

# 河北省大气污染对不同绿化植物生理生态特性的影响

王会京, 谢宇光, 王红霞

(邢台学院, 河北 邢台 054001)

**摘要:**以常见的4种城市绿化植物为研究对象,从叶片生理生态特性及荧光特性多个方面研究了河北省5个城市大气监测点的绿化植物叶片生理生态特性及叶绿素荧光特性的差别。综合污染指数表明:5个主要城市监测点污染程度由大到小的顺序是:石家庄>邢台>邯郸>唐山>张家口,并且SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>浓度均呈逐年增加的趋势,相同年份SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>浓度基本表现为:石家庄>邢台>邯郸>唐山>张家口,局部有所波动。不同绿化植物叶片类胡萝卜素和叶绿素含量大小排序为:榆叶梅>香樟>合欢>洋白蜡;不同绿化植物叶片细胞膜渗透率大小的排序为:洋白蜡>合欢>香樟>榆叶梅;不同绿化植物叶片可溶性蛋白和可溶性糖含量呈现出一致的变化规律,均表现为榆叶梅和合欢高于洋白蜡和香樟;游离脯氨酸和丙二醛含量呈现出一致的变化规律,均表现为榆叶梅和合欢低于洋白蜡和香樟,由此说明洋白蜡和香樟受大气污染较为严重。不同绿化植物叶片F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>,F<sub>v</sub>/F<sub>o</sub>,qP和ΦPSII大小基本为合欢和榆叶梅高于洋白蜡和香樟,不同绿化植物叶片qN大小基本为洋白蜡和香樟高于合欢和榆叶梅,不同绿化植物叶片qP差异不显著( $p>0.05$ )。外源SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和MV光照处理5d,不同绿化植物叶片之间反应的差距增大,洋白蜡和香樟的细胞膜渗透率甚为严重,由此表明合欢和榆叶梅对大气污染的耐受力较强,洋白蜡和香樟则较为敏感,对大气污染的耐受力较低。因此,控制污染源的排放是控制河北省乃至全国大气污染加剧和改善城市绿化景观的重要措施,需要给予极大的关注。

**关键词:**河北省;大气污染;绿化植物;生理生态特性

中图分类号:X171;Q143

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)03-0170-07

## Impacts of Air Pollution on Physiological and Ecological Characteristics of Urban Green Plants in Hebei Province

WANG Huijing, XIE Yuguang, WANG Hongxia

(Xingtai University, Xingtai, Hebei 054001, China)

**Abstract:** Physiological and ecological impacts on four urban green plants in differently air polluted cities in Hebei Province were compared by using the modulated chlorophyll fluorometer (PAM Fluorometer). The results were as follows. The sequence of integrate pollution index was Shijiazhuang>Xingtai>Handan>Tangshan>Zhangjiakou, and the concentrations of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> were increasing year by year, which showed the order: Shijiazhuang>Xingtai>Handan>Tangshan>Zhangjiakou in the same year. The carotenoid and chlorophyll contents of urban green plants showed the sequence: *Prunus triloba*>*Cinnamomum camphora*>*Albizia julibrissin*>*Fraxinus chinensis*, and the cell membrane penetration urban green plants showed the order: *Prunus triloba*<*Cinnamomum camphora*<*Albizia julibrissin*<*Fraxinus chinensis*. The soluble protein and soluble sugar contents in *Prunus triloba* and *Albizia julibrissin* were higher than those in *Cinnamomum camphora* and *Fraxinus chinensis*. The free proline and malondialdehyde contents were lower in *Prunus triloba* and *Albizia julibrissin* than those in *Cinnamomum camphora* and *Fraxinus chinensis*, which indicated that *Cinnamomum camphora* and *Fraxinus chinensis* were more seriously affected by the air pollution. F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>, F<sub>v</sub>/F<sub>o</sub>, qP and ΦPSII of *Prunus triloba* and *Albizia julibrissin* were higher than those of *Cinnamomum camphora* and *Fraxinus chinensis*, and qN of *Prunus triloba* and *Albizia julibrissin* were lower than those of *Cinnamomum camphora* and *Fraxinus chinensis*, and qN had no significant difference ( $p>0.05$ ). When the module SO<sub>2</sub> and oxidative stresses were conducted by treating the leaves of these four plants with 5 mmol/L NaHSO<sub>3</sub> or 10 μmol/L methyl viologen, the same pronounced increase in cell membrane leak-

收稿日期:2016-05-17

修回日期:2016-06-24

资助项目:河北省高等学校科学研究项目:《基于北方雾霾城市景观优化构建下的植物群落多样性研究》(Z2015088);邢台市社会科学规划项目:《基于景观规划视角下的乡村旅游发展研究—以邢台县白岸乡为例》(XTSK1551);河北省社会科学基金项目:《区域生态水资源保护与景观效益研究—以邢台为例》(HB15YS014)

第一作者:王会京(1973—),男,河北磁县人,硕士,讲师,主要从事生态环境研究与设计。E-mail:Huijing\_wang73@163.com

age rate and degradation of chlorophyll were observed. The results indicated that *Cinnamomum camphora* and *Fraxinus chinensis* cell membrane penetration were very serious, *Cinnamomum camphora* and *Fraxinus chinensis* were sensitive to air pollution and had a lower tolerance to air pollution. So, controlling the sources of pollution emission was the key to control the air pollution in Hebei Province and even the whole country, and important measures must be given great attention to improve urban greening landscape.

