

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

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

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 排放测量	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子轲, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)
黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合	陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)
沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)
南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析	秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)
太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征	曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)
2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)
机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成	袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)
DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响	楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)
紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附	李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)
三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征	江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)
三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)
高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例	孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)
不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应	季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)
丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估	赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)
滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价	王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)
粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险	阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)
鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应	刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)
周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响	贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)
溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响	王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)
微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响	李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)
城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响	唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)
两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究	孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)
巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II)	谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)
改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征	唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)
UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性	任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)
对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究	王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)
高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性	牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)
硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响	周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)
单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)
钛盐混凝剂调对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制	王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)
城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律	孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)
低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析	信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆峰 (2259)
微丝菌 (<i>Microthrix parvicella</i>) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化	王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)
基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响	吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)
1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性	黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)
长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)
有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响	张名豪, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)
生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响	张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘恩新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)
多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源	孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)
苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征	陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)
河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)
杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价	龚梦丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)
土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力	田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)
添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响	陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)
应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响	尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)
不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系	辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)
花胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响	潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚阗, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)
维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化	徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)
苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素	许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)
g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO	张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)
海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价	耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)
《环境科学》征订启事 (2130) 《环境科学》征稿简则 (2251) 信息 (2178, 2344)	

不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系

辛月^{1,2,3}, 高峰^{1,2}, 冯兆忠^{1,2,3*}

(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 101408; 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)

摘要: 采用开顶式气室装置研究不同臭氧浓度对 3 种基因型杨树(‘546’、‘90’和‘84K’)光合作用特征的影响. 结果表明, 随着 O₃ 浓度的升高, 净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、水分利用效率(WUE)、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)、PS II 实际光化学量子效率(PhiPS2)、叶绿素 a(Chla)、叶绿素 b(Chlb)、叶绿素总量(Chla + b)和类胡萝卜素(Car)均显著降低, 胞间 CO₂ 浓度(c_i)显著升高, 气孔导度(G_s)变化不显著. 不同基因型杨树各项光合生理指标之间均存在显著性差异, 基因型‘546’各项光合指标(除 G_s 外)与 O₃ 剂量(AOT40, 小时 O₃ 浓度大于 40 nmol·mol⁻¹ 的累计值)间具有显著的线性相关关系($P < 0.01$), 并且光合色素含量随着 O₃ 浓度的升高而显著降低. 但高浓度 O₃ 对基因型‘90’和‘84K’光合色素影响不显著. 从多数光合特征指标特别是叶绿素总量的 O₃ 剂量线性响应关系来看, 基因型‘546’表现出最大的斜率, 基因型‘90’次之, 基因型‘84K’斜率最小, 因而可得知随着 O₃ 浓度升高, 三者的臭氧敏感性为‘546’>‘90’>‘84K’. 该研究结果为 O₃ 污染环境杨树基因型筛选与培育, 以及保护杨树免受 O₃ 伤害提供科学依据.

关键词: 基因型; 杨树; 臭氧; 剂量; 光合特征; 线性关系

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2359-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.06.046

Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar

XIN Yue^{1,2,3}, GAO Feng^{1,2}, FENG Zhao-zhong^{1,2,3*}

(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 101408, China; 3. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: The open top chambers were used to explore the photosynthetic characteristics of three genotypes of poplar (‘546’, ‘90’ and ‘84K’) in response to different ozone exposures. The results showed that net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), water use efficiency (WUE), apparent electron transport rate (ETR), excitation energy capture efficiency of PS II reaction center (F'_v/F'_m), coefficient of photochemical quenching (qP), actual photochemical efficiency of PS II in the light (PhiPS2), chlorophyll a (Chla), chlorophyll b (Chlb), total chlorophyll (Chla + b) and carotenoid (Car) contents were significantly decreased with the increasing ozone concentrations. However, intercellular CO₂ concentration (c_i) was significantly increased and stomatal conductance (G_s) remained unchanged. There was significant difference in photosynthetic characteristics among three genotypes of poplar. The genotype ‘546’ showed a significant linear correlation ($P < 0.01$) between photosynthetic parameters (except G_s) and the ozone dose index AOT40 (accumulated hourly O₃ concentration over a threshold of 40 nmol · mol⁻¹ during daylight hours). Among the three genotypes of poplar, photosynthesis pigments contents in ‘546’ significantly declined with the increase of ozone concentration but not in ‘90’ and ‘84K’. According to the linear relationship of most photosynthetic parameters and AOT40, especially the total chlorophyll, ‘546’ showed the maximum slope, follows by ‘90’ and then ‘84K’. So the order of the ozone sensitivity of three poplar genotypes was ‘546’ > ‘90’ > ‘84K’. The results of this study can provide an important basis for breeding ozone resistant genotype of poplar as well as protecting poplar from ozone damage.

Key words: genotype; poplar; ozone; dose; photosynthetic characteristics; linear relationship

地表臭氧(O₃)是一种普遍存在的光化学二次污染物和温室气体^[1]. 随着工业化与城市化的快速发展,化石燃料消耗持续增加、氮肥大量使用以及汽车尾气排放急剧增加,从而导致O₃浓度随氮氧化合物及挥发性有机化合物(VOCs)等含量增加而升高^[2-4]. 近30年来,全球O₃浓度正以每年0.5%~2.0%的速度上升^[5]. 根据IPCC第五次评估报告^[6]

显示,2015~2050年O₃浓度将会继续上升20%~25%,如果当前排放的前体物浓度不能得到有效控

收稿日期: 2015-12-23; 修订日期: 2016-02-01

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

制,到2100年 O_3 浓度将继续上升40%~60%。而我国 O_3 污染更为严重,特别是在经济发展迅速、人口密集的地区。研究表明,我国华北平原白天小时 O_3 浓度最大值已超过 $300\text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ^[7],模型预测可知,至2020年夏季,中东部 O_3 浓度小时平均值可达到 $70\text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$,华北平原甚至达到 $80\sim 105\text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ^[8]。

