

大气污染物与绿化植物光合速率的关系研究

彭立¹, 杨振乾¹, 刘敏敏², 黄满红^{2*}, 张翠翠², 杜勇立¹

1. 湖南省交通规划勘察设计院, 湖南 长沙 410008; 2. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620

摘要: 为了研究大气环境污染物与绿化植物光合速率的相关关系, 以鸢尾 (*Iris tectorum*)、黄鑫 (*Jasminum mesnyi* Hance)、山茶 (*Camellia japonica*)、无患子 (*Sapindus mukorossi* Gaertn)、红叶李 (*Prunus cerasifera* cv. *Pissardii*)、复羽叶栾树 (*Koelreuteria bipinnata* Franch) 和三叶草 (*Trifolium*) 等7种常见绿化植物为研究对象, 分析了绿化植物的光合速率及其叶片中有机酸浓度, 同时采用 SEM 对其叶面结构进行了表征, 并考察了大气环境污染物浓度, 探讨了大气污染物和绿化植物光合速率之间的关系, 以期在城市绿化提供理论参考。结果表明: 所选择的7种绿化植物中, 复羽叶栾树的光合速率最大, 达到 $11.85 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 三叶草的光合速率最小, 最大仅为 $4.99 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。所测植物中三叶草的草酰乙酸含量最高, 值为 $277.64 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。光合速率对草酰乙酸的浓度产生显著影响, 与草酰乙酸呈显著负相关关系, 与乙醛酸、 α -酮戊二酸和丙酮酸的相关关系不显著, 光合速率可以作为叶片中草酰乙酸的指示指标。 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 、 SO_2 、 NO_2 浓度与无患子和三叶草的光合作用显著相关, 和另外5种植物没有相关性, 说明 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 、 SO_2 、 NO_2 对这3种植物影响较大, 而其它5种植物的耐受性较好。复羽叶栾树的气孔比三叶草的气孔多且大, 导致了其光合速率较大, 同时也说明叶面表面结构和气孔形状可能是导致环境污染因子致敏的原因。从绿化植物的净光合作用和耐污能力方面综合选择, 这7种绿化植物中, 宜选取复羽叶栾树作为绿化植物。

关键词: 大气环境; 光合作用; 相关关系; 绿化植物

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.07.014

中图分类号: X171.5

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2015) 07-1166-05

引用格式: 彭立, 杨振乾, 刘敏敏, 黄满红, 张翠翠, 杜勇立. 大气污染物与绿化植物光合速率的关系研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(7): 1166-1170.

PENG Li, YANG Zhenqian, LIU Minmin, HUANG Manhong, ZHANG Cuicui, DU Yongli. Relationship between Net Photosynthetic Rate of Green Plants and Air Pollutants [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(7): 1166-1170.

绿化植物能够利用光合作用去除二氧化碳, 产生氧气, 但其所生长的大气环境因子对植物的光合作用的影响尤为关键 (Ow et al., 2011; Rai et al., 2014; 廖莉团等, 2014)。在工农业高速发展的同时, 大气环境质量恶化, 大大的影响了绿化植物的生长以及其光合作用的进行。目前有研究发现, 一些园林绿化植物对大气中污染物有净化能力 (Mori et al., 2015; Nazrul et al., 2012; Watmough et al., 2014), 同时, 大气污染物也会对植物的生理生态指标产生影响 (Spoonner, 2005; Djingova et al., 2003; 杜敏华等, 2007; 张德强等, 2003; 赵磊, 2013)。但是植物对大气环境污染物的耐受能力和适应性千差万别, 对环境因子变化的响应也各不相同, 对大气环境质量因子对植物光合作用的影响及其作用机制尚缺乏研究 (陈月华等, 2012; 王海珍等, 2015)。乙醛酸、草酰乙酸、 α -酮戊二酸及丙酮酸等有机酸是植物光呼吸和暗呼吸代谢中的重要

中间产物, 并且在代谢调控中起关键作用 (Mucha et al., 2010), 叶片中的有机酸与光合速率是否存在一定的相关性还有待验证。

本文选取常用的绿化植物为研究对象, 分析大气环境因子对光合作用速率的影响, 比较了不同植物对大气污染敏感性的差异, 建立大气环境因子和绿化植物净光合速率及有机酸含量的相互作用机制, 为绿化植物的选择提供基础依据。