**Keywords:** Hebei Province; air pollution; green plants; physiological and ecological characteristics

绿化植物是城市生态环境建设的主体和城市—自然—景观复合生态系统中具有重要自净功能的组成部分,对大气中的粉尘、颗粒物有过滤、阻挡和吸附作用,在改善生态环境、减少阳光辐射、增大空气湿度、净化空气、调节气候等方面起着“除污吐新”的作用<sup>[1-2]</sup>。为了建立良好生态循环的城市生态系统,需要清楚城市绿化植物与环境相互作用的关系,尤其是绿化植物叶片生理特性对环境变化的响应<sup>[3]</sup>。近年来,大气污染已成为影响人类健康的主要环境危害之一,城市大气污染中的可吸入颗粒物已被公认为是对人体健康危害最大的污染物,成分复杂且在环境空气中持续时间长和影响范围广,在城市发展进程中给人类带来了新的生存危机<sup>[4-5]</sup>。从全球范畴来看,由各种污染源排放出来的大气污染物及其次生产物对生物有机体的生命活动已产生了不可忽视的影响,全球至少有一半以上的城市人口生活在大气污染环境之中<sup>[6]</sup>。随着我国大范围灰霾天气的增多,越来越多的公众开始关注大气污染,我国大、中、小城市通过交通网、资源网和社会经济紧密相连,各种污染相互耦合叠加,大气环境污染问题日益突出,严重损害人们的身体健康,并且成为制约社会经济发展的瓶颈<sup>[7]</sup>。

河北省作为我国的大型省份,近年来经济迅猛发展。随着机动车辆的快速增长,大气污染已经成为城市污染的主要问题,可吸入颗粒物中细颗粒的含量不断增加,城市空气混浊,雾日增加,严重威胁着城市居民的身体健康和城市生态环境,从2013年1月开始,由国家环保部公布的74个环保重点城市空气质量状况报告显示,空气质量最差的10个城市中河北省每月均占一半以上。了解在大气污染环境条件下,城市绿化植物的生理特性变化,对于阐明城市大气污染的生物效应具有现实意义,并可为深入探讨大气污染对植物的伤害和植物的抗性机理提供部分依据<sup>[8-9]</sup>。以叶绿素荧光为探针来研究植物对变化的环境条件的响应,由于其对样品无破坏性,反应灵敏,测定快速,已在植物环境生理研究中被广泛应用。这种指标的变化出现于表现损伤症状和生长指标改变之前,具有明显的优点和可预测性<sup>[10-11]</sup>。为此,本文选用河北省几个不同污染程度的有代表性的城市,以常见的4种城市绿化植物为研究对象,从叶片生理生态特性及荧光特性多个方面研究大气污染对植物的影响,为河北省乃至全国范围内大气环境质量的评价提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

河北省地处北纬 $36^{\circ}05'$ — $42^{\circ}37'$ 、东经 $113^{\circ}11'$ — $119^{\circ}45'$ 。东临渤海,东北部与辽宁省接壤,北部和西北部同内蒙古自治区相连,西部与山西相邻,南部和东南部与河南、山东两省相接,中部与北京市、天津市毗连,全省面积 $190\ 379\text{ km}^2$ 。属暖温带大陆性季风气候,四季分明,冬季寒冷多风干燥,夏季炎热多雨,春季干旱风沙盛行,秋季晴朗少风,寒暖适中。南北纬差 $6^{\circ}32'$ ,太阳高度角在一年中变化很大,实际日照时数达 $2\ 500\sim 3\ 100\text{ h}$ ,为可照时数的 $58\%\sim 66\%$ ,年辐射总量比长江流域每 $1\text{ cm}^2$ 多 $9.21\sim 10.89\times 10^4\text{ J}$ ,是全国光照较多的地区,春季日照总量迅速增加,温度上升较快,夏季受太平洋副热带高压控制,多刮东南风,与冷空气相遇时常致大雨,7—8月降水最多,占年降水量的 $60\%$ ,秋季各地刮西北风的次数增多,天气晴朗,降水减少,寒暖适中,气候宜人,适宜绿化植物生长。河北省绿化植物种类相当丰富,约有高等植物2800种,分隶于204科940属。温带区系成分占绝对优势,菊科、禾本科、豆科、蔷薇科种类最多。其次是莎草科、百合科、唇形科、伞形科、毛茛科、十字花科、石竹科、壳斗科、桦木科、松科、柏科、槭树科、杨柳科植物分布比较广泛。

### 1.2 试验材料及方法

按大气功能区的分区和大气污染物浓度的分布在河北省石家庄、邢台、邯郸、秦皇岛、张家口分别选取4种绿化植物[合欢(*Albizia julibrissin*)、洋白蜡(*Chinese ash*)、榆叶梅(*Flowering plum*)和香樟(*Cinnamomum camphora*)],试验于2015年9月下旬进行,取当年生的成熟叶作各项分析测定或离体处理,每3d同一时间(上午9—11点)采集1次样本,采样时带上聚乙烯塑料手套,分别从不同方向均匀采集足够多的成熟叶片,将叶片小心封存于锥形瓶内,带回实验室处理。应用数字图像处理技术测定叶面积(包括叶柄),比叶重(SLW)=单位面积叶干重/单位叶面积。固定选取有代表性的植株10株,测定绝对高度(精确到 $0.01\text{ cm}$ )和茎粗(精确到 $0.01\text{ mm}$ )(从地面至植株最高部位的高度),不同绿化植物生长特性如表1所示。

表1 不同绿化植物生长特性

植物类型	科属	高度/m	冠幅/m	茎粗/cm	叶面积指数	比叶重/(g·cm <sup>-2</sup> )
合欢	豆科	4.5~6.8	4.8~6.2	12.5~21.7	12.3~15.1	6.2~8.2
洋白蜡	木犀科	5.2~6.4	2.4~4.6	9.8~16.9	9.5~10.8	5.4~6.7
榆叶梅	蔷薇科	3.8~5.9	3.7~5.2	8.5~12.3	11.4~13.4	6.3~7.1
香樟	樟科	4.1~7.2	3.2~4.9	11.2~18.3	10.2~11.7	5.6~7.4

1.2.1 叶片生理指标的测定 取数量相等的新鲜叶片用蒸馏水浸泡3 h,以电导仪测出浸出液在煮沸前、后的电导度,计算相对电导率(%)。植物叶片洗净65℃烘箱烘干,粉碎后过1.5 mm筛,钒钼黄吸光度法测定叶片全磷含量;除去叶脉研磨混合,以80%丙酮溶液浸提比色分析测定叶绿素a,b值;茚三酮比色法测定游离脯氨酸;硫代巴比妥酸法测定丙二醛含量(MDA);考马斯亮蓝—G250染色法测定可溶性蛋白;蒽酮比色法测定可溶性糖<sup>[12]</sup>。