高浓度 O_3 能对植物产生氧化伤害,引起光合速率下降,生长缓慢,生产力下降,进而影响土壤微生物以及酶活性,影响营养元素吸收及其在植物体内的分配,从而表现为森林衰退,农作物减产^[9~14]。光合作用是植物对 O_3 浓度升高较为敏感的生理过程。Wittig等^[15]发现工业革命后随着 O_3 浓度升高,树木叶片的光合速率与气孔导度分别下降11%和13%。高浓度 O_3 引起的光合速率降低,多归因于气孔和非气孔限制的共同作用。气孔是 O_3 进入植物并引起毒害作用的重要途径,气孔的关闭可减少进入到质外体的 O_3 通量,同时也会降低 CO_2 的进入,从而降低光合作用^[16]。也有研究认为, O_3 可直接作用于叶绿体,使光合能力下降,成为限制光合作用的非气孔因素^[17~21],其中包括RUBP羧化和再生限制,植物体内 O_3 生成的活性氧自由基引发的光合器官结构与功能的破坏,以及细胞内物质和能量代谢的失调等。

杨树是地球中纬度平原地区栽培面积最大的速生用材之一,具有生长快、成林早、产量高和易于更新等特点,因而被广泛用于集约栽培。我国具有丰富的杨树资源,天然种有50多种,广泛用于生态防护林和工业用材林。天然林面积约300万 hm^2 ,人工林面积约700万 hm^2 ^[22,23]。杨树产业的发展,不仅有效缓解了中国用材供应的紧张状况,改善了我国森林资源结构,而且优化了农村产业结构,促进了广大农民增收。但是,杨树对 O_3 极为敏感,随着 O_3 浓度的升高,会造成生长速率减慢,光合作用降低,生物量累积减少等^[24~27]。而国内当前 O_3 浓度特别是北京地区已远远超过了树木生长的受害临界水平^[28,29],对杨树造成了明显的可见伤害^[30],从而进行 O_3 对其生长以及生理影响的研究尤为重要。

当前, O_3 对植物伤害的定量关系大多是建立在生长末期生物量以及产量的减少、可见伤害症状与生长季累积的 O_3 浓度之间得到的^[31~34],而根据生理指标进行敏感性评价及相应的 O_3 剂量关系研究

尚少^[35,36]。考虑到树木生长缓慢,生长末期收获生物量在实际生产过程中很难实现,因此,本研究根据不同 O_3 处理下的3种杨树光合生理指标的响应,建立 O_3 浓度与光合指标的剂量关系,以期对大气 O_3 污染下杨树基因型筛选培育及保护杨树免受 O_3 伤害提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验区概况

该实验区位于北京市昌平区马池口镇种子站($E116^{\circ}13'$, $N40^{\circ}19'$),属于大陆性季风气候,年降水量550 mm,年平均气温 11.8°C ,夏季平均气温 $24\sim 26^{\circ}\text{C}$,年平均日照时数在2000~2800 h之间,全年无霜期180~200 d。

1.2 实验设计

该实验采用中国林业科学研究院提供的3种不同基因型杨树(*Populus*)幼苗:‘84 K’(*Populus abla* × *P. glandulosa*),‘546’(*P. deltoids* cv. ‘55/56’ × *P. deltoides* cv. ‘Imperial’)和‘90’(*P. deltoids* × *P. cathayana* cv. Senhai 2)。2014年4月将长势较为一致的幼苗统一移入20 L的圆形花盆中,并全部移入开顶式气室,以适应气室内环境,10 d后进行 O_3 熏蒸处理。

本实验在6个开顶式气室(OTC)中进行,OTC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。实验处理共设置6个水平:CF(过滤大气, $[O_3] < 40\text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$)、NF(环境大气 $[O_3]$)、NF20(NF + $20\text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1} [O_3]$)、NF40(NF + $40\text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1} [O_3]$)、NF60(NF + $60\text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1} [O_3]$)、NF80(NF + $80\text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1} [O_3]$)。每个气室内每种树至少5株幼苗,并随机分布。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。每月将幼苗在OTC之间随机互换,同时相应OTC更换为植物之前对应的 O_3 熏蒸浓度,以消除罩子间的小气候差异带来的影响^[18]。

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5月7日至9月29日。每日熏气时间最长为9 h(08:30~17:30),阴雨天停止熏气。所有 O_3 处理的目标熏蒸浓度与实际监测的平均 O_3 浓度(24、12和8 h)和

AOT40(实验期间小时 O₃ 浓度超过 40 nmol·mol⁻¹ 的累计值)详见表 1.

表 1 2014 年 5 月 7 日至 9 月 29 日实验期间 O₃ 浓度
Table 1 O₃ concentrations during the
experiments from May 7 to Sep. 29, 2014

目标	24 h 平均 /nmol·mol ⁻¹	12 h 平均 /nmol·mol ⁻¹	8 h 平均 /nmol·mol ⁻¹	AOT40 /μmol·mol ⁻¹ ·h
CF	25.7	28.1	28.0	15.1
NF	35.7	48.4	53.2	33.5
NF20	41.4	59.4	67.1	48.9
NF40	46.3	69.4	79.5	64.6
NF60	52.8	81.9	95.4	86.7
NF80	58.1	92.4	108.7	105.2

1.3 指标测定

1.3.1 气体交换参数和叶绿素 a 荧光参数

采用 Li-6400 便携式光合测定仪(美国 LI-COR 公司)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)、蒸腾速率(T_r)和胞间 CO₂ 浓度(c_i); 叶绿素 a 荧光参数包括: 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)、PS II 实际光化学量子效率(PhiPS2). 具体测定方法: 晴天上午 09:00 ~ 11:00, 每处理每基因型选取 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 μmol·(m²·s)⁻¹, CO₂ 浓度为 380 μmol·mol⁻¹, 空气流速为 0.5 L·s⁻¹, 气温控制在环境温度 ± 1℃, 相对湿度为 45% ± 5%. 叶片的瞬时水分利用效率(WUE)由叶片的 P_n/T_r 计算得到.

