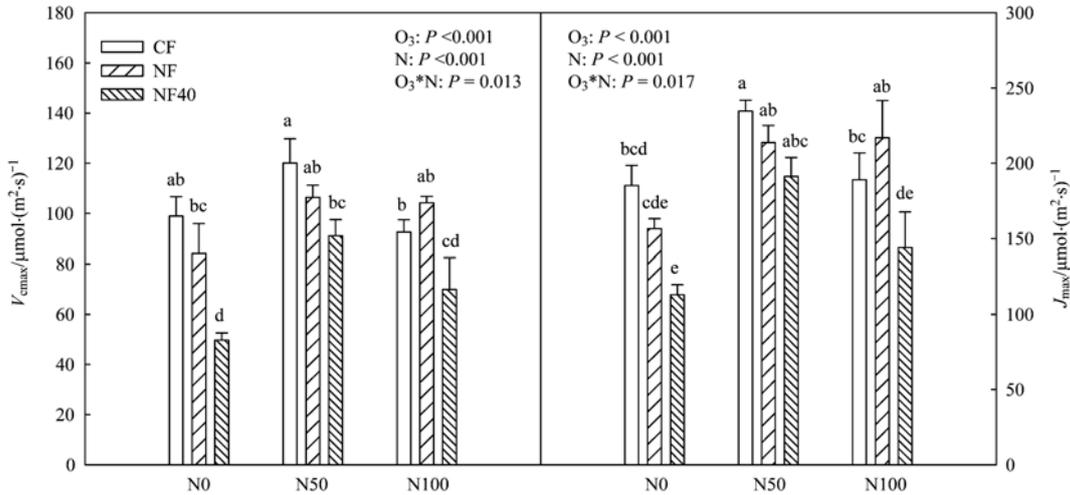


图 3  $O_3$  和氮沉降对青杨叶片最大羧化速率与最大电子传递速率的影响

Fig. 3 Effects of elevated  $O_3$  and nitrogen deposition on the maximum carboxylation efficiency ( $V_{cmax}$ ), the maximum electron transport ( $J_{max}$ ) of the *Populus cathayana* leaves

**2.4 臭氧浓度升高和氮沉降对生物量的影响**

由图 4 可知,不同  $O_3$  处理对总生物量产生显著性影响 ( $P = 0.009$ ),与对照相比,NF40 处理下生物量显著降低了 28.9%。虽然高浓度  $O_3$  使青杨的根冠比升高了 20.6%,但并未产生显著性差异 ( $P = 0.169$ )。不同氮处理对总生物量和根冠比均未产生

显著性差异 ( $P = 0.399$ 、 $P = 0.173$ )。但随着氮水平的升高,总生物量增加,N50 时最高,比 N0 升高了 14.0%。提高氮水平降低青杨根冠比,N50 较对照降低了根冠比 15.6%。而氮水平继续升高到 N100 时,生物量和根冠比变化不大。  $O_3$  和氮对青杨总生物量和根冠比无显著交互作用 ( $P = 0.679$ 、 $P =$

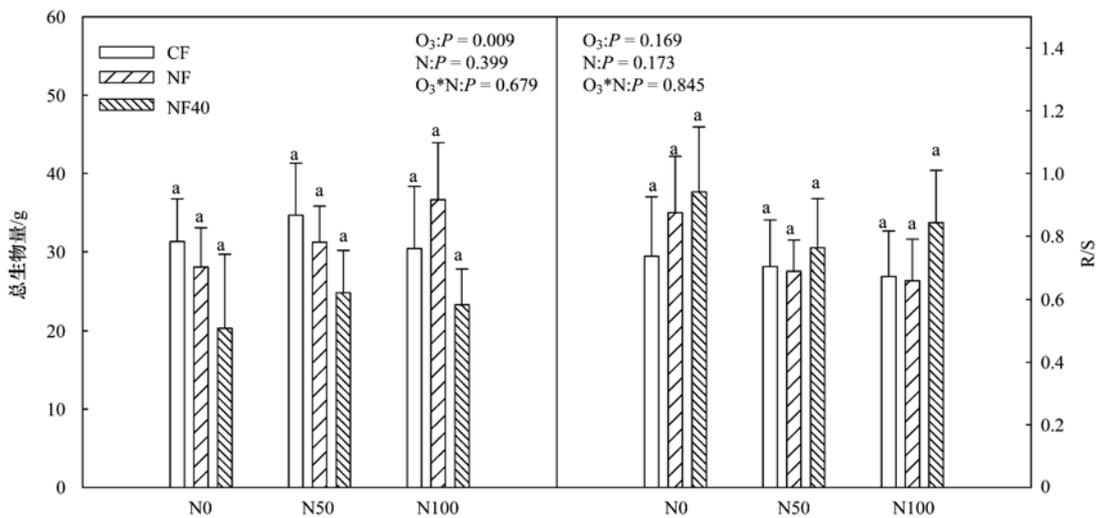


图 4  $O_3$  和氮沉降对青杨总生物量与根冠比的影响

Fig. 4 Effects of elevated  $O_3$  and nitrogen deposition on the total biomass and the root shoot ratio of the *Populus cathayana*

0.845).

