DOI:10.13872/j.1000-0275.2014.0009
张雅静, 石 辉, 刘雄飞, 昝 利, 王玉涛, 王会霞, 王彦辉. 植物次生代谢酚类物质含量与空气污染关系研究[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(4): 472-476.
Zhang Y J, Shi H, Liu X F, Zan L, Wang Y T, Wang H X, Wang Y H. Relationship between air pollution and the concentration of total phenol derived from plant secondary metabolites[J]. Research of Agricultural Modernization, 2014, 35(4): 472-476.

植物次生代谢酚类物质含量与空气污染关系研究

张雅静[1],石 辉[1*],刘雄飞[1],昝 利[1],王玉涛[1],王会霞[2],王彦辉[2*]

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院,陕西 西安 710055;
2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所,北京 100091)

摘 要:植物次生代谢产物反映了植物对环境的响应,可以作为环境变化的指示物。针对西安不同大气环境条件,研究了常见绿化植物大叶女贞(*Ligustrum lucidum*)和小叶女贞(*Ligustrum quihoui*)叶内总酚含量与空气污染物之间的关系。结果表明,大叶女贞的总酚含量变化为 10.82-45.36 mg/g,小叶女贞为 24.14-95.89 mg/g,物种之间具有显著的差异,同时具有显著的线性相关性;不同大气环境的采样点之间也具有显著的差异。大叶女贞中总酚含量与 SO_2 浓度之间达到 5%的负相关,其余污染因子与总酚含量之间的关系均不显著。植物暴露于自然复合污染的环境条件下,总酚含量的升高是对复合污染的响应,与单个污染物之间的关系相对较弱。

关键词:植物;次生代谢;酚类;大气污染;环境指示物
中图分类号:X171 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-0275(2014)04-0472-05

Relationship between air pollution and the concentration of total phenol derived from plant secondary metabolites

ZHANG Ya-jing[1], SHI Hui[1], LIU Xiong-fei[1], ZAN Li[1], WANG Yu-tao[1], WANG Hui-xia[2], WANG Yan-hui[2]

(1. School of Environmental and Municipal of Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 2. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The plant secondary metabolite reflects the response of plants to the environment, and thus it can be used as the bio-indicator of environmental quality. The relationship between the total phenol concentrations of the common greening trees *L. lucidum* and *L. quihoui* and atmospheric pollution was studied. The total phenol concentration of *L. lucidum* varied from 10.82 to 45.36 mg/g, while the concentration value range of *L. quihoui* was 24.14-95.89 mg/g. There was a significant difference ($P<0.05$) between the total phenol concentrations of those two species. At the different sampling sites with different atmospheric environments, the total phenol concentrations of two trees also showed significant differences. There was a significant, negative correlation between the total phenol concentrations of *L. lucidum* and the atmospheric SO_2 concentrations ($P<0.05$), whereas no significant associations were found between concentrations of total phenol and other pollutants. When trees are exposed to the natural environmental conditions, the total phenol contents in trees always increase in response to the combined air pollution, not to the pollution caused by the individual pollutants.

Key words: plant; secondary metabolism; phenol; atmosphere pollution; environmental indicator

酚类化合物是一类重要的植物次生代谢物质,主要存在于植物的表皮、根部、叶部和果实中,其含量仅次于纤维素、半纤维素和木质素;酚类物质主要有植物多酚(包括简单酚、水解单宁和缩合单宁)、黄酮类化合物(flavonoids)、苯醌(benzoquinones)、萘醌(naphthoquinones)和木质素(lignin);其中多酚和黄酮是研究较多的两类酚类次生代谢物质[1]。酚类物质分子结构上酚羟基数目众多,使得这一类物质具有独特的生理特性和化学活性,在植物抵抗各种逆境胁迫中具有重要作用[2-6]。同时次生代谢是植物组织和器官在一定的环境条件下才进行,因此次生代谢的酚类物质可以在一定程度上反映植物对环境条件的响应[7]。

Kareolewki 和 Giertych[8]研究了在 SO_2 和氟化物污染情况下的苏格兰松(*Pinus sylvestris* L.)叶内总酚和邻二酚(o-dPh)的变化,发现污染环境下酚类

