

典型城区与郊区环境大叶黄杨气体交换 及叶绿素荧光特性比较

冯 强², 胡 聃^{1,*}, 李 娜³

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 沈阳农业大学农学院, 辽宁 沈阳 110161;

3. 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083)

摘要: 采用 Li-6400 便携式光合作用测定系统对夏秋季典型城区与郊区环境下大叶黄杨的气体交换和叶绿素荧光特性进行了现场实验比较研究。研究显示, 叶片净光合速率的大小由总光合速率(光合能力)和呼吸速率共同决定, 城区环境温度较高、相对湿度较低、大气 CO₂ 浓度较高, 不同月份城区和郊区样点大叶黄杨的净光合速率差异显著性存在不同。城区环境下大叶黄杨的胞间 CO₂ 浓度、叶面水气压亏缺、蒸腾速率高于郊区环境。城区环境中温度、大气 CO₂ 浓度等的变化会影响叶片呼吸作用, 造成呼吸速率升高或是降低, 城区环境中污染物浓度变化也会损伤叶片光合结构从而导致总光合能力降低, 这两者都会引起净光合速率的变化。通过大叶黄杨叶片叶绿素荧光指标的进一步对比分析发现, 城区大叶黄杨叶片叶绿素总量、叶绿素 a/b、Fv/Fm、Fv/Fo、qP、ΦPS II、ETR 降低, 但 qN 升高。表明叶片叶绿体 PS II 的功能受到负面影响。城区大叶黄杨叶片荧光参数的变化, 从微观机制上表明城区环境中污染物浓度的上升导致叶绿素及叶绿体光合结构受损的确是叶片光合能力下降的主要原因之一。

关键词: 城市环境变化; 气体交换过程; 叶绿素荧光

文章编号: 1000-0933 (2009) 07-3477-08 中图分类号: Q945.11 文献标识码: A

Comparative analysis of leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Euonymus japonicus* Thunb by field experiment in the typical urban and suburban areas in Beijing

FENG Qiang², HU Dan^{1,*}, LI Na³

1 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 College of agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China

3 College of Biological Sciences and Biotechnology Beijing Forestry University, Beijing 10083, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3477 ~ 3484.

Abstract: Using Li-6400 portable photosynthesis system, we studied the differences of leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Euonymus japonicus* Thunb by the field experiment in summer and autumn seasons in the typical urban and suburban areas in Beijing city. The results showed that there are higher levels of atmospheric temperature, relative humidity and CO₂ concentration in the urban areas than that in the suburban areas, the net assimilation ability of CO₂ for *E. japonicus* leaf is usually subject to the total assimilation ability of CO₂ and respiration rate, and its significances of difference varied in the studied months. In addition, the indicators of intercellular CO₂ concentration, $VPD_{leaf-to-air}$, transpiration rate of *E. japonicus* leaf in the urban plot were higher than those in the suburban plot.

The monthly changes in atmospheric temperature and CO₂ concentration in the urban areas affected leaf respiration,

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2-YW-324); 城市与区域生态国家重点实验室资助项目(sklure2008-1-01); 国家科技部科技支撑资助项目(2007BAC28B04)

收稿日期: 2008-01-23; 修订日期: 2008-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hudan@rcees.ac.cn

leading to a increase or decrease of leaf respiration rate, in the same time, the monthly changes in atmospheric pollutants' concentration also damaged chlorophyll and chloroplast of *E. japonicus* leaf and further led to the decline in its total assimilation ability of CO_2 , both of them determined the variation in net assimilation ability of CO_2 for *E. japonicus* leaf.

Further comparative analysis of leaf chlorophyll fluorescence parameters indicated that, the total content of chlorophyll, chlorophyll a/b and chlorophyll fluorescence parameters (F_v/F_m , F_v/F_o , qP , $\Phi\text{PS II}$, ETR) for *E. japonicus* leaf in the urban plot decreased but qN increased, showing that the activity of leaf photosystem II was negatively affected by the increase in atmospheric pollutants' concentration and led to the damage to chlorophyll and chloroplast of *E. japonicus* leaf that really became a cause for the reduction of leaf total assimilation ability of CO_2 in the urban areas.