1.3.2 光合色素含量测定

用 0.36 cm² 的打孔器将测定光合作用的叶片打孔 2 片, 用体积分数为 95% 的乙醇提取, 分别于 664、649 与 470 nm 处测定吸光度, 根据 Lichtenthaler^[37] 的修正公式计算叶绿素 a(Chla)、叶绿素 b(Chlb)、叶绿素总量(Chla + b)和类胡萝卜素(Car)含量.

1.4 数据处理及分析

实验数据先用 Excel 2010 进行初步整理, 然后

在 SPSS 19.0 进行双因素方差分析, 采用 Duncan 法进行多重比较, 进行不同处理之间的显著性结果分析, 检验 O₃、基因型以及两者之间的交互作用对各指标的影响. $P \leq 0.05$ 认为是处理间达到显著性差异. 运用 Sigmaplot 10.0 绘制光合作用特征指标与 AOT40 的线性关系图, 并用 Spearman's 相关关系检验线性关系的显著性.

2 结果与分析

2.1 O₃ 浓度升高对气体交换参数的影响

双因素方差分析结果表明, O₃ 处理显著影响了杨树的 P_n 、 c_i 、 T_r 和 WUE, 对 G_s 影响不显著($P = 0.511$); 不同基因型杨树之间的各个参数均有显著性差异; 而不同基因型杨树对 O₃ 的响应是一致的, 因此表现出交互作用不显著(表 2). 具体来讲, 随着 O₃ 浓度的升高, 3 种基因型杨树的 P_n 均呈显著的线性下降趋势($P < 0.01$), 其下降斜率分别为 -0.121 ('546'), -0.104 ('90') 和 -0.105 ('84K') [表 3 和图 1(a)]. 与 CF 相比, NF80 处理下 '546'、'90' 和 '84K' 的 P_n 分别降低 75%、69% 和 72%. 相反, 3 种基因型杨树 c_i 随着 O₃ 浓度升高呈显著上升趋势($P < 0.05$) [图 1(c)], 但多重比较的结果表明不同 O₃ 处理下各基因型杨树 c_i 无显著差异(表 2). 不同 O₃ 处理下, 基因型 '84K' 的 G_s 和 T_r 呈显著线性下降趋势($P < 0.01$) [表 3、图 1(b) 和 1(d)], 但多重比较结果显示不同 O₃ 处理对 3 种基因型杨树 G_s 和 T_r 的影响不显著(表 2). 随着 O₃ 浓度的升高, 3 种杨树 WUE 均呈线性下降($P < 0.05$), 从响应的斜率得出 '546' 比 '90' 和 '84K' 对 O₃ 浓度升高更为敏感(表 3 和图 2). 其中, 与 CF 相比, 3 种基因型杨树 NF80 处理的 WUE 显著降低 62% (表 4 和图 2). 总的来看, O₃ 对 '546' 的气体交换参数的影响要显著大于 '90' 和 '84K' (表 5).

2.2 O₃ 浓度升高对叶绿素 a 荧光参数的影响

双因素方差分析结果显示, O₃ 处理和不同基因型杨树间的 F'_v/F'_m 、PhiPS2、qP 和 ETR 均有极显著差异($P < 0.01$), 但 O₃ 与杨树的交互作用对叶绿素

表 2 O₃ 与基因型及其交互作用对杨树叶片气体交换、叶绿素 a 荧光参数和光合色素的双因素方差分析结果

Table 2 The P values of two-way ANOVA of O₃ treatments, genotypes and their interactions
on the gas exchange, chlorophyll a fluorescence and photosynthetic pigments of poplar

项目	P_n	G_s	c_i	T_r	WUE	F'_v/F'_m	PhiPS2	qP	ETR	Chla	Chlb	Chla + b	Car
O ₃	<0.001	0.511	<0.001	0.011	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
genotypes	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001
O ₃ × genotypes	0.063	0.939	0.907	0.424	0.902	0.647	0.261	0.400	0.262	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