基金项目:国家林业公益性行业科研专项(20130430105)。
作者简介:张雅静(1988-),女,陕西岐山人,硕士研究生,主要从事城市环境生态研究,E-mail: zhangyajing2011@163.com;通讯作者: 石辉(1968-),男,陕西眉县人,教授,博士生导师,主要从事污染生态研究,E-mail: shihui06@126.com;王彦辉(1957-),男,河北安平人,研究员,博士生导师,主要从事森林生态研究,E-mail: wangyh@caf.ac.cn。
收稿日期:2014-02-22,**修回日期**:2014-03-31

物质含量显著增高。而高浓度的 CO_2 可降低松树(*Pinus eldarica* L.)针叶中的总酚含量，但对橙树(*Citrus aurantium* L.)叶中总酚的含量没有明显的影响，并且酚类物质的增加与生物量之间具有负相关关系[9]。Kainulainen 等[10]关于苏格兰松和挪威云杉(*Picea abies* L.)幼苗暴露于空气污染情况下的研究表明,O_3、SO_2、NO_2 对叶内总酚的影响不大，主要影响的是各个单酚的含量。对于草本的红三叶草(*Trifolium pratense* L.)，高浓度的 O_3 增加了植物叶片中总酚含量,并使叶片净光合作用速率增加 21%–23%[11]。上述研究主要是在人工控制污染物的条件下进行的,而在自然状态下,寻求利用酚类物质的含量和组成作为空气质量指示物也有部分研究。Loponen 等[12]研究了沿污染梯度生长的桦树(*Betula. pubescens ssp. czerepanovii*)叶中一些酚类物质的累积变化，发现在大气污染严重区域酚类物质会出现显著累积，并且大气污染程度与酚类物质含量之间有一定的相关性。Pasqualini 等[13]对地中海松 (*Pinus halepensis* Mill.)的研究也表明,总酚含量在暴露于 SO_2 条件下增加,而在 NO 污染下减小。Robles 等[14]针对地中海松的研究也表明总酚含量随 NO 的增加而降低,而黄酮含量与臭氧含量呈正相关,因此这些物质可以作为空气污染的生物指示剂。利用植物叶内代谢产物的变化指示环境质量，可反映一段时间内空气质量的变化情况;在不同的区域,研究不同植物次生代谢产物与空气质量的关系，对于进一步认识植物对环境的响应机制，寻求合适的环境指示植物具有重要的作用。

城市街道绿化植物受工业排放、机动车尾气、臭氧等多种污染物影响，植物将会诱导发生次生代谢的保护机制，导致叶内的酚类次生代谢产物的变化累积。本文通过测定西安不同空气质量环境下,常见绿化植物大叶女贞(*Ligustrum lucidum* Ait.)和小叶女贞(*Ligustrum quihoui* Carr.)叶内总酚的含量,研究植物对空气环境污染的响应，以期为大气污染生物监测提供新的监测手段。

1 材料方法

1.1 研究点选择与空气质量监测

西安市位于关中平原中部，地处北纬 33°39′–34°45′,东经 107°40′–109°49′,海拔 410 m,属暖温带半湿润的季风气候,四季分明,年平均气温 15℃,年平均降水量 600 mm。为了实现植物样品与空气监测数据的同步,且保证各采样点指示植物的统一,本研究在西安市选择了高压开关厂、兴庆小区、纺织城、小寨、市人民体育场、高新西区、经开区、曲江文化集团和广运潭等 9 个观测样点(图 1)。每个采样点均有西安市环境监测站按照国家标准配置的大气监测设备，其监测结果显示了西安不同土地利用情况下的环境状况。西安每年的 11 月 15 日开始供暖,次年的 3 月 15 日结束,这一时段由于供暖能源的大量消耗,排入大气中的污染物增多,通常是城市空气质量较差的时段。在此研究中,主要利用的是采暖季节 2012 年 12 月–2013 年 3 月的空气质量监测数据。