### 3 讨论

光合作用是绿色植物积累有机物的重要过程, 是决定植物生物量积累的关键因子. 本研究结果显示高浓度  $O_3$  会降低光合能力, 这与国内外大量研究结果一致, 光合速率降低是植物对  $O_3$  胁迫最普遍的响应之一<sup>[12, 13]</sup>. 从本研究光合特性指标的变化来看, 随着  $O_3$  浓度的升高, 净光合速率 ( $P_n$ )、电子传递速率 (ETR)、PS II 反应中心激发能捕获效率 ( $F'_v/F'_m$ )、光化学猝灭系数 (qP)、最大羧化速率 ( $V_{cmax}$ ) 和最大电子传递速率 ( $J_{max}$ ) 均显著降低, 胞间  $CO_2$  浓度 ( $c_i$ ) 显著升高, 但气孔导度 ( $G_s$ ) 变化不显著. 推断  $O_3$  对光合作用的负效应不是由气孔因素引起的, 而是由非气孔因素主导, 而气孔导度的下降仅仅是对植物  $O_3$  胁迫下光合速率下降、胞间  $CO_2$  浓度升高的一种响应<sup>[29, 30]</sup>. 一方面由于植物膜系统、光合器官的直接氧化损伤、叶绿素含量下降, 另一方面电子传递、能量转化受阻、光系统 II 受损, 最终导致光能捕获能力和利用效率下降. 研究表明, 在一定范围的氮沉降显著促进青杨光合作用, 而当施氮量逐渐提高, 促进作用有所减弱, 这与前人对森林树种的研究一致<sup>[14]</sup>. 因为在一定范围内, 氮沉降增加 Rubisco 的浓度和活性及叶绿素含量, 同时也有利于保护性蛋白和抗氧化物质如抗坏血酸的合成, 从而增加光合速率<sup>[31]</sup>. 而过量的氮沉降会对光合产生负效应, 如本实验中与 N50 相比较, N100 使光合作用有所下降. 这可能是过量氮造成土壤酸化, 植物体内营养失衡<sup>[32, 33]</sup>. 但氮对  $P_n$  的影响在 8 月显著而 9 月不显著, 因为 9 月青杨开始进入衰老期, 整体光合能力下降. 但氮对  $c_i$  的影响则是在 8 月不显著 9 月显著, 与测定当天的光照、温度等气象条件息息相关.

本实验中, 氮沉降虽然使得光合能力明显升高, 但与  $O_3$  两者的交互作用并不显著, 说明它在缓解青杨的  $O_3$  伤害上并未起到显著作用, 这与 Yamaguchi 等<sup>[34]</sup> 对山毛榉的研究结果一致. 由于氮沉降增加使 Rubisco 的浓度和活性增加, 减少  $O_3$  对质膜的损伤, 从而增加光合速率. 而过量氮沉降引起的植物营养失衡在  $O_3$  条件下更为加剧.  $O_3$  会减少氮向可溶性蛋白的分配, 而可溶性蛋白中的重要组分之一就是决定光合作用的 Rubisco 活性, 这种分配的减少在高氮环境下更加明显<sup>[35]</sup>. 另外,  $CO_2$  的同化、 $NO_2^-$  通过亚硝酸还原酶还原为  $NO_3^-$ 、 $NH_4^+$  通过谷

氨酰胺合成酶/谷氨酸合酶转化为氨基酸的过程均需要还原型铁氧还原蛋白 ( $Fd_{red}$ )<sup>[36]</sup>. 通常情况下,  $CO_2$  的同化对  $Fd_{red}$  的亲合力最高, 当  $O_3$  破坏光合组织特别是 Rubisco 的同时, 过量的氮沉降有可能会进一步削弱碳同化对该物质的竞争能力, 从而抵消氮的正效应, 甚至对光合作用起到抑制作用<sup>[37]</sup>.