1.2.2 叶绿素荧光的测定 采用OS5-FL脉冲调制荧光仪(Pulse Modulation Fluorometer)测定叶片的叶绿素荧光诱导曲线,利用诱导曲线分析植物光化学效率。原初荧光或初始荧光产量(F<sub>0</sub>)是用暗适应15 min的叶片在弱调制测量光0.05 μmol/(m<sup>2</sup>·s)诱导下产生的,最大荧光(F<sub>m</sub>)则是在(F<sub>0</sub>)之后用强饱和脉冲5 000 μmol/(m<sup>2</sup>·s)激发。当荧光从最大值降低到接近F<sub>0</sub>水平时,用光强为200 μmol/(m<sup>2</sup>·s)的光化光诱导荧光动力学,根据Schreiber等<sup>[13]</sup>的方法计算不同的荧光参数:F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>,F<sub>v</sub>/F<sub>0</sub>,qP,qN和ΦPSII。

1.2.3 外加HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>和MV光氧化处理 在弱光20 μmol/(m<sup>2</sup>·s)和25℃下,以5 mmol/L NaHSO<sub>3</sub>溶液或10 μmol/L甲基紫精(MV)浸泡不同绿化植物叶片5 d,5 d后参照上述方法测定叶片叶绿素含量和细胞膜渗透率。

1.2.4 数据处理 Microsoft Excel 2010进行数据的统计和整理,SPSS 18.0进行方差分析和统计学检验,LSD多重比较(显著水平设置p<0.05和p<0.01),单因素方差分析(One-way ANOVA)比较其差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 大气污染浓度

图1是由河北省环境监测中心站测定的5个主要城市监测点1998—2015年大气污染物SO<sub>2</sub>及NO<sub>x</sub>的变化动态。随着城市化和区域经济的迅速发展,对能源的极大需求加剧了河北省的大气污染。对5个主要城市监测点长期定位监测结果发现,5个主要城市监测点污染程度由大到小的顺序是:石家庄>邢台>邯郸>唐山>张家口。由图1还可知,河北省环境5个主要城市监测点SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>浓度均呈逐年增加的趋势,相同年份SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>浓度基本表现为石家庄>邢台>邯郸>唐山>张家口,局部有所波动。由此可知,由SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>为主形成的酸雨的下降频率增加,NO<sub>x</sub>对植物尤其是城市绿化植物影响的研究不多,而保护自然生态环境的长期和短期的大气SO<sub>2</sub>基准值分别为50,130 μg/m<sup>3</sup>。经计算可知,近10 a河北省5个城市监测点的平均SO<sub>2</sub>浓度为523 μg/m<sup>3</sup>,大大超过了上述的短期基准值范围。

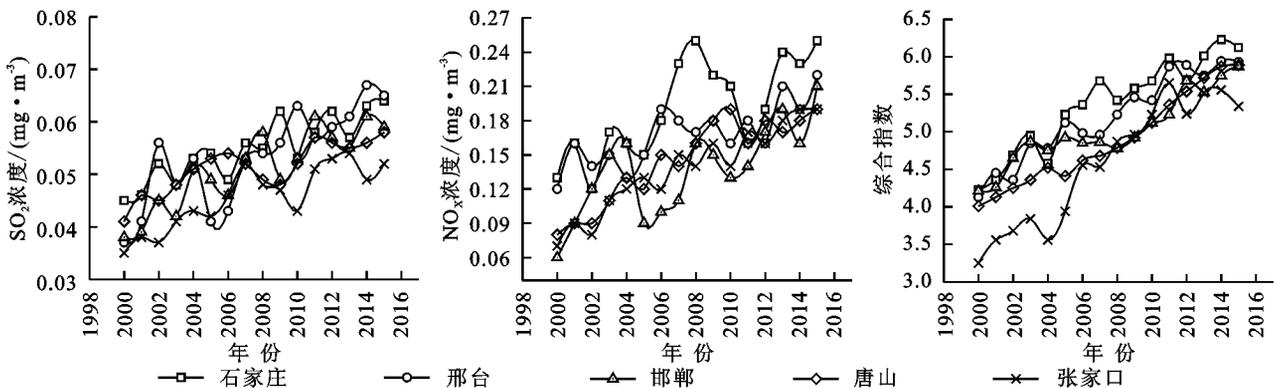


图1 大气污染浓度

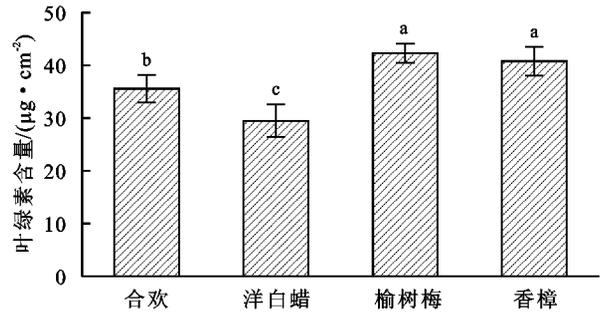
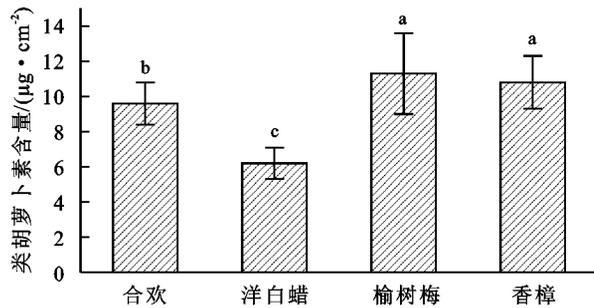
### 2.2 绿化植物叶片光合色素含量

本研究中不同绿化植物叶片叶绿素含量和类胡萝卜素含量也显示出一定的差别(图2)。类胡萝卜素含量变化范围在6.2~11.3 μg/cm<sup>2</sup>,不同绿化植物叶片

类胡萝卜素含量大小排序为榆叶梅>香樟>合欢>洋白蜡,其中榆叶梅和香樟叶片类胡萝卜素含量差异不显著(p>0.05),二者显著高于合欢和洋白蜡;叶绿素

含量变化范围在  $29.5 \sim 40.8 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ , 不同绿化植物叶片叶绿素含量大小排序为榆叶梅 > 香樟 > 合欢 > 洋白蜡