Key Words: urban compound environmental change; leaf gas exchange; leaf chlorophyll fluorescence

城市活动改变了城市地区植物赖以生存的环境条件,热岛、干岛、雨影、污染、光辐射的非均匀分布和生物组成变化及其交互作用的复合性成为城市环境变化的主要特征,其中,温、湿和污染常常是城市环境变化对城市植物光合作用产生影响的重要环境因素。

光合作用是植物的重要生理过程,前人对单一环境因子及多因子综合作用对光合作用的影响,以及光合作用对环境变化的适应性已有大量的研究^[1~4]。但对城市人口活动环境下植物光合行为的变化研究较少。以往单一污染物^[5~7]以及模拟汽车尾气对绿化植物进行熏气实验^[8]植物直接置于熏气环境下,植物的反应往往是应激性的,而实际城市环境因子的变化常常是比较缓慢而长期的,而在这种环境胁迫下植物往往能够得到抗性锻炼而能适应更严重的胁迫。熏气实验时间较短、气温、相对湿度、气流相对稳定,而城市环境下气温、相对湿度及污染物浓度是变化的,所以熏气实验得到的结论具有一定的局限性。相比较而言,盆栽幼苗是针对特定年龄的植物,放置在城市不同区域进行城市环境对植物气体交换及叶绿素荧光影响的对比实验^[9,10],虽然克服了熏气实验的缺点,但幼苗盆栽实验在技术上难以反映成龄植物对环境变化的长期适应性,在幼苗与成龄两个生长阶段上的植物对环境的长期适应能力实际上存在较大差异,因此,得到的研究结果不能反映植物对城市环境适应性的全貌。本文在前人研究的基础上,选择北京城区的典型绿化树种大叶黄杨(占灌木、绿篱、色块总和的 20.68%^[11]),在开放实验条件下研究城区与郊区环境大叶黄杨的气体交换及叶绿素荧光特性差异,揭示典型城市环境下大叶黄杨光合作用生理生态行为的特征。研究将了解城区绿化植物在不同城市环境下的光合特征提供参考,为改善城市植物生态服务的树种配置提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

大叶黄杨(*Euonymus japonicus* Thunb)是卫矛科卫矛属植物,在北京地区广泛栽种。选取生长状况基本一致的 4 年生大叶黄杨为实验材料。

1.2 试验地点

北京城区目前已经没有污染严重的工矿企业,主要污染来源于交通和居民生活,因此选取交通繁忙区作为北京典型的城区环境,与郊区环境进行对比研究。城区采样点选在车公庄大街东面路段,官园桥的西侧,是西二环与车公庄的大街相接的枢纽区,是北京城区主要的热岛点。北京植物园远离城区,靠近香山,作为郊区环境代表点。

实验选择的两个对比样地土壤养分状况基本一致,10~20cm 土层有机质平均含量 $9.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮平均含量 $0.74\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效氮平均含量 $47.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷平均含量 $15.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效钾平均含量 $79.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。两个样地的大叶黄杨呈带状分布、栽植密度 $25\text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右,并采用相同的园林养护方式,实验期间 10~20cm 土层土壤体积含水量在 0.149~0.255 之间。

1.3 测试内容

选定夏秋季的 8、9、10 月份,每月中旬采用美国 Li-cor 公司生产的 Li-6400 便携式光合测定系统及配备的

6400-40 荧光叶室同时测定气体交换及叶绿素荧光参数,在 9:00 ~ 11:00 时进行测定,同一样点内选择成龄植株 3 株,随机选取向阳面中上部生长方向基本一致的全展叶进行原位测定(每株取 3 ~ 5 片叶),待仪器稳定后,测定叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、叶面水气压亏缺($\text{VPD}_{\text{leaf-to-air}}$)、大气 CO_2 浓度(C_a)、光合有效辐射(PAR)、相对空气湿度(RH)。

采用调制式荧光测量原理测定叶绿素荧光参数。使用 Li-cor 公司的暗适应夹子使叶片经 30min 暗适应,加弱的调制测量光测定原初荧光(F_o),加上饱和强光脉冲,测定暗中最大荧光(F_m)。随后加上活化光,测得稳态荧光产量(F_s)。在活化光存在的情况下加上饱和光脉冲,测得光下最大荧光(F'_m),在关闭活化光的瞬间,加上远红外光数秒钟,使 PS II 反应中心快速打开,测得照光下的最小荧光(F'_o)。参照 Li-cor 6400-40 叶绿素荧光叶室使用手册提供的建议设置测量光和强闪光的参数。

SO_2 的测定采用 GB/T15262-94 的方法, NO_2 的测定采用 GB/T15436-1995 的方法,与光合作用的同时测定,3 次重复。

叶绿素含量的测定:分别在两样地取大叶黄杨向阳面中上部生长方向基本一致的全展叶装入冰壶,带回实验室参照高俊凤^[12]的方法进行测定,5 次重复。

1.4 数据统计分析方法

所有数据均使用 Excel 和 DPS 统计软件进行整理和分析。大叶黄杨在典型城区环境和郊区环境的生理生态差异采用 t 测验进行比较分析。

2 结果与分析

2.1 典型城区环境与郊区环境光合特性比较

城区环境由于路面硬化、植被相对较少、车流较大等造成了温度较高、相对湿度较低、大气 CO_2 和污染物浓度较高的环境条件,由表 1 可知,城区与郊区主要环境指标的差异达到了显著或极显著。