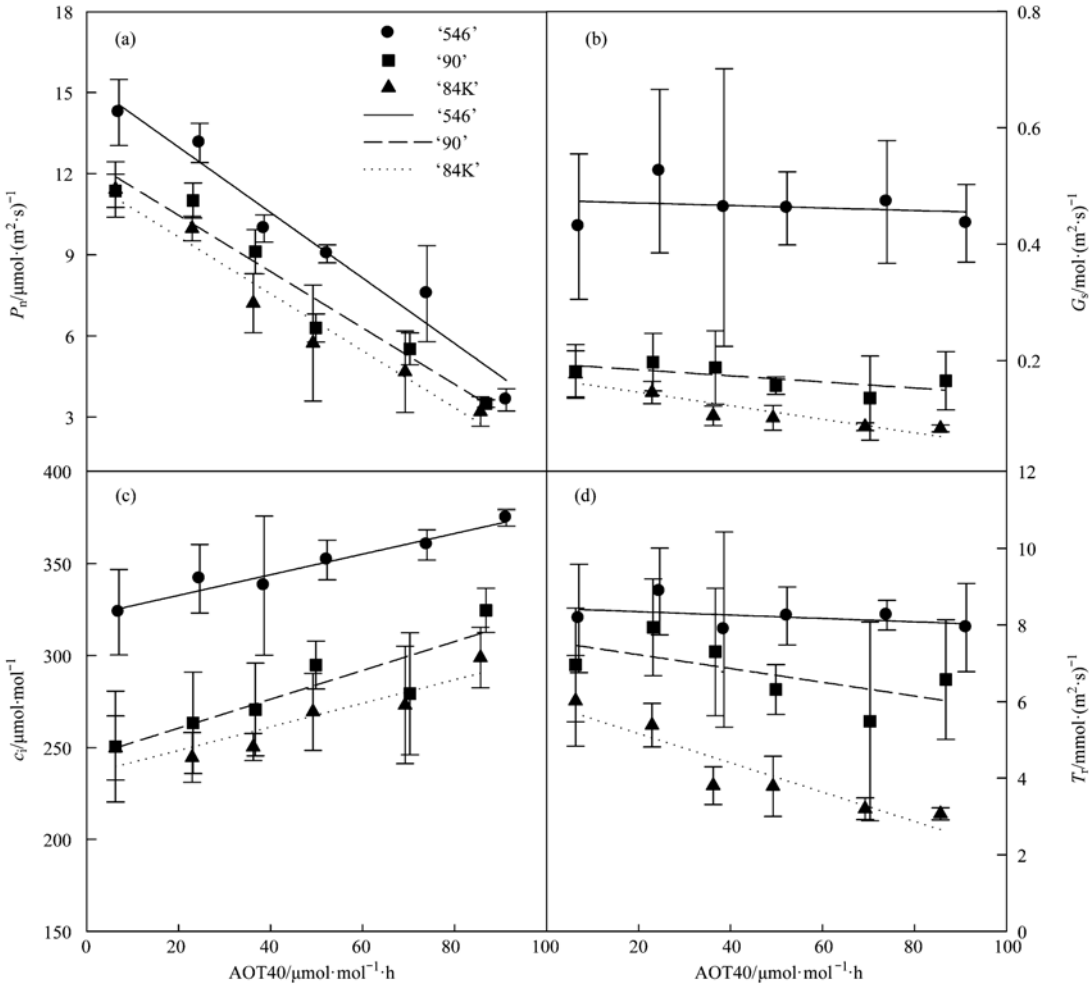


图 1 不同 O₃ 处理下 3 种基因型杨树气体交换参数变化

Fig. 1 Changes of gas exchange parameters of three poplar genotypes in different O₃ treatments

表 3 不同 O₃ 处理下 3 种基因型杨树气体交换参数、叶绿素 a 荧光参数和光合色素与 AOT40 的线性关系

Table 3 Linear equations between AOT40 and gas exchange, chlorophyll a fluorescence and photosynthetic pigments of three poplar genotypes of poplar in different O₃ treatments

项目	'546'				'90'				'84K'			
	方程	R ²	P	方程	R ²	P	方程	R ²	P	方程	R ²	P
P _n	Y = -0.121 0[AOT40] + 15.4	0.961	<0.001	Y = -0.104 1[AOT40] + 12.5	0.953	<0.001	Y = -0.105 2[AOT40] + 11.8	0.960	<0.001			
G _s	Y = -0.000 2[AOT40] + 0.5	0.039	0.707	Y = -0.000 5[AOT40] + 0.2	0.473	0.131	Y = -0.001 2[AOT40] + 0.2	0.851	0.009			
c _i	Y = 0.560 4[AOT40] + 321.5	0.948	0.001	Y = 0.784 5[AOT40] + 244.8	0.799	0.016	Y = 0.639 8[AOT40] + 235.6	0.843	0.010			
T _r	Y = -0.004 4[AOT40] + 8.4	0.151	0.447	Y = -0.018 0[AOT40] + 7.6	0.401	0.177	Y = -0.038 2[AOT40] + 5.9	0.862	0.008			
WUE	Y = -0.014 9[AOT40] + 1.9	0.989	<0.001	Y = -0.011 8[AOT40] + 1.7	0.915	0.011	Y = -0.010 9[AOT40] + 2.1	0.928	0.008			
F _v ' / F _m '	Y = -0.002 2[AOT40] + 0.5	0.975	<0.001	Y = -0.001 8[AOT40] + 0.4	0.839	0.010	Y = -0.001 9[AOT40] + 0.4	0.994	<0.001			
PhiPS2	Y = -0.002 0[AOT40] + 0.3	0.992	<0.001	Y = -0.001 9[AOT40] + 0.3	0.814	0.014	Y = -0.001 6[AOT40] + 0.2	0.975	<0.001			
qP	Y = -0.002 8[AOT40] + 0.6	0.989	<0.001	Y = -0.003 0[AOT40] + 0.7	0.768	0.022	Y = -0.002 6[AOT40] + 0.5	0.950	<0.001			
ETR	Y = -1.032 1[AOT40] + 142.8	0.992	<0.001	Y = -0.991 7[AOT40] + 139.3	0.814	0.014	Y = -0.821 5[AOT40] + 104.8	0.975	<0.001			
Chla	Y = -0.172 9[AOT40] + 18.4	0.943	0.001	Y = -0.049 9[AOT40] + 13.6	0.392	0.184	Y = -0.014 0[AOT40] + 7.6	0.047	0.680			
Chlb	Y = -0.065 4[AOT40] + 6.8	0.953	<0.001	Y = -0.017 0[AOT40] + 4.8	0.421	0.163	Y = -0.003 2[AOT40] + 2.9	0.018	0.801			
Chla + b	Y = -0.238 2[AOT40] + 25.2	0.946	0.001	Y = -0.066 9[AOT40] + 18.4	0.399	0.178	Y = -0.017 1[AOT40] + 10.5	0.038	0.710			
Car	Y = -0.036 0[AOT40] + 4.9	0.922	0.002	Y = -0.008 0[AOT40] + 3.7	0.207	0.364	Y = -0.004 8[AOT40] + 2.4	0.086	0.574			

a 荧光参数无显著影响 ($P > 0.05$, 表 2). 随着 O₃ 浓度升高, 3 种基因型杨树的 F_v'/F_m' 、PhiPS2、qP 和

ETR 呈线性降低趋势 ($P < 0.05$, 图 3). 与 CF 相比, NF40 处理下 '546' 和 '90' 的 F_v'/F_m' 、PhiPS2 和

ETR 显著下降, 分别降低 19% 与 26%, 34% 与 41%, 34% 与 41%; 相比之下, qP 分别在 NF60 (‘546’) 和 NF80 (‘90’) 较 CF 显著降低. 而 ‘84K’ 则与 ‘546’ 和 ‘90’ 差异较大, 其 F_v'/F_m' 在

NF20, PhiPS2、qP 和 ETR 在 NF60 下与 CF 相比有显著下降. 从不同基因型的叶绿素 a 荧光参数响应程度来看, ‘84K’ 要小于 ‘546’ 和 ‘90’, 但 3 种基因型杨树对 O_3 的响应是一致的(图 3 和表 5).