1 实验材料与方法

1.1 材料方法

实验区域: 实验区属北亚热带季风气候, 温和湿润, 四季分明。年平均气温 $15.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 最高气温 $38.2 \text{ }^\circ\text{C}$, 最低气温零下 $10.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 无霜期 230 d。年平均降水量 1103.2 mm , 雨日 137 d。6—7 月有梅雨, 平均 20 d 左右。夏秋常有台风过境, 平均每年 1.5 次。

大气环境因子选择: 某区公布的大气环境因

基金项目: 交通部运输部科技项目 (2010-353-343-290); 湖南省交通科技项目 (200908; 201105)

作者简介: 彭立 (1968 年生), 教授级高级工程师, 研究方向为低碳公路

*通信作者. 黄满红, E-mail: eggmh@163.com

收稿日期: 2015-03-09

子, 包括 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂ 和臭氧。

植物选择: 对该区公路现有的植物种类进行实地调查, 选择了该区绿化中使用频度较高的植物, 分别为鸢尾 (*Iris tectorum*)、黄鑫 (*Jasminum mesnyi Hance*)、山茶 (*Camellia japonica*)、无患子 (*Sapindus mukorossi Gaertn*)、红叶李 (*Prunus ceraifera cv. Pissardii*)、复羽叶栾树 (*Koelreuteria bipinnata Franch*) 和三叶草 (*Trifolium*) 7 种绿化植物。

1.2 光合速率的测定

采用美国 Li-Cor 公司生产的 Li-6400 便携式光合仪进行测量。选择 3—5 月晴朗、无风的天气情况下, 在自然光照条件下, 从早 8:00—18:00 每隔 2 h 测量一次。每次每个树种选健康植株 3 株, 随机选取树木的向阳面中部的 3~5 片叶进行测定, 待系统稳定后, 测定其光合速率值。

1.3 有机酸测定

酮酸与盐酸苯肼可以形成苯腙, 形成的苯腙类物质在 320 nm 处有吸收峰, 因此可以利用高效液相色谱法测定有机酸的成分。

样品的制备: 称取新鲜叶片 0.5 g, 加入 1.0 mL 0.65 mol·L⁻¹ HCl (含 0.1 mmol·L⁻¹ EDTA·2Na) 和少量石英砂充分研磨, 再加入 2.5 mL H₂O 使之形成匀浆。把匀浆液转入 5 mL 离心管, 于 80 °C 水浴中加热 10 min (中间摇动 2~3 次), 再冰浴 5 min, 最后冷冻离心 (12 000 r·min⁻¹, 10 min)。上清液过 0.45 μm 滤膜, 滤液转入 1.5 μm EP 管放置于冰上待用。分别取 50 μL 滤液于 0.5 mL EP 管中, 依次加入 25 μL 0.2 mol·L⁻¹ NaOH、40 μL 10 mmol·L⁻¹ 的盐酸苯肼、35 μL 0.1 mol·L⁻¹ 磷酸缓冲液 (pH=7.0), 室温下反应 20 min 取样测定。不同的植物加 NaOH 的量可作适当调整, 以保证最后混合液的 pH 在 6.8~7.4 之间, 这是酮酸与盐酸苯肼形成苯腙的最适 pH 范围 (Watmough et al., 2014; 杜敏华等, 2007), 重复测定 3 次。

测定条件: 色谱柱: CNW Athena C18 (250 mm×4.6 mm, 5 μm), 流动相是 A : B=90 : 10 (A: 磷酸缓冲液 13 mmol·L⁻¹ KH₂PO₄, 1 mmol·L⁻¹ K₂HPO₄, pH=6.0; B: 100%甲醇)。紫外检测波长 320 nm; 进样量 20 μL; 流速 1.0 mL·min⁻¹。

1.4 叶面形态分析

试验仪器主要 Quanta-250型冷场发射扫描电镜。在叶脉两侧的中部将新鲜叶片切成边长约5 mm 的小方块, 立即用 w=2.5%戊二醛溶液进行固定4 h; 然后用0.1 mol 的磷酸缓冲液冲洗4次, 每次20 min; 然后采用 w=30%乙醇 (2次, 每次10 min)、w=50%乙醇 (2次, 每次10 min)、w=70%乙醇 (1次, 浸泡过夜), w=90%乙醇 (1次, 每次15 min) 和 w=100%

乙醇 (1次, 15 min) 进行脱水; 脱水后在乙酸异戊酯中置换2次, 每次10~15 min; 置换后临界点干燥3 h, 待小瓶内的冰晶挥发后取出粘台; 最后在 Quanta-250型冷场发射扫描电镜上观察。