表 1 典型城区环境与郊区环境因子比较

Table 1 Comparison of environmental factors in the typical urban and suburban areas in Beijing

时间 Duration	地点 Site	气温 T_a (°C)	相对湿度 RH (%)	光合有效辐射 PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	大气 CO_2 浓度 C_a ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	SO_2 浓度 SO_2 concent ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	NO_2 浓度 NO_2 concent ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
8 月 Aug.	植物园	30.02 ± 0.60	53.87 ± 1.77	837.00 ± 19.08	376.91 ± 1.36	0.007 ± 0.0007	0.014 ± 0.0008
	车公庄	35.14 ± 0.76	40.83 ± 2.12	983.70 ± 15.12	430.22 ± 6.93	0.037 ± 0.0030	0.070 ± 0.0010
		**	**	—	**	**	**
9 月 Sep.	植物园	27.54 ± 0.86	52.85 ± 2.81	1328.42 ± 28.9	395.10 ± 1.51	0.017 ± 0.0058	0.019 ± 0.0004
	车公庄	30.54 ± 0.80	25.97 ± 1.04	1328.50 ± 29.2	438.28 ± 3.46	0.062 ± 0.0044	0.066 ± 0.0005
		*	**	—	**	**	**
10 月 Oct.	植物园	18.38 ± 0.88	45.88 ± 2.09	892.85 ± 21.84	422.48 ± 2.77	0.011 ± 0.0007	0.017 ± 0.0006
	车公庄	20.10 ± 0.56	17.07 ± 0.78	856.15 ± 21.66	411.81 ± 4.94	0.049 ± 0.0010	0.062 ± 0.0039
		—	**	—	—	**	**

气温、相对湿度、光合有效辐射和大气 CO_2 浓度为 $M \pm \text{SE}(n=20)$, SO_2 和 NO_2 浓度为 $M \pm \text{SE}(n=3)$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, - $p > 0.05$; T_a 、RH、PAR and C_a : $M \pm \text{SE}(n=20)$, Concentration of SO_2 Concentration of NO_2 : $M \pm \text{SE}(n=20)$; 植物园 Botanical Garden

从表 2 可以看出,城区环境下大叶黄杨叶面水气压亏缺、蒸腾速率大于郊区环境下的大叶黄杨,气孔导度表现出下降的趋势。城区环境下大叶黄杨的胞间 CO_2 浓度较高,不同月份净光合速率差异的显著性各有所不同。

8 月和 9 月份,车公庄大气 CO_2 、大叶黄杨的胞间 CO_2 浓度极显著的大于植物园,但两样点的净光合速率却无显著差异,说明较高的胞间 CO_2 浓度并不一定导致较高净光合速率。导致这一结果的主要原因一是叶片呼吸速率升高造成,其二是因大气污染物造成叶绿素及叶绿体结构损伤而使光合能力降低引起。从叶片呼吸作用看,通常引起植物叶片呼吸作用的环境因素主要是温度、氧气、二氧化碳、水分以及呼吸底物含量(如可

溶性糖的含量),在一定范围内呼吸速率随温度升高而升高,而 CO_2 浓度升高会抑制呼吸作用^[13]。车公庄气温高于植物园有利于呼吸速率的提高, CO_2 浓度高于植物园不利于呼吸速率的提高,叶片呼吸速率变化存在不确定性,需要进一步研究。本研究所选城区环境属于交通繁忙区,有大量汽车尾气排放,如 SO_2 、 NO_x 等(表 1),Betay^[14] 研究认为, SO_2 等大气污染物可以影响 CO_2 的吸收,这些污染物可以通过与 CO_2 相同的方式通过气孔进入到叶肉中,与 CO_2 的进入形成竞争,另一方面,它可以破坏叶肉组织和光合作用相关酶的活性影响光合作用的正常进行。城区环境下大气污染物造成叶绿素及叶绿体结构损伤,从而导致叶片光合能力降低,这一点还可从下面的叶片荧光对比实验中得到证实。

表 2 典型城区环境与郊区环境测试植物叶片气体交换比较

Table 2 Comparison of leaf gas exchange for the experimental plants in the typical urban and suburban areas in Beijing