表 4 不同 O_3 处理下杨树气体交换参数、叶绿素 a 荧光参数的差异比较统计结果¹⁾

Table 4 Results of multiple comparisons of gas exchange, chlorophyll a fluorescence of Poplar in different O_3 treatments due to no significant interaction between O_3 and Poplar genotypes

项目	P_n	G_s	c_i	T_r	WUE	F_v'/F_m'	PhiPS2	qP	ETR
CF	a	a	c	ab	a	a	a	a	a
NF	a	a	bc	a	a	a	a	a	a
NF20	b	a	bc	ab	ab	a	a	ab	a
NF40	c	a	b	ab	b	b	b	bc	b
NF60	c	a	b	b	b	bc	bc	cd	bc
NF80	d	a	a	ab	c	c	c	d	c

1) 不同字母表示显著性差异 $P < 0.05$, 下同

表 5 全部 O_3 处理下 3 种基因型杨树的气体交换参数、叶绿素 a 荧光参数和叶绿素的差异比较统计结果

Table 5 Results of multiple comparisons of gas exchange, chlorophyll a fluorescence and chlorophyll contents of three poplar genotypes across O_3 treatments due to no significant interaction between O_3 and Poplar genotypes

Genotypes 基因型	P_n	G_s	c_i	T_r	WUE	F_v'/F_m'	PhiPS2	qP	ETR
‘546’	a	a	a	a	b	a	a	b	a
‘90’	b	b	b	b	b	b	a	a	a
‘84K’	c	b	c	c	a	c	b	c	b

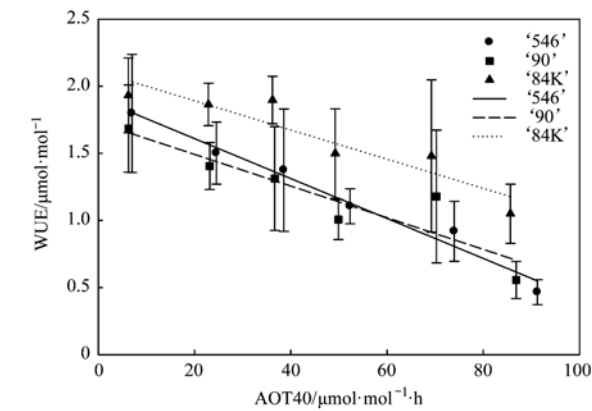


图 2 不同 O_3 处理下 3 种基因型杨树水分利用效率变化

Fig. 2 Changes of water use efficiency of three poplar genotypes in different O_3 treatments

2.3 O_3 浓度升高对光合色素的影响

方差分析结果显示: O_3 处理和不同基因型杨树以及二者的交互作用对光合色素均有极显著性的影响($P < 0.01$, 表 2). 从图 4 中可知, ‘546’ 随着 O_3 浓度升高, 其 Chla、Chlb、Chla + b、Car 均呈极显著线性下降($P < 0.01$). 和 CF 相比, O_3 浓度升高至 NF20 (Chla、Chla + b)、NF40 (Chlb、Car) 已引起 ‘546’ 基因型杨树的相应光合色素指标显著降低(表 6). ‘84K’ 基因型杨树的各光合色素对 O_3 的响应不显著(图 4 和表 6). 从各指标斜率上来看,

表 6 不同 O_3 处理下 3 种基因型杨树光合色素的多重比较结果
Table 6 Results of multiple comparisons of photosynthetic pigments of three poplar genotypes in different O_3 treatments

基因型	项目	Chla	Chlb	Chla + b	Car
‘84K’	CF	cdefg	abcdef	cdefg	abcde
	NF	hi	def	hi	e
	NF20	fghi	bcdef	efghi	de
	NF40	ghi	cdef	ghi	de
	NF60	defgh	bcdef	defgh	cde
	NF80	ghi	bcdef	fghi	de
‘90’	CF	bcd	abcd	bcd	abcd
	NF	bc	abc	bc	abc
	NF20	abc	abc	abc	abc
	NF40	efgh	bcdef	defgh	cde
	NF60	bcde	abcde	bcde	abcd
	NF80	defgh	bcdef	defgh	bcde
‘546’	CF	a	a	a	a
	NF	ab	ab	ab	ab
	NF20	bcdef	abcd	bcdef	abcd
	NF40	defgh	bcdef	defgh	bcde
	NF60	i	f	i	e
	NF80	hi	ef	hi	de

O_3 敏感性为 ‘546’ > ‘90’ > ‘84K’.