蜡, 其中榆叶梅和香樟叶片叶绿素含量差异不显著 ( $p > 0.05$ ), 二者显著高于合欢和洋白蜡。



注:不同小写字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ ), 下图同。

图2 绿化植物叶片光合色素含量

### 2.3 绿化植物叶片细胞膜渗透率

从图3可知,在污染指数较高地点生长的绿化植物其膜系统出现明显的损伤,而不同绿化植物叶片细胞膜渗透率变化范围为  $21.5\% \sim 26.8\%$ , 其大小的排序为: 洋白蜡 > 合欢 > 香樟 > 榆叶梅, 洋白蜡叶片细胞膜渗透率显著高于其他绿化植物 ( $p < 0.05$ ), 合欢香樟叶片细胞膜渗透率差异不显著 ( $p > 0.05$ ), 榆叶梅叶片细胞膜渗透率显著低于其他绿化植物 ( $p < 0.05$ )。

### 2.4 绿化植物叶片生理生化指标

由图4可知,不同绿化植物可溶性蛋白变化范围在  $95.2 \sim 132.5 \mu\text{g}/\text{g}$ , 可溶性糖变化范围在  $0.13\% \sim 0.26\%$ , 游离脯氨酸变化范围在  $269 \sim 325 \mu\text{g}/\text{g}$ , 丙二醛含量变化范围在  $23.6 \sim 35.2 \mu\text{mol}/\text{g}$ ; 其中, 可溶性蛋白和可溶性糖含量呈现出一致的变化规律, 均表现为榆叶梅和合欢高于洋白蜡和香樟, 其中榆叶梅和合欢叶片可溶性蛋白和可溶性糖含量差异不显著 ( $p > 0.05$ ), 洋白蜡叶片可溶性蛋白和可溶性糖含量显著低于其他绿化植物 ( $p < 0.05$ ); 游离脯氨酸和丙二醛含量呈现出一致的变化规律, 均表现为榆叶梅和合欢低于洋白蜡和香樟, 其中洋白蜡和香樟叶片游离脯氨酸含量差异不显著 ( $p > 0.05$ ), 二者显著高于合欢和榆叶梅 ( $p < 0.05$ ), 合欢和榆叶梅叶片游离脯氨酸含量差异不显著 ( $p > 0.05$ ); 洋白蜡和香樟叶片丙二醛含量差异不显著 ( $p > 0.05$ ), 二者显著高于合欢和榆叶梅 ( $p < 0.05$ )。

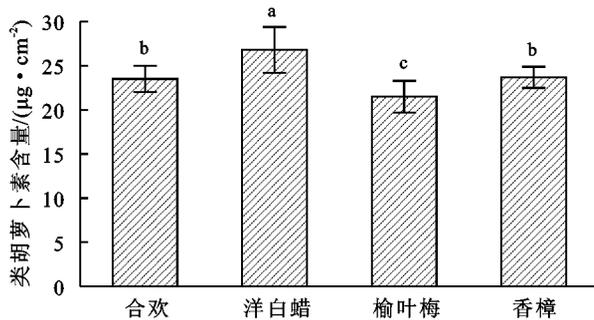


图3 绿化植物叶片细胞膜渗透率

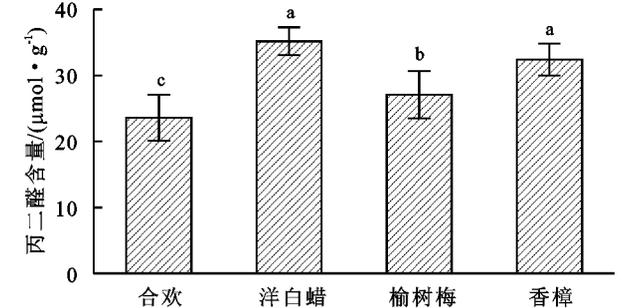
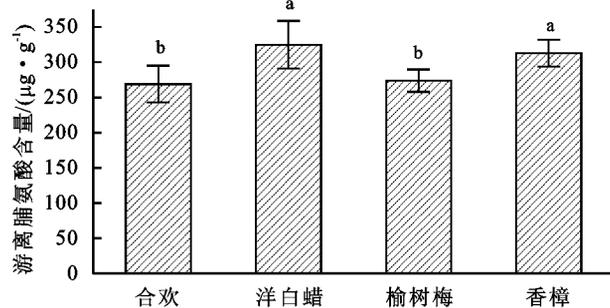
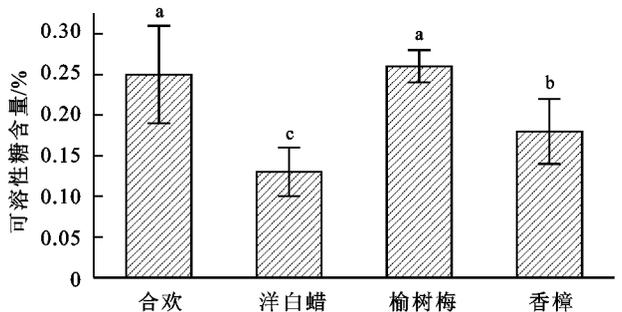
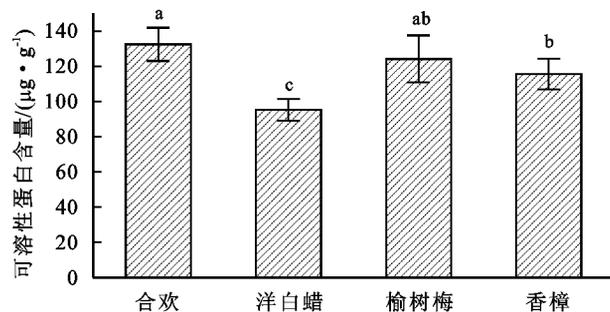