植物生物量是反映植物生长和生产力的一个重要指标, 会受到植物光合特性变化的影响.  $O_3$  浓度升高的条件下, 光合速率的下降引起同化物的减少, 从而使植物生长受到影响, 生物量降低. Yamaguchi 等<sup>[38]</sup> 利用 OTCs 研究表明, 高浓度  $O_3$  可以降低山毛榉 Rubisco 的浓度和活性、净光合速率, 使得当年生分枝以及叶片的干重降低, 最终减少有机物的累积, 降低生物量. 本研究中  $O_3$  胁迫导致青杨幼苗生物量累积显著降低, 这是由于光合能力下降, 从而减少了有机物的积累. 虽然  $O_3$  对于根冠比未出现显著性影响, 但仍有升高的趋势, 表示  $O_3$  对青杨地上部分生物量积累的抑制效应大于其对地下部分生物量积累的抑制效应. 这是因为  $O_3$  抑制叶片光合作用, 加速叶片早衰, 减少植物地上部分同化产物的积累, 改变了同化产物的分配, 从而造成植物地下部分与地上部分生物量比值升高. 氮沉降量在一定范围内促进植物生物量的增加, 但当氮继续增高到一定水平, 如本实验氮处理从 N50 升至 N100, 氮已达到饱和, 如前所述, 甚至出现抑制作用, 因而造成生物量不再随之升高. 而根冠比也表现出一致性的变化, 这与 Persson 等<sup>[39]</sup> 和 Grulke 等<sup>[40]</sup> 对森林植物的研究结果一致, 该研究进一步证明了氮沉降促进地上部分生长, 但对根系的生长不利. 可能是由于改变了土壤的理化性质, 而土壤的理化性质与根的生长和结构显著相关.

综上, 本实验中氮沉降与  $O_3$  对青杨并没有表现出明显的交互作用, 而类似报道并不少见<sup>[27, 31, 40]</sup>, 推测一方面或许是由于处理时间较短, 另一方面可能的原因是本实验中青杨幼苗在氮沉降超过 N50 时, 氮已达饱和, 对氮响应不再增加.

考虑到实验处理控制、盆栽的根系限制、地理气象等因素, 可能导致本实验所得结果与自然生境实际情况之间存在一定偏差, 因此在全球变化的大背景下, 利用田间试验, 开展青杨  $O_3$  胁迫敏感性的区域性研究显得十分必要.