3 讨论

光合作用是绿色植物利用光合色素, 以 CO_2 和

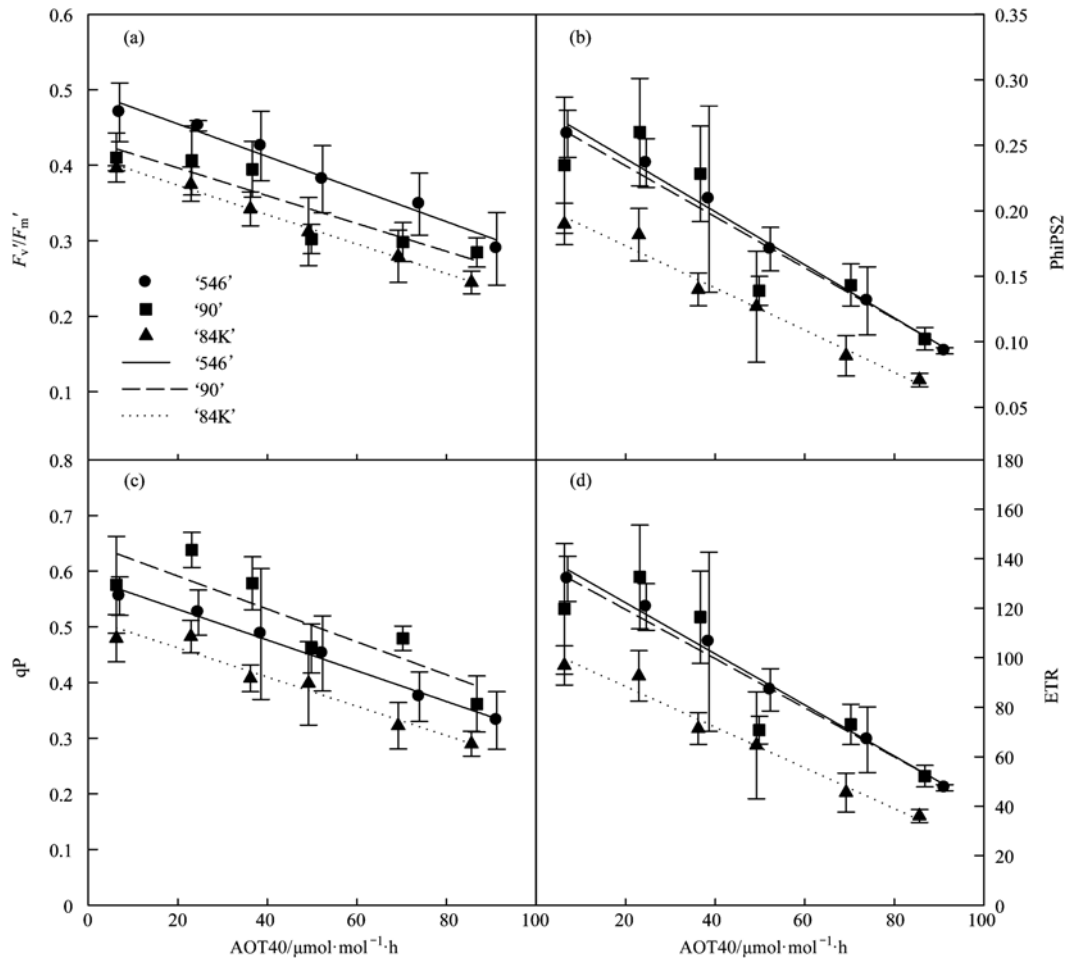


图3 不同 O_3 处理下3种基因型杨树叶绿素a 荧光参数变化

Fig. 3 Changes of chlorophyll a fluorescence parameters of three poplar genotypes in different O_3 treatments

H_2O 为原料,将吸收的光能同化为有机物,并释放 O_2 的生化过程。 O_3 可通过多种途径影响光合作用。首先, O_3 会引起植物叶片气孔部分关闭。气孔关闭必然会限制 CO_2 的进入,从而减少光合作用对 CO_2 的吸收,使光合速率下降。其次, O_3 可氧化叶绿体膜,破坏光合组织使叶绿体受损或减少,因而光合作用对于 O_3 浓度升高极为敏感。研究证明,随着 O_3 浓度的升高,植物的光合速率均普遍下降。而不同物种对于 O_3 的敏感性是不同的^[38],正如李秋静等^[39]研究发现随着 O_3 处理时间的延长,尖叶杜英、米老排和藜蒴幼苗的净光合速率虽然会出现显著下降,但通过主成分分析可知三者的敏感性由于各自抗 O_3 胁迫能力不同有着显著的差异,其中尖叶杜英最为敏感,藜蒴其次,耐受能力最强的为米老排。而同一物种的不同基因型也有很大区别^[31],本研究结果与其结论一致,3种基因型杨树 P_n 均出现显著性降低,但从线性关系的斜率中可以看出其敏感性不同,‘546’最为敏感,随着 O_3 升高 P_n 降低更快。从

图1(b)中可以看出随着 O_3 浓度升高,除‘546’外,其他2种基因型杨树 G_s 均出现下降趋势,但统计分析并未达到显著水平($P=0.511$),可能因为高浓度 O_3 已经导致基因型‘546’的气孔调控失灵。但3种基因型之间存在显著差异($P<0.001$),其中‘546’本身气孔导度绝对值明显高于其他两基因型杨树,这表明‘546’气孔 O_3 吸收量较其他基因型要大得多,这与其对 O_3 较为敏感有关^[35]。Farquhar 等^[40]认为,如果 G_s 下降,而 c_i 不变或者上升,则 P_n 下降应是由叶肉细胞同化能力降低等非气孔因素所致;当 G_s 与 c_i 同时下降时才能说明 P_n 下降主要由气孔限制引起的。因此从本研究结果可以看出, G_s 下降而 c_i 上升,气孔限制并非光合速率下降的主要原因。从表3可知,3种基因型杨树水分利用效率与 O_3 浓度呈显著负相关,基因型‘546’的 WUE 下降最快,其 O_3 敏感性最强,与前面结论一致。