图4 绿化植物叶片生理生化指标

## 2.5 绿化植物叶绿素荧光参数

由图 5 可知,不同绿化植物叶片  $F_v/F_m$  变化范围为 0.62~0.75,大小排序为合欢>榆叶梅>洋白蜡>香樟,其中洋白蜡和香樟叶片  $F_v/F_m$  差异不显著( $p>0.05$ ),二者显著低于合欢和榆叶梅( $p<0.05$ );不同绿化植物叶片  $F_v/F_o$  变化范围为 2.4~3.6,大小排序为合欢>榆叶梅>香樟>洋白蜡,其中合欢和榆叶梅叶片  $F_v/F_o$  差异不显著( $p>0.05$ ),二者显著高于洋白蜡和香樟( $p<0.05$ ),洋白蜡和香樟叶片  $F_v/F_o$  差异不显著( $p>0.05$ );不同绿化植物叶片  $qP$  变化范围为 0.78~0.83,大小排序为榆叶梅>合欢>洋白蜡>香樟,其中不同绿化植物叶片  $qP$  差异均不显著( $p>0.05$ );不同绿化植物叶片  $qN$  变化范围为 0.49~0.68,大小排序为香樟>洋白蜡>榆叶梅>合欢,其中香樟和洋白蜡叶片  $qN$  差异不显著( $p>0.05$ ),二者显著高于合欢和榆叶梅( $p<0.05$ ),合欢和榆叶梅叶片  $qN$  差异不显著( $p>0.05$ );不同绿化植物叶片  $\Phi PS II$  变化范围为 0.38~0.45,大小排序为榆叶梅>合欢>洋白蜡>香樟,其中榆叶梅和合欢叶片  $\Phi PS II$  差异不显著( $p>0.05$ ),合欢和洋白蜡叶片  $\Phi PS II$  差异不显著( $p>0.05$ ),香樟叶片  $\Phi PS II$  显著低于其他绿化植物( $p<0.05$ )。

## 2.6 外源 $NaHSO_3$ 和 MV 对叶片叶绿素含量和细胞膜渗透率的影响

气态  $SO_2$  从气孔进入植物体之后,以  $HSO_3^-$ ,  $SO_3^{2-}$  和  $SO_4^{2-}$  的形式起作用,本研究以 MV 光氧化作用产生的  $O_2^-$  和  $NaHSO_3$  作为模式系统研究  $SO_2$  的植物毒性及植物种间耐受能力的差别。图 6 为经 5 mmol/L 的  $NaHSO_3$  于 25℃ 和弱光条件下处理 5 d 的结果和 10  $\mu\text{mol/L}$  的 MV 处理 5 d 的结果。由图 6 可知,对于 MV 处理模式下,不同绿化植物 CK 叶片细胞膜渗透率基本表现为香樟>洋白蜡>榆叶梅>合欢,其中洋白蜡和香樟 CK 叶片细胞膜渗透率差异不显著( $p>0.05$ ),榆叶梅和合欢 CK 叶片细胞膜渗透率差异不显著( $p>0.05$ );不同绿化植物 MV 叶片细胞膜渗透率基本表现为香樟>洋白蜡>榆叶梅>合欢,不同绿化植物 MV 叶片细胞膜渗透率差异均显著( $p<0.05$ ),不同绿化植物 MV 处理下叶片细胞膜渗透率均显著高于 CK ( $p<0.01$ );不同绿化植物 CK 叶片叶绿素含量基本表现为榆叶梅>合欢>香樟>洋白蜡,其中 CK 榆叶梅叶片叶绿素含量最高( $p<0.05$ ),CK 洋白蜡叶片叶绿素含量最低( $p<0.05$ ),CK 合欢和香樟叶片叶绿素含量差异不显著( $p>0.05$ ),不同绿化植物 MV 叶片叶绿素含量基本表现为合欢>榆叶梅>洋白蜡>香樟,其中 MV 合欢和榆叶梅叶片叶绿素含量差异不显著( $p>0.05$ ),二者显著高于其他绿

化植物( $p<0.05$ ),CK 榆叶梅和香樟叶片叶绿素含量极显著高于 MV ( $p<0.01$ ),CK 合欢和洋白蜡叶片叶绿素含量极显著高于 MV ( $p<0.05$ )。