2 结果与分析

2.1 区域大气环境因子变化情况

对实验区域空气质量实时发布系统的小时环境因子数据进行统计后可得图 1。

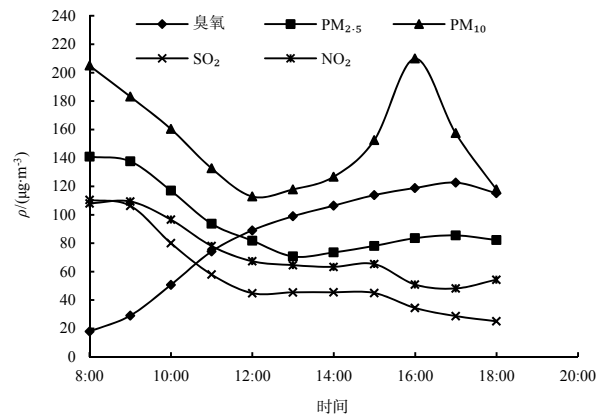


图 1 空气质量随时间的变化

Fig. 1 Changes of Air quality in a whole day

该区域当天 24 h PM₁₀ 浓度为 137.1 μg·m⁻³, 低于环境空气质量标准 (GB 3095—2012) 二级标准要求的 150 μg·m⁻³, 24 h PM_{2.5} 浓度为 89.3 μg·m⁻³, 高于环境空气质量标准 (GB 3095—2012) 二级标准要求的 75 μg·m⁻³。臭氧、SO₂ 和 NO₂ 的浓度均低于环境空气质量标准 (GB 3095—2012) 二级标准限值要求。臭氧浓度从早晨开始逐渐上升, 至下午 5 时后逐渐下降。PM_{2.5}、SO₂ 和 NO₂ 的浓度却是在早上 8 时较高, 随后逐渐平缓。PM₁₀ 在下午 4 时左右有波峰。

2.2 植物的光合速率及其叶片有机酸含量特征

所选 7 种绿化植物的光合速率从 8 时到 18 时的变化规律见图 2。

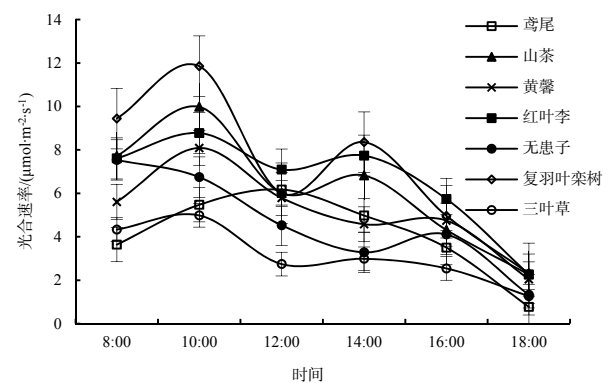


图 2 植物的光合速率变化曲线图

Fig. 2 Diurnal changes of net photosynthetic rate of 7 selected plants

表1 植物叶片中几种酮酸的含量测定
Table 1 Content of several keto-acids in the leaves of plants

植物名称	草酰乙酸含量	乙醛酸含量	α -酮戊二酸含量	丙酮酸含量
鸢尾	29.67±0.03	8.53±0.08	52.73±2.41	2.56±0.07
复羽叶栎树	11.74±0.23	17.59±0.25	9.67±1.12	3.47±0.14
三叶草	277.64±0.03	5.97±0.15	19.58±0.74	8.89±0.26
红叶李	10.30±0.16	6.63±0.18	63.23±1.57	9.78±0.62
山茶	2.34±0.13	13.14±0.51	18.54±0.23	5.50±0.02
黄馨	58.06±1.69	3.36±0.03	14.24±0.36	6.42±0.03
无患子	5.71±0.02	36.02±1.54	5.41±0.34	11.43±0.25

$n=3$

在实验中, 鸢尾的光合速率日变化曲线呈单峰, 在 12:00 左右出现峰值 $6.17 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。其他 6 种测试植物的光合速率日变化曲线均呈双峰曲线。复羽叶栎树的净光合速率明显高于其他植物, 复羽叶栎树在 10:00 左右达到第一个峰值, 值为 $11.85 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 第二个峰值都是在下午 14:00 左右出现, 值是 7.9 和 $8.36 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 在 12:00 时净光合速率值明显下降。三叶草的净光合速率明显低于其他植物, 相较于其他植物而言在测定的一天中变化幅度是最小的, 变化值仅有 $3.72 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