时间 Duration	地点 Site	净光合速率 P_n ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 C_i ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	叶面水气压亏缺 $VPD_{\text{leaf-to-air}}$ (kPa)	蒸腾速率 T_r ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
8 月 Aug.	植物园	7.53 ± 1.05	0.0825 ± 0.0140	207.17 ± 7.33	2.04 ± 0.14	1.80 ± 0.40
	车公庄	7.34 ± 0.31	0.0937 ± 0.0116	271.30 ± 13.77	3.04 ± 0.20	2.94 ± 0.40
	变化率 Change rate(%)	-2.52	13.58	30.96	49.02	63.33
		-	* *	* *	* *	*
9 月 Sep.	植物园	9.53 ± 0.39	0.0889 ± 0.0063	197.49 ± 11.87	2.02 ± 0.24	1.74 ± 0.14
	车公庄	8.33 ± 0.48	0.0783 ± 0.0040	226.55 ± 5.74	3.48 ± 0.21	2.74 ± 0.25
	变化率(%)	-12.59	-11.92	14.71	72.28	57.47
	-	* *	*	* *	* *	
10 月 Oct.	植物园	8.89 ± 0.35	0.0685 ± 0.0069	173.51 ± 24.67	1.22 ± 0.12	0.83 ± 0.09
	车公庄	6.12 ± 0.66	0.0672 ± 0.0063	244.33 ± 17.88	1.96 ± 0.09	1.31 ± 0.18
	变化率(%)	-31.16	-1.90	40.82	60.66	57.83
	显著性	* *	* *	*	* *	*

$M \pm SE(n=20)$, * $p < 0.05$, * * $p < 0.01$, - $p > 0.05$

10 月份车公庄大叶黄杨的胞间 CO_2 浓度极显著大于植物园,但净光合速率却极显著的低于植物园大叶黄杨。结合表 1,两样点的气温、大气 CO_2 浓度无显著差异,叶片呼吸作用也应一致,所以呼吸作用不会对净光合速率的降低产生贡献,净光合速率的降低是叶片光合能力降低导致的。温达志^[15,16] 等研究发现,生长在工业区和交通繁忙区的 30 种园林植物和木本植物的净光合速率都有一定程度的下降。吴丽英^[17] 用 $0.1 \sim 0.42 \text{mg/m}^3$ 的 SO_2 对小麦、水稻、大豆、马铃薯进行长期熏气处理发现, SO_2 对 4 种作物的光合强度均有抑制作用。10 月份大叶黄杨处于生长末期,长期暴露在城市污染环境下,导致大叶黄杨光合器官同化 CO_2 的能力显著降低。

总之,净光合速率的大小一般由总光合速率(光合能力)和呼吸速率共同决定,城市环境变化造成叶片光合结构损伤而会导致总光合能力降低,城市环境变化也会使叶片呼吸作用增强,这两者都会导致净光合速率的降低,究竟谁占主导需要做进一步实验分析。

2.2 典型城区环境与郊区环境下大叶黄杨叶绿素含量比较

植物叶片叶绿素含量对环境非常敏感,不利的生长条件会导致叶片叶绿素分解。由表 3 可知,本研究的城区环境下叶绿素 a + b 极显著的低于郊区环境,a/b 极显著的高于郊区环境。

叶绿素含量的下降与 SO_2 、 NO_2 、HF 等污染气体有关,舒俭民对大豆进行了长期低浓度 SO_2 熏气实验^[18],发现叶绿素含量与 SO_2 暴露剂量之间存在明显的负相关,叶绿素 b 对 SO_2 的敏感性大于叶绿素 a。严荣昌在大气污染与马尾松衰老的研究中得到相似的结论^[19],本实验的结果与之类似,城区叶绿素 a + b 和 a/b 的变化是因为叶绿素 b 显著的降低引起的,叶绿素 a 的变化表现不明显或是高于郊区环境。

表 3 典型城区环境与郊区环境下大叶黄杨叶绿素含量比较

Table 3 Comparison of leaf chlorophyll content of *Euonymus japonicus* Thunb growing in the typical urban and suburban areas in Beijing

时间 Duration	地点 Site	叶绿素 a Chl a (mg·g ⁻¹ FW)	叶绿素 b Chl b (mg·g ⁻¹ FW)	叶绿素 a + b Chl a + b (mg·g ⁻¹ FW)	叶绿素 a/b Chl a/b
8 月 Aug.	植物园	0.39 ± 0.009	0.65 ± 0.019	1.04 ± 0.011	0.60 ± 0.030
	车公庄	0.44 ± 0.007	0.43 ± 0.019	0.86 ± 0.015	1.03 ± 0.062
9 月 Sep.		—	* *	* *	* *
	植物园	0.34 ± 0.004	0.83 ± 0.020	1.17 ± 0.017	0.41 ± 0.015
	车公庄	0.40 ± 0.006	0.60 ± 0.034	1.01 ± 0.029	0.68 ± 0.047
10 月 Oct.		—	* *	* *	* *
	植物园	0.36 ± 0.007	0.72 ± 0.019	1.08 ± 0.016	0.50 ± 0.022
	车公庄	0.44 ± 0.009	0.43 ± 0.026	0.87 ± 0.020	1.07 ± 0.086
		*	* *	* *	* *