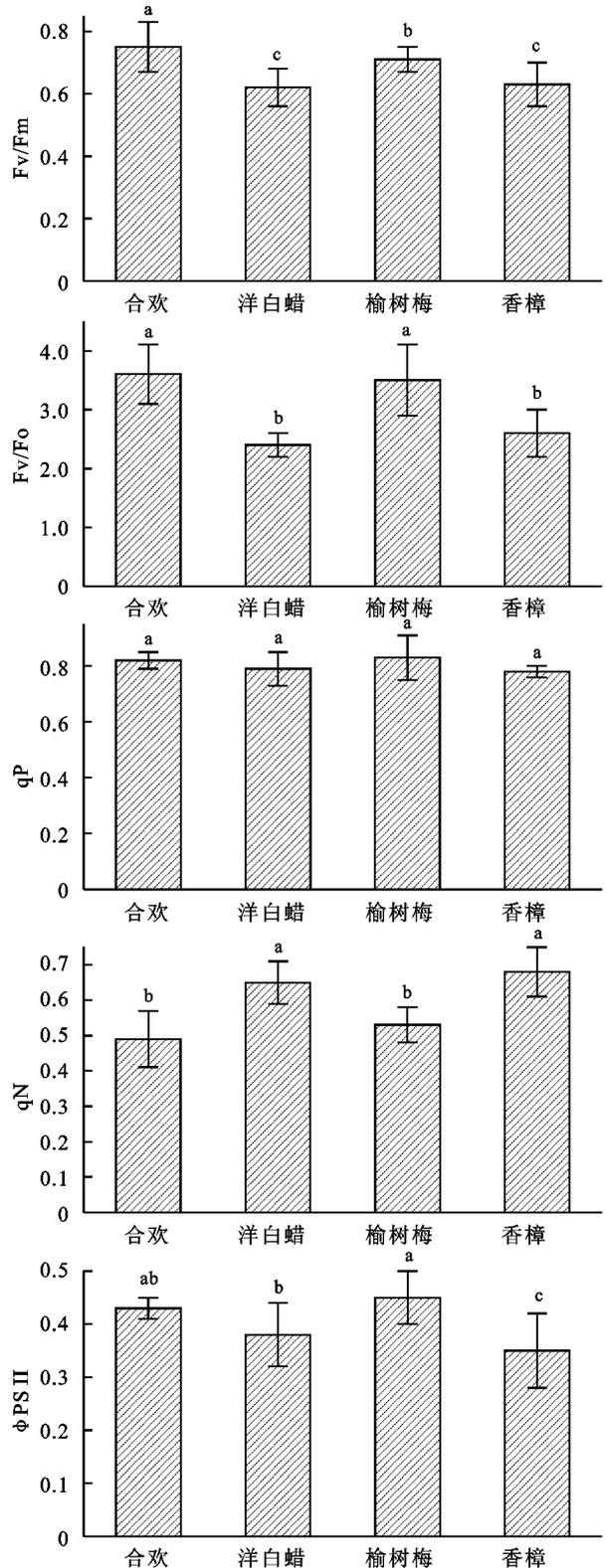
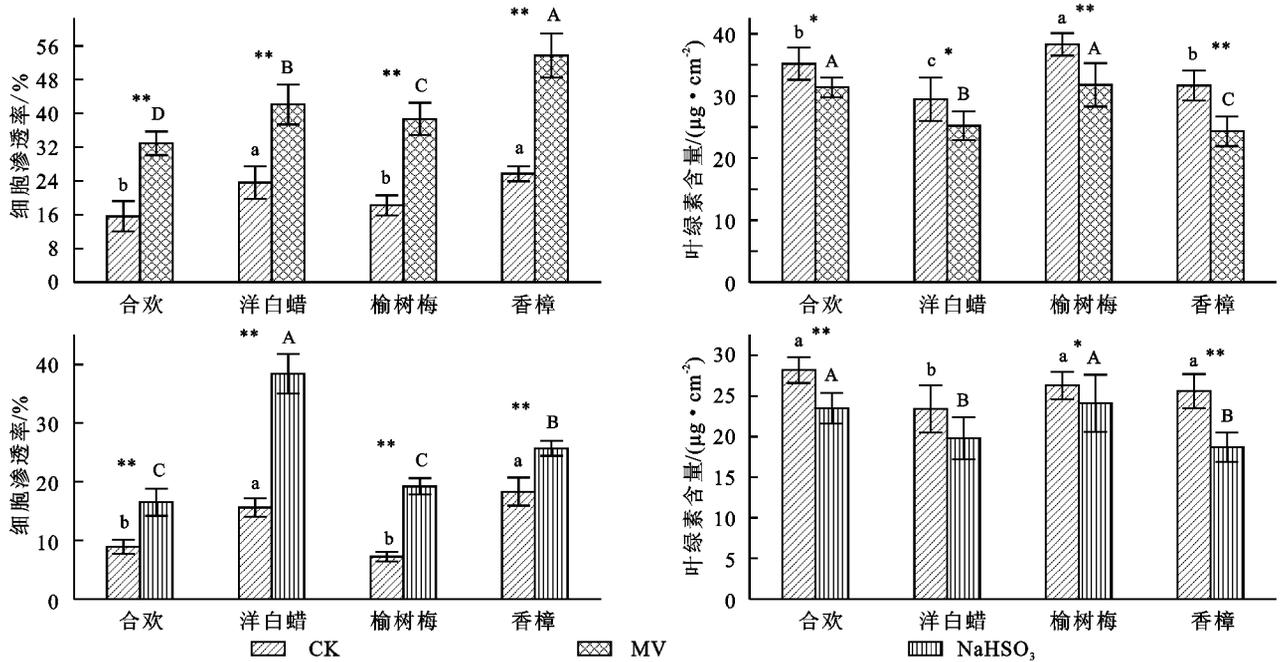


图 5 绿化植物叶绿素荧光参数

对于  $NaHSO_3$  处理模式下,不同绿化植物 CK 叶片细胞膜渗透率基本表现为香樟>洋白蜡>合欢>榆叶梅,其中 CK 洋白蜡和香樟叶片细胞膜渗透率

差异不显著( $p > 0.05$ ), CK 合欢和榆叶梅叶片细胞膜渗透率差异不显著( $p > 0.05$ ), 不同绿化植物  $\text{NaHSO}_3$  叶片细胞膜渗透率基本表现为洋白蜡  $>$  香樟  $>$  榆叶梅  $>$  合欢, 其中  $\text{NaHSO}_3$  洋白蜡和香樟叶片细胞膜渗透率显著高于其他绿化植物( $p < 0.05$ ),  $\text{NaHSO}_3$  合欢和榆叶梅叶片细胞膜渗透率差异不显著( $p > 0.05$ ),  $\text{NaHSO}_3$  不同绿化植物叶片细胞膜渗透率均极显著高于 CK( $p < 0.01$ ); 不同绿化植物 CK 叶片叶绿素含量基本表现为合欢  $>$  榆叶梅  $>$  香樟  $>$

洋白蜡, 其中 CK 合欢、榆叶梅和香樟叶片叶绿素含量差异不显著( $p > 0.05$ ), 显著高于洋白蜡( $p < 0.05$ ), 不同绿化植物  $\text{NaHSO}_3$  叶片叶绿素含量基本表现为榆叶梅  $>$  合欢  $>$  洋白蜡  $>$  香樟, 其中  $\text{NaHSO}_3$  合欢和榆叶梅叶片叶绿素含量差异不显著( $p > 0.05$ ), 洋白蜡和香樟叶片叶绿素含量差异不显著( $p > 0.05$ ), CK 香樟和合欢叶片叶绿素含量极显著高于  $\text{NaHSO}_3$  ( $p < 0.01$ ), CK 洋白蜡和榆叶梅叶片叶绿素含量极显著高于  $\text{NaHSO}_3$  ( $p < 0.05$ ).



注:不同小写字母表示不同绿化植物在 CK 水平上的差异显著( $p < 0.05$ ),不同大写字母表示不同绿化植物在 MV 或者  $\text{NaHSO}_3$  水平上的差异显著( $p < 0.05$ ), \* 表示 CK 与 MV 或者  $\text{NaHSO}_3$  水平上差异( $p < 0.05$ ), \*\* 表示 CK 与 MV 或者  $\text{NaHSO}_3$  水平上差异( $p < 0.01$ ).