### 4 结论

(1) 随着  $O_3$  浓度的升高, 青杨幼苗叶片光合作

用受阻,进而导致生物量累积下降,严重抑制了青杨的生长与生产力。

(2)一定范围内的氮沉降对青杨光合作用以及生物量有正效应。但是,过量的氮沉降对光合作用不利,降低植物的生物量累积。

(3)O<sub>3</sub>与氮沉降并未对青杨的光合作用以及生物量产生显著性交互影响,可能与实验处理时间、测定气象条件、树种差异性有关。

(4)本研究所得结果可为我国青杨 O<sub>3</sub> 敏感性评估提供基础数据和理论依据。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Feng Z Z, Paoletti E, Bytnerowicz A, *et al.* Ozone and plants [ J ]. *Environmental Pollution*, 2015, **202**: 215-216.
- [ 2 ] 刘峰, 朱永官, 王效科. 我国地面臭氧污染及其生态环境效应 [ J ]. *生态环境*, 2008, **17**(4): 1674-1679.
- [ 3 ] Holland E A, Dentener F J, Braswell B H, *et al.* Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets [ J ]. *Biogeochemistry*, 1999, **46**(1-3): 7-43.
- [ 4 ] Liu X J, Zhang Y, Han W X, *et al.* Enhanced nitrogen deposition over China [ J ]. *Nature*, 2013, **494**(7438): 459-462.
- [ 5 ] Vingarzan R. A review of surface ozone background levels and trends [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(21): 3431-3442.
- [ 6 ] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [ M ]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [ 7 ] Feng Z Z, Kobayashi K. Assessing the impacts of current and future concentrations of surface ozone on crop yield with meta-analysis. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(8): 1510-1519.
- [ 8 ] Fisher L S, Mays P A, Wylie C L. An overview of nitrogen critical loads for policy makers, stakeholders, and industries in the United States [ J ]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, **179**(1-4): 3-18.
- [ 9 ] Liu X J, Duan L, Mo J M, *et al.* Nitrogen deposition and its ecological impact in China: an overview [ J ]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2251-2264.
- [ 10 ] Feng Z Z, Sun J S, Wan W X, *et al.* Evidence of widespread ozone-induced visible injury on plants in Beijing, China [ J ]. *Environmental Pollution*, 2014, **193**: 296-301.
- [ 11 ] 徐胜, 何兴元, 陈玮, 等. 高浓度 O<sub>3</sub> 对树木生理生态的影响 [ J ]. *生态学报*, 2009, **29**(1): 368-377.
- [ 12 ] 袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 等. 我国北方两地环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响 [ J ]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3128-3134.
- [ 13 ] Feng Z Z, Wang S G, Szantoi Z, *et al.* Protection of plants from ambient ozone by applications of ethylenediurea (EDU): a meta-analytic review [ J ]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(10): 3236-3242.
- [ 14 ] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 氮沉降对森林植物的影响 [ J ]. *生态学报*, 2003, **23**(9): 1891-1900.
- [ 15 ] Lippert M, Häberle K H, Steiner K, *et al.* Interactive effects of elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> on photosynthesis and biomass production of clonal 5-year-old Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] under different nitrogen nutrition and irrigation treatments [ J ]. *Trees*, 1996, **10**(6): 382-392.
- [ 16 ] Pell E J, Sinn P J, Johansen C V. Nitrogen supply as a limiting factor determining the sensitivity of *Populus tremuloides* Michx. to ozone stress [ J ]. *New Phytologist*, 1995, **130**(3): 437-446.
- [ 17 ] Watanabe M, Yamaguchi M, Tabe C, *et al.* Influences of nitrogen load on the growth and photosynthetic responses of *Quercus serrata* seedling to O<sub>3</sub> [ J ]. *Trees*, 2007, **21**(4): 421-432.
- [ 18 ] 方升佐. 中国杨树人工林培育技术研究进展 [ J ]. *应用生态学报*, 2008, **19**(10): 2308-2316.
- [ 19 ] 刘文国, 张旭东, 黄玲玲, 等. 我国杨树生理生态研究进展 [ J ]. *世界林业研究*, 2010, **23**(1): 50-55.
- [ 20 ] Bortier K, De Temmerman L, Ceulemans R. Effects of ozone exposure in open-top chambers on poplar (*Populus nigra*) and beech (*Fagus sylvatica*): a comparison [ J ]. *Environmental Pollution*, 2000, **109**(3): 509-516.
- [ 21 ] Pollastrini M, Desotgiu R, Camin F, *et al.* Severe drought events increase the sensitivity to ozone on poplar clones [ J ]. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, **100**: 94-104.
- [ 22 ] Carriero G, Emiliani G, Giovannelli A, *et al.* Effects of long-term ambient ozone exposure on biomass and wood traits in poplar treated with ethylenediurea (EDU) [ J ]. *Environmental Pollution*, 2015, **206**: 575-581.
- [ 23 ] Wang H, Zhou W Q, Wang X K, *et al.* Ozone uptake by adult urban trees based on sap flow measurement [ J ]. *Environmental Pollution*, 2012, **162**: 275-286.
- [ 24 ] Yuan X Y, Calatayud V, Jiang L J, *et al.* Assessing the effects of ambient ozone in China on snap bean genotypes by using ethylenediurea (EDU) [ J ]. *Environmental Pollution*, 2015, **205**: 199-208.
- [ 25 ] Wan W X, Manning W J, Wang X K, *et al.* Ozone and ozone injury on plants in and around Beijing, China [ J ]. *Environmental Pollution*, 2014, **191**: 215-222.
- [ 26 ] 陈娟, 曾青, 朱建国, 等. 施氮肥缓解臭氧对小麦光合作用和产量的影响 [ J ]. *植物生态学报*, 2011, **35**(5): 523-530.
- [ 27 ] Feng Z Z, Niu J F, Zhang W W, *et al.* Effects of ozone exposure on sub-tropical evergreen *Cinnamomum camphora* seedlings grown in different nitrogen loads [ J ]. *Trees*, 2011, **25**(4): 617-625.
- [ 28 ] Sharkey T D, Bernacchi C J, Farquhar G D, *et al.* Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C<sub>3</sub> leaves [ J ]. *Plant, Cell & Environment*, 2007, **30**(9): 1035-1040.
- [ 29 ] Bussotti F, Desotgiu R, Cascio C, *et al.* Ozone stress in woody plants assessed with chlorophyll a fluorescence. A critical reassessment of existing data [ J ]. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, **73**: 19-30.
- [ 30 ] Calatayud A, Iglesias D J, Talón M, *et al.* Effects of long-term ozone exposure on citrus: chlorophyll a fluorescence and gas exchange [ J ]. *Photosynthetica*, 2006, **44**(4): 548-554.
- [ 31 ] Bassin S, Werner R A, Sörgel K, *et al.* Effects of combined ozone and nitrogen deposition on the in situ properties of eleven key plant species of a subalpine pasture [ J ]. *Oecologia*, 2009, **158**(4): 747-756.
- [ 32 ] Nakaji T, Fukami M, Dokiya Y, *et al.* Effects of high nitrogen