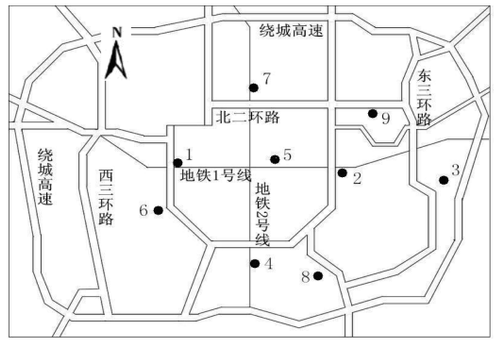

图 1　采样点分布图

Fig. 1　The distribution map of sampling sites

(1.高压开关厂;2.兴庆小区;3.纺织城;4 小寨;5.市人民体育场;6.高新西区;7.经开区;8.曲江文化集团;9.广运潭)

1.2 植物选择与采集

本研究选用的指示植物是西安市常见的绿化植物大叶女贞(温带常绿阔叶树,树高 4.0–6.0 m)和小叶女贞(落叶或半常绿灌木,高 1.0–3.0 m),这两种植物在 9 个研究点均有分布。同时前期的研究也表明这两种植物在不同的空气质量下，其叶生物化学特征会发生一定的变化,随污染程度的加剧,叶片中 Pb、Cd 的含量、LMA(比叶重)和 Chl a(叶绿素 a)/Chl b(叶绿素 b)升高,而 Chl a、Chl b 和 Chl (a+b)含量则呈现相反的变化趋[15]。

采样于 2013 年 4 月中旬进行。大叶女贞的采样高度为 2.0 m 左右，小叶女贞的采样高度为 1.0 m 左右。用修枝剪剪下叶片置于自封袋中封存,并标注采样日期和采样地点。采集的样品带回实验室后立即清洗,烘干粉碎后置于干燥器中保存。

1.3 样品总酚分析

将采集的样品用水清洗掉叶片尘埃及附着物,在 105℃下杀青 20 min,然后在 60℃下烘干至恒重,将烘干的样品粉碎,过 40 目筛备用。

称取 0.5 g 样品粉末，置于 100 ml 具塞锥形瓶中,用 70%的乙醇在 40℃下超声提取 30 min,抽滤至 100 ml 的容量瓶中，用 70%的乙醇定容备测,每个样品设置三个重复试验。

样品总酚含量用Folin-Ciocalteu比色法测定[16]，准确吸取样品溶液1 ml，加入FC试剂2 ml，10%碳酸钠溶液6 ml，用去离子水定容至25 ml，40℃避光反应120 min，以蒸馏水为空白。根据大叶女贞和小叶女贞样品提取液的最大吸收波长，分别于760 nm和720 nm波长条件下测定大叶女贞和小叶女贞样品的吸光度，计算总酚含量。

1.4 数据处理

采用SPSS20.0(SPSS, Software Co., USA)对数据进行相关性分析和方差分析，显著性水平设定为0.05。

2 结果分析

2.1 空气污染物特征

方差分析发现，各样点之间除SO_2出现微弱的显著性差异之外(P =0.091)，其余各污染物的浓度在不同的区域差异均不显著(表1)。从各个月份的污染物浓度来看，除O_3小时平均浓度之外，均达到显著的差异(表2)。SO_2浓度分别在2013年1月与2013年3月达到最高值与最低值，分别为77.47和49.72 μg/m³。NO_2浓度最高出现在2013年1月，为92.29 μg/m³；最低的是2012年12月，为29.07 μg/m³。PM_{10}浓度最高的是2013年1月的217.99 mg/m³，最低的是2012年12月的143.82 mg/m³。从2013年1月以后，开始监测了CO、O_3小时平均、O_3 8小时平均、$PM_{2.5}$的浓度，其月平均浓度变化分别为59.29-82.08 mg/m³，20.11-33.84 μg/m³，18.75-30.79 μg/m³和144.43-248.89 μg/m³。

表1 不同地点污染物浓度

Table 1 The concentrations of air pollution substances in different sampling sites