随着 O_3 浓度升高,3种基因型杨树的叶绿素a 荧光参数均出现显著下降,且均与 O_3 浓度存在显著

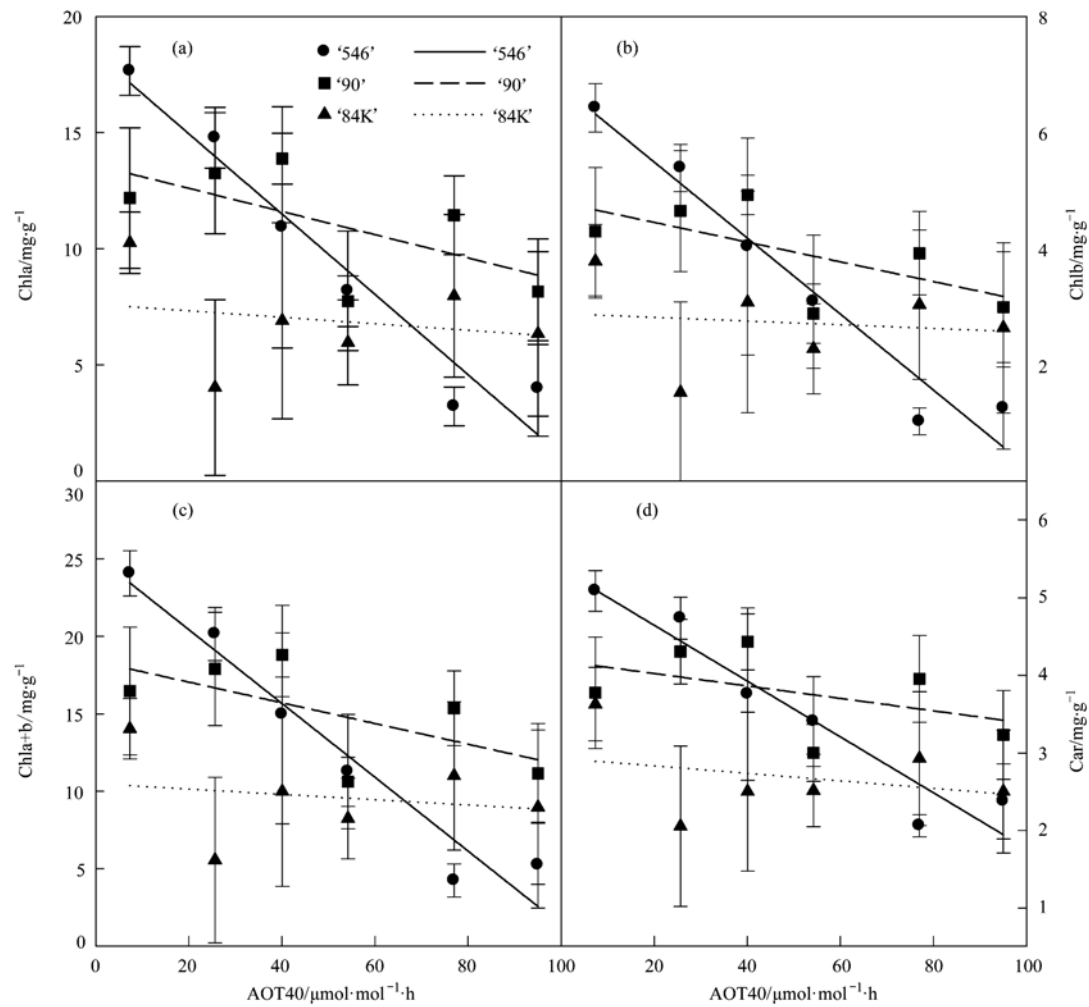


图 4 不同 O₃ 处理下 3 种基因型杨树光合色素变化

Fig. 4 Changes of photosynthetic pigments of three poplar genotypes in different O₃ treatments

线性关系 ($P < 0.01$), 说明随着 O₃ 浓度不断升高, 其光能利用效率显著降低. F_v'/F_m' 下降说明植物的光能捕获能力下降, 主要是叶绿素含量下降所致. PhiPS2、qP、ETR 显著下降, 一方面可能是植物将所吸收的光量子转化为热能而耗散的结果, 另一方面可能是电子传递、能量转化受阻, 光合结构 PS II 受损^[41], 这与王亮等^[42]在臭氧 FACE 平台下对小麦的研究结果一致.

叶绿素是衡量植物光合能力的又一重要指标, 其含量的变化往往与叶绿体的生理活性、植物对环境的适应性和抗性有关. 根据本实验中叶绿素指标也可看出, 叶绿素含量均显著下降, 且与 O₃ 浓度之间存在负相关. 但只有 '546' 的斜率最大, 敏感性最强, 且叶绿素指标与 O₃ 浓度之间线性关系达到显著水平, 因此其与光合作用显著降低相对应. 由于受到 O₃ 伤害, 叶绿素含量及其组成发生变化, 导致植物的光合作用受阻, 降低了植物体的光合作用以及

其新陈代谢, 促进了植物叶片的衰老. 这与 Zhang 等^[43]研究 O₃ 影响水杉的叶绿素变化态势相一致.

综上所述, 从绝大多数光合作用特征指标特别是光合色素的 O₃ 剂量线性响应关系来看, 由于受到 O₃ 伤害, 导致气孔受损, 电子传递受阻, 叶绿素含量下降, 从而影响植物的生长. 其中基因型 '546' 通常表现出最大的斜率, 基因型 '90' 次之, 基因型 '84K' 斜率最小, 因而可得知随着 O₃ 浓度升高, 3 种基因型杨树的 O₃ 敏感性为 '546' > '90' > '84K'.

由于本研究仅对光合作用特征指标与 O₃ 剂量之间的线性关系进行了分析, 进一步对抗氧化系统进行量化分析将是今后研究的重点. O₃ 对于植物的影响虽然是一个累积过程, 这种变化可能需要更长时间来验证, 但随着时间的延长植物可能又会产生一定的适应能力, 所以未来开展多年的长期实验研究, 对于科学评价 O₃ 的生态效应具有重要意义.

4 结论

杨树光合作用指标对 O_3 浓度升高极为敏感,基
因型之间存在显著差异,其中‘546’对 O_3 较为敏
感,‘90’次之,而‘84K’抗性较强. 研究结果对于筛
选抗 O_3 的杨树基因型提供科学依据.