M ± SE (n = 5), * p < 0.05, * * p < 0.01, -p > 0.05

2.3 典型城区环境与郊区环境下大叶黄杨叶绿素荧光参数比较

叶绿素荧光参数 F_v/F_m 为 PS II 最大光化学效率,反映 PS II 反应中心原初光能转换效率, F_v/F_o 代表从 Chl a/b 蛋白复合体 LHCP 到 PS II 的光能传递能力^[20],两者是近年来常用的研究植物对逆境响应的重要生理参数。植物在非逆境生长条件下 F_v/F_m 一般为 0.75 ~ 0.85^[21],由表 4 可知,城区环境下大叶黄杨的 F_v/F_m 在 0.75 ~ 0.85 这个正常范围之外,显著或极显著的低于郊区环境,下降幅度分别为 8.64%、8.86% 和 12.82%。城区环境下 F_v/F_o 都极显著的低于郊区环境,下降幅度分别为 31.13%、31.28% 和 38.14%。可见城区环境下叶片 PS II 原初光化学效率和从天线色素到 PS II 反应中心的传能效率都较郊区环境有所降低, F_v/F_o 的下降程度明显大于 F_v/F_m 下降程度,说明城区环境的汽车尾气污染、干旱等不利条件对大叶黄杨 PS II 传能效率的抑制比对其光能转化效率的抑制更显著,这与苏行^[20]的研究相一致。

表 4 典型城区环境与郊区环境下大叶黄杨叶绿素荧光参数比较

Table 4 Comparison of leaf chlorophyll fluorescence of *Euonymus japonicus* Thunb in the typical urban and suburban areas in Beijing

时间 Duration	地点 Site	F_v/F_m	F_v/F_o	qP	qN	$\Phi PS II$	ETR
8 月 Aug.	植物园	0.81 ± 0.004	4.24 ± 0.112	0.73 ± 0.032	0.80 ± 0.011	0.33 ± 0.020	110.77 ± 9.34
	车公庄	0.74 ± 0.004	2.92 ± 0.069	0.52 ± 0.021	0.90 ± 0.008	0.18 ± 0.014	75.03 ± 4.98
	变化率 (%)	-8.64	-31.13	-28.77	12.50	-45.45	-32.27
		*	* *	* *	* *	* *	* *
9 月 Sep.	植物园	0.79 ± 0.002	3.74 ± 0.041	0.50 ± 0.028	0.83 ± 0.007	0.20 ± 0.011	112.23 ± 6.24
	车公庄	0.72 ± 0.007	2.57 ± 0.082	0.37 ± 0.017	0.87 ± 0.008	0.12 ± 0.007	68.97 ± 3.80
	变化率 (%)	-8.86	-31.28	-26.00	4.82	-40.00	-38.55
		*	* *	*	* *	*	* *
10 月 Oct.	植物园	0.78 ± 0.004	3.54 ± 0.075	0.41 ± 0.019	0.78 ± 0.014	0.19 ± 0.005	62.35 ± 2.595
	车公庄	0.68 ± 0.011	2.19 ± 0.115	0.31 ± 0.013	0.80 ± 0.020	0.12 ± 0.005	40.14 ± 2.417
	变化率 (%)	-12.82	-38.14	-24.39	2.56	-36.84	-35.62
		* *	* *	*	*	* *	* *

M ± SE (n = 20), * p < 0.05, * * p < 0.01, -p > 0.05

光化学猝灭系数 qP 值的大小反映的是 PS II 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额,反映 PS II 反应中心的开放程度^[22]。光化学猝灭反映了 PS II 原初电子受体 QA 的还原状态,它由 QA 重新氧化形成。 qP 越大,QA 重新氧化形成 QA 的量越大,即 PS II 的电子传递活性越大^[23]。非光化学猝灭系数 qN 代表 PS II 天线色素吸收的光能不能用于光化学电子传递而被用于非光化学反应如热耗散等的程度, qN 与叶绿体光合膜质子梯度的建立及膜的高能态有关^[24]。 qP 和 qN 两个参数反映叶片对激发能的利用情况。由表 4 可知,城区环境下大叶黄杨叶片的 qP 都显著或极显著低于郊区环境,说明城区环境的不利条件降低了大叶黄杨 PS II 反应中心的开放比例,叶绿体吸收的光能用于有效的光化学转换的比例减少,光合电子传递能力降低。

qN 的变化趋势与 qP 相反,城区环境显著或极显著地高于郊区环境,说明城区环境下激发能用于非光化学反应的耗散比例增大,PS II 通过提高非辐射性热耗散,可以消耗 PS II 吸收的过剩光能,从而保护 PS II 反应中心免受因吸收过多光能而引起光氧化的伤害。