图6 外源  $\text{NaHSO}_3$  和 MV 对叶片叶绿素含量和细胞膜渗透率的影响

### 3 讨论与结论

随着城市化和区域经济的迅速发展,对能源的巨大需求加剧了河北省的大气污染。对5个主要城市监测点长期定位监测结果发现,污染程度由大到小的顺序是:石家庄  $>$  邢台  $>$  邯郸  $>$  唐山  $>$  张家口,并且  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  浓度均呈逐年增加的趋势,相同年份  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  浓度基本表现为石家庄  $>$  邢台  $>$  邯郸  $>$  唐山  $>$  张家口,局部有所波动。由此可知,由  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  为主形成的酸雨的下降频率增加,  $\text{NO}_x$  对植物尤其是城市绿化植物影响的研究不多,然而,植物对大气污染物的反应及其耐受性,取决于植物种特性决定的脱毒能力,以及污染物的剂量和作用方式等因子<sup>[14-15]</sup>。不同绿化植物的生理代谢和形态建成的变化,导致叶面积指数和比叶重呈现出不同的变化规律。植物生长发育受叶片光合特性、生理代谢和光合

产物代谢的共同影响,叶面积指数是植物冠层生长状况的指标,叶面积指数较大有利于捕获更多的光能,综合比较可知,合欢和榆叶梅通过增加叶面积指数和光合作用进而影响其自身的生长。

叶绿素作为植物光合作用的物质基础和光敏化剂,在光合作用过程中起着接受和转换能量的作用;可溶性蛋白和可溶性糖包含一些代谢的酶,其含量的多少与植株体内的代谢强度有关<sup>[16]</sup>。本研究中不同绿化植物可溶性蛋白、可溶性糖、叶绿素含量均以合欢和榆叶梅较高,并且叶绿素含量呈现出一致的变化规律,均表现为合欢和榆叶梅高于洋白蜡和香樟。相比较可知,合欢和榆叶梅更能够利用光能和转化光能,从而为光合补偿生长提供物质和能量基础。同时也反映出合欢和榆叶梅所反映的城市空气相对清洁,植物生长状况好,而洋白蜡和香樟反映的城市长期处于污染环境下,不利的生境条件引起生长状况出现差异,使得不同植物生理性质变化差异较大。除此之外,大气污染造成植物叶片细胞膜

渗透性增加,大气污染较严重时,各种酶和叶绿素遭到破坏,导致叶片中叶绿素含量下降所致,这些影响机理还缺乏生物学及生理学上的解释<sup>[17]</sup>。不同绿化植物叶片脯氨酸和丙二醛含量则与可溶性蛋白、可溶性糖、叶绿素含量呈相反的变化趋势,说明大气污染下绿化植物体内脯氨酸含量会不断累积,支持了前人的研究成果<sup>[18]</sup>。在逆境条件下,植物体内会产生大量的自由基,脯氨酸含量的增加是植物对逆境胁迫的一种生理生化反应,具有多种生理功能,由于植株较低的光合利用效率导致体内脯氨酸大量积累,最终使得洋白蜡和香樟体内各项生理指标均低于合欢和榆叶梅,另一方面,绿化植物在高浓度大气污染下,能够产生大量自由基,阻止和减轻植物细胞膜脂过氧化程度,缓和细胞膜透性的变化,这是植物抗御大气污染胁迫的适应和表现之一。丙二醛含量(MDA)作为膜脂氧化的最终产物能够衡量植物细胞膜伤害的程度,大气污染会影响叶片活性氧清除系统,致使抗氧化酶系统活性上升,并使植物体内丙二醛积累增加,丙二醛积累越多说明植物受伤越严重,植物所处环境越恶劣,这与前人的研究结果相一致<sup>[17]</sup>。本研究中植物丙二醛含量与脯氨酸含量表现一致的变化趋势,这与细胞膜系统受损伤和酶活性的改变有关,在大气污染条件下,植株体内细胞膜透性增加,细胞内溶物渗出导致活性氧积累,从而降低了各项生理功能和代谢失调,而合欢和榆叶梅较高的光合利用率对膜具有一定的保护和修复作用,这也是绿化植物对于环境的胁迫,所表现出来的细胞过氧化产物增多而启动的一种应激机制<sup>[18]</sup>。

大气污染对绿化植物叶绿素荧光参数的影响可能是多方面的,可以直接引发光合机构的损伤,同时影响光合电子传递和光合磷酸化以及暗反应的有关酶系,同时,在大气污染下,叶绿素的光还原活性降低,固定荧光  $F_0$  上升, $F_v/F_m$  明显降低,反映出 PS II 的潜在活性和原初光能转换效率的减弱,它们的变化程度可以用来鉴别植物的不同抵抗或忍耐大气污染的能力。本研究中大气污染已对河北省绿化植物的生理生化特性产生不良的影响,导致了光合色素含量和 PS II 功能的明显降低,绿化植物叶片主要光合色素和辅助色素受污染物的影响而出现了明显的氧化降解现象,在光合色素降解的同时,对环境变化较为敏感的 PS II 功能也受到了不同程度的抑制。

叶绿素荧光参数  $F_v/F_m$  代表原初的光能转换效率, $F_v/F_0$  代表从 Chla/b 蛋白复合体 LHCP 到 PS II 的光能传递能力,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<sup>[19]</sup>。图 6 显示了 PS II 的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皆受大气污染的影响,且  $F_v/F_0$  的下降大于  $F_v/F_m$