所测植物的有机酸含量见表 1。由表 1 可知, 所测植物中三叶草的草酰乙酸含量最高, 值为 $277.64 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。而乙醛酸的测定中无患子的含量最高, 值为 $36.02 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 红叶李中 α -酮戊二酸的含量最高, 值为 $63.23 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 含量最低的植物是复羽叶栎树, 值是 $9.67 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。丙酮酸的含量最高的植物是无患子, 最低的植物是鸢尾, 值分别为 11.43 和 $2.56 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

2.3 植物的光合速率、有机酸及其与大气环境因子相关关系分析

采用 SPSS 软件, 分析各测试植物的净光合速率和有机酸的相关关系, 结果如表 2 所示。

表2 各测试植物的净光合速率和有机酸的相关关系
Table 2 Relationship between diurnal changes of net photosynthetic rate and organic acids

相关系数	草酰乙酸	乙醛酸	α -酮戊二酸	丙酮酸	净光合速率
草酰乙酸	1				
乙醛酸	0.390	1			
α -酮戊二酸	0.162	0.202	1		
丙酮酸	0.194	0.339	0.066	1	
净光合速率	-0.815*	0.126	0.563	0.313	1

* $P<0.05$

从表 2 中可以看到, 净光合速率与草酰乙酸呈显著负相关关系, 与其它 3 种有机酸的相关关系不显著。说明在所测试植物当中, 净光合速率对草酰乙酸的浓度产生显著影响, 净光合速率可以作为叶片中草酰乙酸的指示指标。

同时对各测试植物的净光合速率和各环境因子的相关关系进行了分析, 结果如表 3 所示。

表3 各测试植物的净光合速率和各环境因子相关性分析
Table 3 Relationship between diurnal changes of net photosynthetic rate and environmental factors

相关系数	PM _{2.5}	O ₃	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂
鸢尾	0.065	-0.266	-0.093	0.309	0.306
山茶	0.618	-0.735	0.218	0.776	0.791
黄馨	0.531	-0.614	0.292	0.633	0.660
红叶李	0.435	-0.578	0.232	0.661	0.630
无患子	0.864*	-0.890*	0.602	0.918**	0.898*
复羽叶栎树	0.644	-0.740	0.279	0.798	0.800
三叶草	0.875	-0.829*	0.440	0.870*	0.873*