PS II 非环式电子传递的量子效率($\Phi_{PS II} = (F_m' - F_s)/F_m'$)是 PS II 功能的指标之一。叶片 $\Phi_{PS II}$ 反映了 PS II 反应中心在部分关闭的情况下的实际原初光能捕获效率,可反映实际的 PS II 反应中心进行光化学反应的效率^[25]。由表 4 可知,城区环境下叶片 $\Phi_{PS II}$ 显著或极显著地低于郊区环境,降低幅度较大,分别为 45.45%、40.00% 和 36.84%。说明城市环境下,大叶黄杨叶片 PS II 反应中心进行光化学反应的效率明显降低。 ETR 为表观光合电子传递速率,城区环境下大叶黄杨叶片的 ETR 都极显著的低于郊区环境,降低幅度分别为 32.27%、38.55% 和 35.62%,可见城区环境不利于叶片的光合电子传递,不利于光合作用。

城区与郊区大叶黄杨叶片荧光参数的差异表明了它们光合作用微观机制的变化,在一定程度上说明了城区环境下污染物浓度升高导致叶片叶绿体光合结构受损是其光合能力下降重要原因。

3 结论与讨论

城区环境是复合的,也是复杂的,不仅存在热岛效应、干岛效应、 CO_2 浓度升高以及水、土、气污染,还表现出它们之间交互作用而形成的复合环境变化。在复合环境条件下,在不同季节和不同月份,大叶黄杨蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度增加,净光合速率无明显变化或降低。

分析表明,城区大叶黄杨叶绿素 a + b 极显著的低于郊区环境,这与彭长连对广州 19 种植物在工业区、交通枢纽样点的叶绿素变化研究结果一致^[10],叶绿素含量的降低是城区大叶黄杨同化能力下降的原因之一。

PS II 是光合机构中对外界环境因子变化最敏感的部位^[26]。前人在模拟单一大气污染物(如 SO_2 或 $SO_2/NaHSO_3$)和模拟汽车尾气对叶绿体功能的影响有过较多的研究,已经证明 SO_2 抑制菠菜的光合磷酸化,全链和 PS II 的电子传递活性^[27];强光下($1000 \mu mol m^{-2} s^{-1}$)用 SO_3^{2-} 处理盐藻,随着 SO_3^{2-} 浓度(5, 25, 50, 100 $mmol L^{-1}$)的提高, F_v/F_m 、 qP 、 $\Phi_{PS II}$ 降低^[7];马树华^[8]用汽油发动机产生的尾气对 4 种阔叶树进行熏气实验,以 NO_2 浓度代表汽车尾气浓度,设置相同浓度(25 $\mu g \cdot m^{-3}$)不同的时间处理(1、3、5、7d)和相同的时间处理(2h)不同浓度(40、60、80、100 $\mu g \cdot m^{-3}$)两种方式对苗木进行熏气处理,随着处理时间的延长和处理浓度的增加,4 种树的 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 qP 、 $\Phi_{PS II}$ 都显著降低, qN 呈上升趋势。本实验中,叶绿素荧光参数的变化与前人类似,进一步证明了在城区复合环境下,叶片叶绿体 PS II 的功能受到了负面影响。PS II 反应中心内禀光能转换效率和 $Chl a/b$ 蛋白复合体 LHCP 到 PS II 的光能传递能力降低;叶绿体吸收的光能用于有效的光化学转换的比例减少,光合电子传递能力降低,叶绿体吸收的光能用于非光化学反应的耗散比例增加;城区环境下叶片 PS II 反应中心实际原初光能捕获效率降低,表观光合电子传递速率降低。这些叶片荧光参数的变化,从生理生态机制上表明了城区叶片光合能力下降。

本研究通过气体交换、叶绿素荧光探针来研究大叶黄杨对城市环境变化的响应,这种响应能够反映城区环境复合变化引起的植物叶片生理生态特性的变化。而且,这些变化在明显的伤害症状如叶组织损伤出现之前就可以被检测到。本研究选择生长在现实城市环境下栽种多年的大叶黄杨,其突出的优点是能够客观的反映成龄植物对实际城市环境变化的光合生理生态适应性特征,可以为大叶黄杨在城区复合环境变化下生长的伤害及适应性机理的研究提供基础。