参考文献:

- [1] The Royal Society. Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications[R/OL]. Science Policy Report 15/08. London: The Royal Society, 2008. <http://royalsociety.org/displaypagedoc.asp?id=31506>.
- [2] Feng Z Z, Paoletti E, Bytnerowicz A, et al. Ozone and plants[J]. Environmental Pollution, 2015, **202**: 215-216.
- [3] Shao M, Tang X Y, Zhang Y H, et al. City clusters in China: air and surface water pollution[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2006, **4**(7): 353-361.
- [4] 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.
- [5] Vingarzan R. A review of surface ozone background levels and trends[J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(21): 3431-3442.
- [6] IPCC. Summary for policymakers[A]. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al (Eds.). 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: Cambridge University Press, 2013. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.
- [7] Feng Z Z, Hu E Z, Wang X K, et al. Ground-level O_3 pollution and its impacts on food crops in China: a review[J]. Environmental Pollution, 2015, **199**: 42-48.
- [8] Yamaji K, Ohara T, Uno I, et al. Future prediction of surface ozone over east Asia using Models-3 Community Multiscale Air Quality Modeling System and Regional Emission Inventory in Asia[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, **113**(D8): D08306.
- [9] 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.
- [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] Zhang W W, Feng Z Z, Wang X K, et al. Elevated ozone negatively affects photosynthesis of current-year leaves but not previous-year leaves in evergreen *Cyclobalanopsis glauca* seedlings[J]. Environmental Pollution, 2014, **184**: 676-681.
- [12] Zheng Y H, Cheng D, Simmons M. Ozone pollution effects on gas exchange, growth and biomass yield of salinity-treated winter wheat cultivars[J]. Science of the Total Environment, 2014, **499**: 18-26.
- [13] 徐胜, 何兴元, 陈玮, 等. 高浓度 O_3 对树木生理生态的影响[J]. 生态学报, 2009, **29**(1): 368-377.
- [14] 赵诣, 徐胜, 何兴元, 等. 三种冷季型草坪草对高浓度 O_3 的生理响应[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(12): 3203-3208.
- [15] Wittig V E, Ainsworth E A, Long S P. To what extent do current and projected increases in surface ozone affect photosynthesis and stomatal conductance of trees? A meta-analytic review of the last 3 decades of experiments[J]. Plant, Cell & Environment, 2007, **30**(9): 1150-1162.
- [16] 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.
- [17] Farage P K, Long S P. The effects of O_3 fumigation during leaf development on photosynthesis of wheat and pea: an in vivo analysis[J]. Photosynthesis Research, 1999, **59**(1): 1-7.
- [18] 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.
- [19] Fiscus E L, Reid C D, Miller J E, et al. Elevated CO_2 reduces O_3 flux and O_3 -induced yield losses in soybeans: possible implications for elevated CO_2 studies[J]. Journal of Experimental Botany, 1997, **48**(2): 307-313.
- [20] Morgan P B, Bernacchi C J, Ort D R, et al. An in vivo analysis of the effect of season-long open-air elevation of ozone to anticipated 2050 levels on photosynthesis in soybean[J]. Plant Physiology, 2004, **135**(4): 2348-2357.
- [21] Zheng Y, Shimizu H, Barnes J D. Limitations to CO_2 assimilation in ozone-exposed leaves of *Plantago major*[J]. New Phytologist, 2002, **155**(1): 67-78.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Hoshika Y, Pecori F, Conese I, et al. Effects of a three-year exposure to ambient ozone on biomass allocation in poplar using ethylenediurea[J]. Environmental Pollution, 2013, **180**: 299-303.
- [27] 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.
- [28] 陈波, 鲁绍伟, 李少宁. 基于树干液流技术对杨树冠层吸收臭氧特征的分析[J]. 东北林业大学学报, 2015, **43**(1): 72-79.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Betzelberger A M, Gillespie K M, McGrath J M, *et al.* Effects of chronic elevated ozone concentration on antioxidant capacity, photosynthesis and seed yield of 10 soybean cultivars: soybean cultivar responses to ozone [J]. Plant, Cell & Environment, 2010, **33**(9): 1569-1581.
- [32] Marzuoli R, Gerosa G, Desotgiu R, *et al.* Ozone fluxes and foliar injury development in the ozone-sensitive poplar clone Oxford (*Populus maximowiczii* × *Populus berolinensis*): a dose-response analysis[J]. Tree Physiology, 2009, **29**(1): 67-76.
- [33] Sicard P, De Marco A, Dalstein-Richier L, *et al.* An epidemiological assessment of stomatal ozone flux-based critical levels for visible ozone injury in Southern European forests[J]. Science of the Total Environment, 2016, **541**: 729-741.
- [34] B ker P, Feng Z Z, Uddling J, *et al.* New flux based dose-response relationships for ozone for European forest tree species [J]. Environmental Pollution, 2015, **206**: 163-174.
- [35] Sun J D, Feng Z Z, Ort D R. Impacts of rising tropospheric ozone on photosynthesis and metabolite levels on field grown soybean[J]. Plant Science, 2014, **226**: 147-161.
- [36] Bagard M, Jolivet Y, Hasenfratz-Sauder M P, *et al.* Ozone exposure and flux-based response functions for photosynthetic traits in wheat, maize and poplar[J]. Environmental Pollution, 2015, **206**: 411-420.
- [37] Lichtenthaler H K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes [J]. Methods in Enzymology, 1987, **148**: 350-382.
- [38] Bussotti F, Desotgiu R, Cascio C, *et al.* Photosynthesis responses to ozone in young trees of three species with different sensitivities, in a 2-year open-top chamber experiment (Curno, Italy) [J]. Physiologia Plantarum, 2007, **130**(1): 122-135.
- [39] 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.
- [40] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, **33**(1): 317-345.
- [41] 梁晶, 曾青, 朱建国, 等. 开放式臭氧浓度升高对水稻叶片气体交换和荧光特性的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(4): 991-995.
- [42] 王亮, 曾青, 冯兆忠, 等. 开放式臭氧浓度升高对 2 个冬小麦品种光合损伤的研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(2): 527-534.
- [43] Zhang W W, Feng Z Z, Wang X K, *et al.* Impacts of elevated ozone on growth and photosynthesis of *Metasequoia glyptostroboides* Hu et Cheng [J]. Plant Science, 2014, **226**: 182-188.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《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6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 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