- load on growth, photosynthesis and nutrient status of *Cryptomeria japonica* and *Pinus densiflora* seedlings [J]. *Trees*, 2001, **15** (8): 453-461.
- [33] Nakaji T, Takenaga S, Kuroha M, *et al.* Photosynthetic response of *Pinus densiflora* seedlings to high nitrogen load [J]. *Environmental Sciences*, 2002, **9**(4): 269-282.
- [34] Yamaguchi M, Watanabe M, Matsuo N, *et al.* Effects of nitrogen supply on the sensitivity to O<sub>3</sub> of growth and photosynthesis of Japanese beech (*Fagus crenata*) seedlings [J]. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2007, **7**(1-3): 131-136.
- [35] Yamaguchi M, Watanabe M, Matsumura H, *et al.* Effects of ozone on nitrogen metabolism in the leaves of *Fagus crenata* seedlings under different soil nitrogen loads [J]. *Trees*, 2010, **24** (1): 175-184.
- [36] Bloom A J, Burger M, Asensio J S R, *et al.* Carbon dioxide enrichment inhibits nitrate assimilation in wheat and *Arabidopsis* [J]. *Science*, 2010, **328**(5980): 899-903.
- [37] Nakaji T, Izuta T. Effects of ozone and/or excess soil nitrogen on growth, needle gas exchange rates and Rubisco contents of *Pinus densiflora* seedlings [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, **130**(1-4): 971-976.
- [38] Yamaguchi M, Watanabe M, Iwasaki M, *et al.* Growth and photosynthetic responses of *Fagus crenata* seedlings to O<sub>3</sub> under different nitrogen loads [J]. *Trees*, 2007, **21**(6): 707-718.
- [39] Persson H, Ahlström K, Clemensson-Lindell A. Nitrogen addition and removal at Gårdsjön-effects on fine-root growth and fine-root chemistry [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, **101**(1-3): 199-205.
- [40] Grulke N E, Andersen C P, Fenn M E, *et al.* Ozone exposure and nitrogen deposition lowers root biomass of ponderosa pine in the San Bernardino Mountains, California [J]. *Environmental Pollution*, 1998, **103**(1): 63-73.

## CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013 .....	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i>	(3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi .....	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i>	(3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang .....	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i>	(3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing .....	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i>	(3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing .....	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai .....	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i>	(3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir .....	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i>	(3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station .....	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i>	(3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter .....	LIU Da-jun, WANG Jia-quan	(3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains .....	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing	(3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section) .....	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i>	(3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors .....	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i>	(3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake .....	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i>	(3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System .....	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i>	(3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing .....	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i>	(3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply .....	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i>	(3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release .....	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i>	(3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC .....	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i>	(3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water .....	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i>	(3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI) .....	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i>	(3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir .....	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i>	(3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater .....	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i>	(3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i> .....	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i>	(3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment .....	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo	(3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou .....	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i>	(3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process .....	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i>	(3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource .....	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i>	(3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe <sup>0</sup> -PRB Systems .....	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i>	(3473)
Adsorption Cd <sup>2+</sup> from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles .....	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i>	(3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPY/AQDS in Microbial Fuel Cells .....	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i>	(3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrhydrite .....	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment .....	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i>	(3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR) .....	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i>	(3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin .....	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i>	(3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils .....	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping	(3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China .....	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i>	(3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile .....	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i>	(3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice .....	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i>	(3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination .....	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>	(3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil .....	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i>	(3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils .....	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i>	(3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing .....	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui	(3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain .....	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i>	(3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH <sub>4</sub> and CO <sub>2</sub> Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary .....	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(3606)
Variation of Soil CO <sub>2</sub> Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment .....	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jimci Region of Taiyuan City .....	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i>	(3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil .....	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i> .....	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i>	(3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin .....	LI Hong-juan, YANG Yan, YAN Jun-xia	(3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process .....	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i>	(3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene .....	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong	(3670)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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  
赵进才 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)

2016年9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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