植物叶片的呼吸作用在研究城市环境变化下叶片光合生理生态特征 also 具有重要意义,叶片呼吸与叶片光合结构的受损都对其净光合能力产生重大影响。

城市环境现场实验条件下,由于环境因子交互作用的复合性、城市环境本身的多变性给研究带来很大的不确定性,所以模拟控制实验与现场实验研究相结合将是植物对城市环境复合变化响应关系研究的新途径。

References:

- [1] Feng Z H, Wang X K, Zheng Q W, *et al.* Response of gas exchange of rape to ozone concentration and exposure regimes. *Acta Ecologica Sinica*,

- 2006,26(3):823—829.
- [2] Ehleringer J R, Ceding T E, Helliker B R C. Photosynthesis atmospheric CO₂ and climate. *Oecologia*, 1997, 112:285—299.
- [3] Liao J X, Wang G X. Effects of drought, CO₂ concentration and temperature increasing on photosynthesis rate, evapotranspiration and water use efficiency of spring wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(5):547—550.
- [4] Yun J Y, Yang J D, Zhao H L. Research progress in the mechanism for drought and high temperature to affect plant photosynthesis. *Acta Bot. Boreo1.-Occident. Sin*, 2006, 26(3):0641—0648.
- [5] Zhang W W, Zhao T H, Wang M Y, *et al.* Effects of elevated ozone concentration on *Ginkgo biloba* photosynthesis. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(5):645—649.
- [6] Wu L Y, Wang X X, Chen D J, *et al.* Study of SO₂ on photosynthetic and respiratory intensity in crop. *Agric Environ Protect*, 1989, 8(2):9—12.
- [7] Peng C L, Lin Z F, Chen Y Z, *et al.* Effects of SO₃²⁻ and HCO₃⁻ on chlorophyll fluorescence in *Dunaliella salina*. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 1998, 62(2):117—123.
- [8] Ma S H, Wang Q C, Li Y Z. Effects of automobile exhaust on chlorophyll fluorescence characters of four northern deciduous trees. *Journal of Ecology*, 2005, 24(1):15—20.
- [9] Li M, Ma H C, Li F X, *et al.* Effects of urban air pollution on air exchange behavior and chlorophyll fluorescence in leaves of *Parakmeria yunnanensis* seedlings. *Journal of Northwest Forestry University*, 2005, 20(2):46—50.
- [10] Wen X, Kong G H, Peng C L, *et al.* Air pollution monitoring by plants and plant resistance. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, 11(4):348—357.
- [11] Gardening Bureau of Beijing Municipality. General investigation of landscaping and greening of Beijing. Beijing: Beijing Press, 2000. 524—525.
- [12] Gao J F. Experimental Guidance for Plant Physiology. Beijing: Higher Education Press, 2006. 74—77.
- [13] Li H S. Modern Plant Physiology. Beijing: Higher Education Press, 2002. 76—78.
- [14] Betsy M. Suffocating trees. London: New Scientist, 2002. 174:11.
- [15] Wen D Z, Lu Y D, Kuang Y W, *et al.* Ecophysiological responses and sensitivity of 39 woody species exposed to air pollution. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, 11(4):341—347.
- [16] Wen D Z, Kong G H, Zhang D Q, *et al.* Ecophysiological responses of 30 gardens plant species exposed to short-term air pollution. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2003, 27(3):311—317.
- [17] Wu L Y. Study of SO₂ on photosynthetic and respiratory intensity in crop. *Agric Environ Protect*, 1989, 8(2):9—12.
- [18] Shu J M, Chao H F, Liu Y Y, *et al.* Effects of long-term exposure of low concentration SO₂ on the growth and yield of soybean. *Journal of Ecology*, 1990, 9(6):28—30.
- [19] Yan R C, Zhu Z B. Declining of *Pinus massoniana* in relation to air pollution in Dashengshan. Lengshuijiang, Hunan. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1996, 20(3):207—215.
- [20] Su X, Hu D Q, Lin Z F, *et al.* Effect of air pollution on the chlorophyll fluorescence characters of two afforestation plants in Guangdong. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2002, 26(5):599—604.
- [21] He Y H, Guo L S, Tian Y L. Photosynthetic rates and chlorophyll fluorescence of *Nitraria tangutorum* at different leaf water potentials. *Acta Bot. Boreo1.-Occident. Sin*, 2005, 25(11):2226—2233.
- [22] Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 16(4):444—448.
- [23] Wang K B, Xu C H, Zhao F H, *et al.* The effects of water stress on some in vivo chlorophyll a fluorescence parameters of wheat leaves. *Acta Biophysica Sinica*, 1997, 13(2):273—278.
- [24] Bader M R, Ruuska S, Nakano H. Electron flow to oxygen in higher plants and algae: rates and control of direct photoreduction (Mehler reaction) and rubisco oxygenase. *Biological Sciences*, 2000, 1402:1433—1445.
- [25] Li X, Feng W, Zheng X C. Advances in chlorophyll fluorescence analysis and its uses. *Acta Bot. Boreo1.-Occident. Sin*, 2006, 26(10):186—2196.
- [26] Lin Z F, Peng C L, Lin G Z. The modulation of PSII photochemical activity by carbon metabolic intermediates and photosynthetic electron transport under photooxidation conditions. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2005, 13(1):1—7.
- [27] Shimazaki K, Sugahara K. Specific inhibition of photosystem II. Activity in chloroplasts by fumigation of spinach leaves with SO₂. *Plant and Cell Physiology*, 1979, 20:947—955.