** $P<0.01$, * $P<0.05$

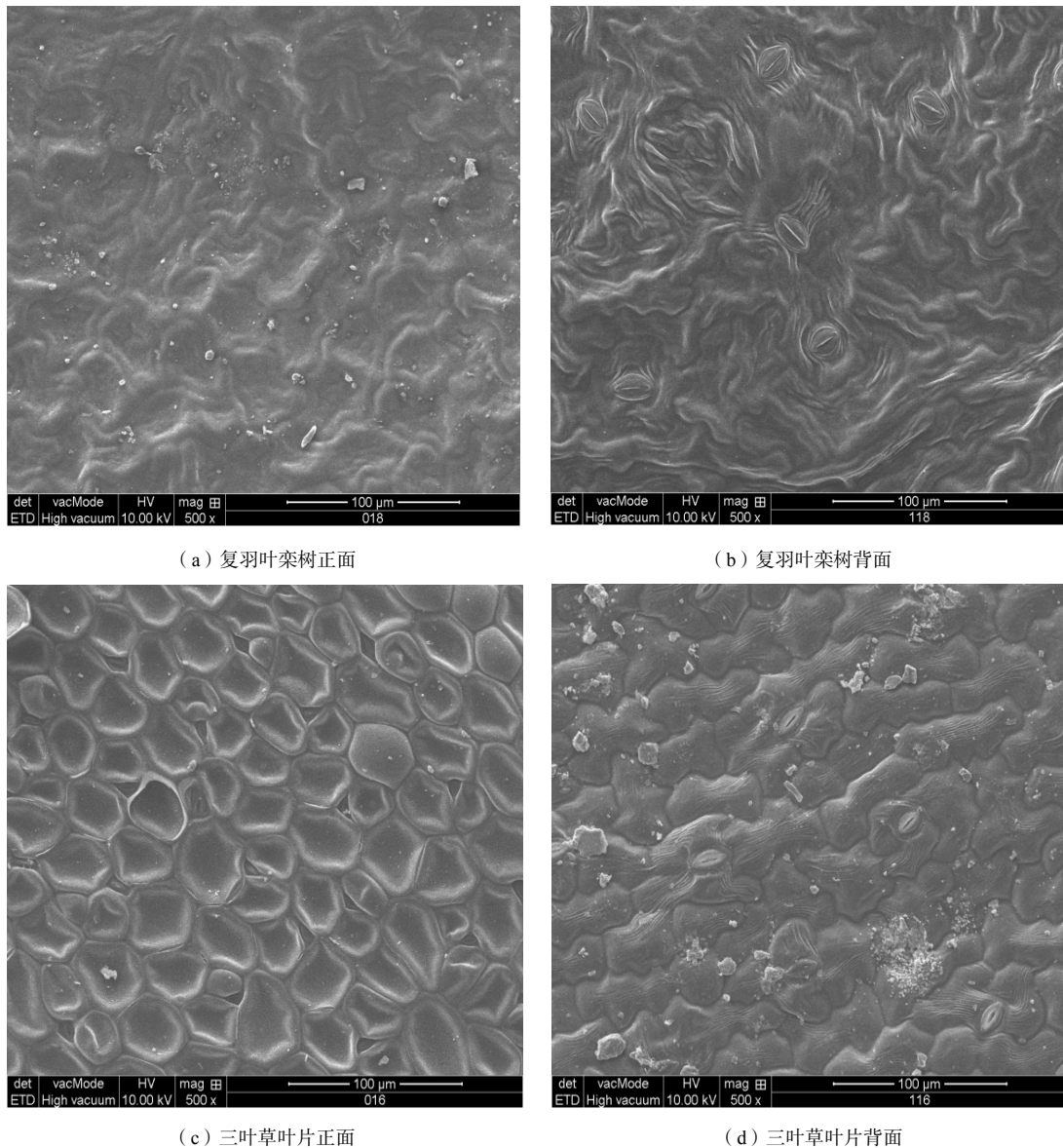
由表 2 可知, 臭氧与植物光合速率的相关性系数是负值, 与无患子的净光合速率呈负相关。植物的光合速率与 SO₂、NO₂ 的相关系数均是正值, 但是相关系数的值大多大于 0.5, 具有一定正相关性, 与 PM_{2.5}、PM₁₀ 的相关系数除个别植物外为正值, 但是相关系数的值都较小, 相关性较低。从表 2 也可看出, PM₁₀ 对植物净光合速率基本没有影响, PM_{2.5} 对无患子的净光合作用有显著影响, O₃、SO₂、NO₂ 浓度和无患子和三叶草的净光合作用显著相关, 和另外 5 种植物没有相关性, 说明 O₃、SO₂、NO₂ 对这 3 种植物影响较大, 而其它 5 种植物的耐受性较好。

为了进一步研究其叶片结构对环境因子的响应关系, 对复羽叶栎树和三叶草的叶片正面和背面进行 SEM 分析, 得到扫描图像见图 3 所示。

从图 3 可以看到, 复羽叶栎树的叶面比三叶草叶片纹路少, 三叶草呈蜂窝状, 复羽叶栎树的气孔比三叶草的气孔多且大, 导致了其光合速率较大, 同时也说明叶面表面结构和气孔形状可能是导致环境污染因子致敏的原因(王晓东等, 2013)。

3 结论与建议

(1) 所选择的 7 种绿化植物中, 复羽叶栎树的光合速率最大, 三叶草的净光合速率最小。光合速率可以作为叶片中草酰乙酸的指示指标。



(a) 复羽叶栎树正面

(b) 复羽叶栎树背面

(c) 三叶草叶片正面

(d) 三叶草叶片背面

图3 复羽叶栎树和三叶草叶片 SEM 图

Fig. 3 SEM images of *Koelreuteria bipinnata* Franch and *Trifolium*

(2) $PM_{2.5}$ 、 O_3 、 SO_2 和 NO_2 对无患子的净光合作用有显著影响， PM_{10} 对所选植物基本没有影响，复羽叶栎树、红叶李、山茶、黄馨和鸢尾的净光合作用与 $PM_{2.5}$ 、 O_3 、 SO_2 和 NO_2 基本不相关。从绿化植物的净光合作用和耐污能力方面综合选择，宜选取复羽叶栎树作为绿化植物。

参考文献：

MUCHA A P, ALMEIDA C M R, BORDALO A, et al. 2010. LMWOA (low molecular weight organic acid) exudation by salt marsh plants [J]. Natural variation and response to Cu contamination, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 36(2): 204-207.

MORI J, HANSLIN H M, BURCHI G, et al. 2015. Particulate matter and element accumulation on coniferous trees at different distances from a highway [J]. Urban Forestry and Urban Greening, 14(1): 170-177.