的下降。结果表明大气污染物  $SO_2$  和  $NO_x$  等抑制了 PS II 的原初光能转化和传能效率,以传能效率受抑更为显著。叶绿素荧光光化学猝灭系数  $q_P$  是 PS II 开放的反应中心相对浓度或开放的 PS II 反应中心数目的量度;非光化学猝灭系数  $q_N$  代表激发能被用于非光化学反应如热耗散等的程度, $q_N$  与叶绿体光合膜质子梯度的建立及膜的高能态有关<sup>[20]</sup>。本研究显示在同一环境条件下洋白蜡和香樟比合欢和榆叶梅保持更多数目的开放的 PSII 反应中心,而合欢和榆叶梅则较为敏感,大气污染物引起其较高比例的 PS II 反应中心不能进行有效的电荷分离, $q_P$  的下降伴随  $q_N$  的增加,在不同绿化植物中,合欢和榆叶梅的  $q_N$  高于洋白蜡和香樟,而  $q_P$  则相反。 $q_N$  的增大和  $q_P$  的降低证明大气污染使叶绿体吸收的光能用于有效的光化学转换的比例减少,而用于非光化学反应的耗散能量的比例增大<sup>[21]</sup>。 $\Phi_{PSII}$  是 PSII 非环式电子传递的量子效率,为  $F_v'/F_m'$  与  $q_P$  的乘积,也是 PS II 功能的指标之一, $\Phi_{PSII}$  在不同绿化植物的变化规律与  $q_P$  和  $F_v/F_m$  相似<sup>[21]</sup>。此外,在经外加的  $HSO_3^-$  和 MV 照光处理 5 d,4 种植物之间反应的差距增大,洋白蜡和香樟的细胞膜渗透甚为严重,因而,我们认为合欢和榆叶梅对大气污染的耐受力较强,洋白蜡和香樟则较为敏感,对大气污染的耐受力较低。

#### 参考文献:

- [1] Currie B A, Bass B. Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model[J]. *Urban Ecosystems*, 2008,11(4):409-422.
- [2] Yang J, Yu Q, Gong P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago[J]. *Atmospheric Environment*, 2008,42(31):7266-7273.
- [3] Manning W J, Feder W A. Biomonitoring air pollutants with plants[M]. Applied Science Publishers,1980.
- [4] Currie B A, Bass B. Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model[J]. *Urban Ecosystems*, 2008,11(4):409-422.
- [5] Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution [J]. *Science*, 2000, 287 (5459):1793-1796.
- [6] Nowak D J, Crane D E, Stevens J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States [J]. *Urban forestry & Urban Greening*, 2006,4(3): 115-123.
- [7] Mage D, Ozolins G, Peterson P, et al. Urban air pollution in megacities of the world[J]. *Atmospheric Environment*, 1996,30(5):681-686.
- [8] 范引琪,李二杰,范增禄.河北省 1960—2002 年城市大气能见度的变化趋势[J]. *大气科学*,2005,29(4):526-535.

- [7] 陈书林,刘元波,温作民. 卫星遥感反演土壤水分研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(11): 1192-1203.
- [8] Watson K, Rowan L C, Offield T W. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images(Thermal modeling for IR images geologic interpretation, discussing physical parameters role in materials natural environmental diurnal temperature behavior)[C]// International Symposium on Remote Sensing of Environment, 7th, University of Michigan, Ann Arbor, Mich, 1971; 2017-2041.
- [9] Carlson T N. Regional-scale estimates of surface moisture availability and thermal inertia using remote thermal measurements[J]. Remote Sensing Reviews, 1986, 1(2): 197-247.
- [10] Jackson R D, Pinter P J. Detection of water stress in wheat by measurement of reflected solar and emitted thermal IR radiation[J]. Spectral Signatures of Objects In Remote Sensing, 1981; 399-406.
- [11] Gillies R R, Kustas W P, Humes K S. A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(15): 3145-3166.
- [12] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79 (2): 213-224.
- [13] 姜琳,冯文兰,刘志红,等. FY-3A/MERSI 与 MODIS 的温度植被干旱指数反演及对比分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 231-234.
- [14] 王海,杨祖祥,王麟,等. TVDI 在云南 2009/2010 年干旱监测中的应用[J]. 云南大学学报:自然科学版, 2014, 36(1): 59-65.
- [15] 鲍艳松,严婧,闵锦忠,等. 基于温度植被干旱指数的江苏淮东北地区农业旱情监测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 163-172.
- [16] Liang L, Zhao S, Qin Z, et al. Drought change trend using MODIS TVDI and its relationship with climate factors in China from 2001 to 2010[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(7): 1501-1508.
- [17] 刘冰冰,曾永年. 湖南省严重农业旱情时空变化遥感监测与影响分析[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(6): 72-79.
- [18] 杜灵通,候静,胡悦,等. 基于遥感温度植被干旱指数的宁夏 2000—2010 年旱情变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 209-216.
- [19] 杨玲,杨艳昭. 基于 TVDI 的西辽河流域土壤湿度时空格局及其影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2016(2): 76-81.
- [20] 王华,邵瀚. 基于 TVDI 的江苏省淮东北地区干旱监测技术研究[J]. 地理空间信息, 2016, 14(2): 53-55.
- [21] 刘英. 神东矿区地表植被与土壤湿度遥感监测研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2013.

~~~~~

(上接第 176 页)

- [9] 王丛梅,杨永胜,李永占,等. 2013 年 1 月河北省中南部严重污染的气象条件及成因分析[J]. 环境科学研究, 2013, 26(7): 695-702.
- [10] 冯建灿,胡秀丽,毛训甲. 叶绿素荧光动力学在研究植物逆境生理中的应用[J]. 经济林研究, 2002, 20(4): 14-18.
- [11] 李晓,冯伟,曾晓春. 叶绿素荧光分析及应用进展[J]. 西北植物学报, 2006, 26(10): 2186-2196.
- [12] 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
- [13] Schreiber U, Schliwa U, Bilger W. Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer[J]. Photosynthesis research, 1986, 10(1/2): 51-62.
- [14] Larcher W. Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups [M]. Springer Science & Business Media, 2003.
- [15] Rowe D B. Green roofs as a means of pollution abatement[J]. Environmental Pollution, 2011, 159 (8): 2100-2110.
- [16] Darrall N M. The effect of air pollutants on physiological processes in plants[J]. Plant, Cell & Environment, 1989, 12(1): 1-30.
- [17] Haagen-Smit A J. Chemistry and physiology of Los Angeles smog[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1952, 44(6): 1342-1346.
- [18] Garty J, Weissman L, Tamir O, et al. Comparison of five physiological parameters to assess the vitality of the lichen *Ramalina lacera* exposed to air pollution [J]. Physiologia Plantarum, 2000, 109(4): 410-418.
- [19] 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[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 599-604.
- [20] 彭长连,温达志,孙梓健,等. 城市绿化植物对大气污染的响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2002, 10(4): 321-327.
- [21] 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[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(2): 46-50.