参考文献:

- [1] 冯兆忠, 王效科, 郑启伟, 等. 油菜叶片气体交换对 O₃ 浓度和熏蒸方式的响应. *生态学报*, 2006, 26(3):823—829.

- [3] 廖建雄,王根轩. 干旱、CO₂和温度升高对春小麦光合、蒸发蒸腾及水分利用效率的影响. 应用生态学报,2002,13(5):547~550.
- [4] 云建英,杨甲定,赵哈林. 干旱和高温对植物光合作用的影响机制研究进展. 西北植物学报,2006,26(3):0641~0648.
- [5] 张巍巍,赵天宏,王美玉,等. 臭氧浓度升高对银杏光合作用的影响. 生态学杂志,2007,26(5):645~649.
- [6] 吴丽英,王晓霞,陈德金,等. 二氧化硫对作物光合强度和呼吸强度影响的研究. 农业环境保护,1989,8(2):9~12.
- [7] 彭长连,林植芳,陈贻竹,等. 强光下 SO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 对盐藻叶绿素荧光的影响. 热带亚热带植物学报,1998,62(2):117~123.
- [8] 马树华,王庆成,李亚藏. 汽车尾气对四种北方阔叶树叶叶绿素荧光特性的影响. 生态学杂志,2005,24(1):15~20.
- [9] 黎明,马焕成,李复秀,等. 城市大气污染对云南拟单性木兰苗期气体交换及叶绿素荧光的影响. 西北林学院学报,2005,20(2):46~50.
- [10] 温学,孔国辉,彭长连,等. 植物监测大气污染及其抗性. 热带亚热带植物学报,2003,11(4):348~357.
- [11] 北京市园林局. 北京市城市园林绿化普查资料汇编. 北京:北京出版社,2000. 524~525.
- [12] 高俊凤. 植物生理学实验指导. 北京:高等教育出版社,2006. 74~77.
- [13] 李合生. 现代植物生理学. 北京:高等教育出版社,2002. 76~78.
- [15] 温达志,陆耀东,旷远文. 39种木本植物对大气污染的生理生态反应与敏感性. 热带亚热带植物学报,2003,11(4):341~347.
- [16] 温达志,孔国辉,张德强. 30种园林植物对短期大气污染的生理生态反应. 植物生态学报,2003,27(3):311~317.
- [17] 吴丽英,王晓霞,陈德金,等. 二氧化硫对作物光合强度和呼吸强度影响的研究. 农业环境保护,1989,8(2):9~12.
- [18] 舒俭民,曹洪法,刘燕云,等. 长期低浓度 SO₂ 对大豆生长和产量的影响. 生态学杂志,1990,9(6):28~30.
- [19] 严荣昌,朱忠保. 湖南省冷水江市大嵎山大气污染与马尾松衰亡. 植物生态学报,1996,20(3):207~215.
- [20] 苏行,胡迪琴,林植芳,等. 广州市大气污染对两种绿化植物叶绿素荧光特性的影响. 植物生态学报,2002,26(5):599~604.
- [21] 何炎红,郭连生,田有亮. 白刺叶不同水分状况下光合速率及其叶绿素荧光特性的研究. 西北植物学报,2005,25(11):2226~2233.
- [22] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论. 植物学通讯,1999,16(4):444~448.
- [23] 王可玢,许春辉,赵福洪,等. 水分胁迫对小麦旗叶某些体内叶绿素 a 荧光参数的影响. 生物物理学报,1997,13(2):273~278.
- [25] 李晓,冯伟,曾晓春. 叶绿素荧光分析技术及应用进展. 西北植物学报,2006,26(10):186~196.
- [26] 林植芳,彭长连,林桂珠. 光氧化条件下碳代谢中间产物与光合电子传递对 PS II 光化学活性的调节作用. 热带亚热带植物学报,2005,13(1):1~7.