OW L F, YEO T Y, SIM E K. 2011. Identification of drought-tolerant plants

for roadside greening—An evaluation of chlorophyll fluorescence as an indicator to screen for drought tolerance [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 10(3): 177-184.

NAZRUL ISLAM M, RAHMAN K S, MEZBUAL BAHAR M, et al. 2012. Pollution attenuation by roadside greenbelt in and around urban areas [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 11(4): 460-464.

SPOONER P G. 2005. Response of Acacia species to disturbance by road works in roadside environments in southern New South Wales [J]. Biological Conservation, 122(2): 231-242.

RAI P K, CHUTIA B M, PATIL S K. 2014. Monitoring of spatial variations of particulate matter (PM) pollution through bio-magnetic aspects of roadside plant leaves in an Indo-Burma hot spot region [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 13(4): 761-770.

DJINGGOVA R, KOVACHEVA P, WAGNER G, et al. 2003. Distribution of platinum group elements and other traffic related elements among different plants along some highways in Germany [J]. Science of the Total Environment, 308(1-3): 235-246.

WATMOUGH A, MCDONOUGH A M, RANEY S M. 2014. Characterizing

- the influence of highways on springtime NO₂ and NH₃ concentrations in regional forest monitoring plots [J]. *Environmental Pollution*, 190: 150-158.
- 陈月华, 廖建华, 覃事妮. 2012. 长沙地区 19 种园林植物光合特性及固碳释氧测定[J]. *中南林业科技大学学报*, 32(10): 116-120.
- 杜敏华, 张乃群, 李玉英, 等. 2007. 大气污染对城市绿化植物叶片叶绿素含量的影响[J]. *中国环境监测*, 23(2): 86-90.
- 廖莉团, 苏欣, 李小龙, 等. 2014. 城市绿化植物滞尘效益及滞尘影响因素研究概述[J]. *森林工程*, 30(2): 24-28.
- 王海珍, 韩路, 徐雅丽, 等. 2015. 不同温度下灰胡杨叶片气孔导度对光强响应的模型分析[J]. *生态环境学报*, 24(5): 741-748.
- 王晓东, 聂剑文, 商侃侃. 2013. 污泥施用对 4 种绿化植物叶片性状和光合作用的影响[J]. *中国农学通报*, 29(13): 44-50.
- 张德强, 褚国伟, 余清发, 等. 2003. 园林绿化植物对大气二氧化硫和氟化物污染的净化能力及修复功能[J]. *热带亚热带植物学报*, 11(4): 336-340.
- 赵磊. 2013. 大气 NO₂ 污染下园林植物的光谱特征及光合特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学: 35-50.

Relationship between Net Photosynthetic Rate of Green Plants and Air Pollutants

PENG Li, YANG Zhenqian, LIU Minmin, HUANG Manhong, ZHANG Cuicui, DU Yongli

College of environmental science and engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: The photosynthetic rates (PR) and organic acids of *Iris tectorum*, *Jasminum mesnyi* Hance, *Camellia japonica*, *Sapindus mukorossi* Gaertn, *Prunus ceraifera* cv. *Pissardii*, *Koelreuteria bipinnata* Franch and *Trifolium* were investigated. The surface structures of these plants leaves were determined by SEM and concentrations of air pollutants were also acquired to compare the relationship between PR and air pollutants. Results showed that PR of *Koelreuteria bipinnata* Franch is the highest (11.85 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) of the seven selected plants and *Trifolium* is the lowest (4.99 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Of all the selected plants, oxalacetic acid in *Trifolium* is the highest and attains 277.64 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. PR plays a big role in producing oxalacetic acid and they has a significant relationship with each other, but the relationship between PR, glyoxylic acid, α -Ketoglutaric acid and acetylformic acid is insignificant. PR can be indexed by oxalacetic acid. PM_{2.5}, O₃, SO₂ and NO₂ has significant impact on the PR of *Sapindus mukorossi* Gaertn and *Trifolium*. But the other five plants are more tolerant of these pollutants. Leaf pores of *Koelreuteria bipinnata* Franch is bigger than that of *Trifolium*, which may cause increase of PR. It also indicates surface structure and shape of microscopic pores in the leaves may resulted in the tolerance of pollutants. *Koelreuteria bipinnata* Franch can be chosen as the suitable green plant among the seven selected plants for its PR and tolerance. The results can supply a scientific basis for green planting.

Key words: atmospheric environment; photosynthesis; correlation; green plants