样点编号	地名	SO_2 (μg/m³)	NO_2 (μg/m³)	PM_{10} (mg/m³)	CO (mg/m³)	O_3小时平均 (μg/m³)	$O_3$8小时平均 (μg/m³)	$PM_{2.5}$ (μg/m³)
1	高压开关厂	79.17	84.99	173.01	81.73	26.85	31.52	219.50
2	兴庆小区	61.96	73.99	181.35	54.50	20.82	22.92	201.46
3	纺织城	50.44	77.03	170.28	52.55	23.02	24.94	197.16
4	小寨	67.73	60.05	189.95	84.42	19.36	22.84	182.66
5	市人民体育场	50.77	71.76	193.04	86.91	33.52	37.80	210.04
6	高新西区	59.11	74.84	189.46	65.07	25.99	31.81	215.20
7	经开区	52.71	58.96	173.92	63.49	23.05	27.97	203.62
8	曲江文化集团	50.50	82.21	169.86	80.52	16.12	19.78	190.06
9	广运潭	54.85	79.60	173.95	80.34	28.48	31.45	209.53
	平均	58.58 ± 9.75	73.71 ± 9.04	179.42 ± 9.20	72.17 ± 13.31	24.13 ± 5.22	27.89 ± 5.75	203.25 ± 11.89

表2 不同月份西安大气污染物的浓度变化

Table 2 The change of concentrations of air pollutants in different months

时间 (年-月)	SO_2 (μg/m³)	NO_2 (μg/m³)	PM_{10} (mg/m³)	CO (mg/m³)	O_3小时平均 (μg/m³)	$O_3$8小时平均 (μg/m³)	$PM_{2.5}$ (μg/m³)
2012-12	57.86 ± 4.89 b	29.07 ± 2.93 b	143.82 ± 11.09 c				
2013-01	77.47 ± 17.41 a	92.06 ± 19.67 a	217.66 ± 15.46 a	82.99 ± 11.79 a	19.86 ± 10.51 a	18.38 ± 10.99 b	253.00 ± 19.04 a
2013-02	61.60 ± 19.66 b	79.25 ± 18.65 a	178.45 ± 22.06 b	80.39 ± 16.29 a	22.78 ± 3.72 a	25.76 ± 4.95 b	247.36 ± 28.77 a
2013-03	49.50 ± 6.65 b	90.70 ± 8.21 a	205.89 ± 16.84 a	56.37 ± 15.67 b	26.96 ± 3.79 a	33.52 ± 5.04 a	163.78 ± 13.61 b

注：CO、O_3小时平均浓度、$O_3$8小时平均浓度和$PM_{2.5}$从2013年开始监测，2012年数据缺；a，b，表示显著性水平存在差异。

2.2 植物总酚含量

大叶女贞和小叶女贞2013年4月样品总酚含量测定的结果表明，在9个研究点中，大叶女贞的总酚含量最高值是兴庆小区，达45.36 mg/g，最低值是高新西区，仅10.82 mg/g，平均为18.74 mg/g(表3)，变异系数为58.4%，属于中等程度的变异。小叶女贞总酚含量总体高于大叶女贞，其值为24.14-95.89 mg/g，均值为46.1 mg/g，变异系数为46.2%。各个采样点之间大叶女贞、小叶女贞的总酚含量均有显著性差异(表3)。经过变量之间的成对t检验，大叶女贞和小叶女贞总酚含量之间具有显著的差异(P = 0.014)，而且相互之间还具有显著的相关性(图2)。

表3 大叶女贞和小叶女贞叶内总酚含量 (mg/g)

Table 3 The concentrations of total phenols in Ligustrum lucidum and Ligustrum quihoui (mg/g)

样点编号	地名	大叶女贞	小叶女贞
1	高压开关厂	11.76 ± 0.69 e	35.68 ± 1.33 d
2	兴庆小区	45.36 ± 1.72 a	95.89 ± 1.69 a
3	纺织城	12.53 ± 0.15 de	29.21 ± 1.06 e
4	小寨	11.06 ± 0.47 e	45.71 ± 5.27 c
5	市人民体育场	14.92 ± 1.33 d	35.75 ± 1.63 d
6	高新西区	10.82 ± 1.30 e	45.20 ± 0.68 c
7	经开区	18.99 ± 0.32 c	44.25 ± 1.13 c
8	曲江文化集团	23.89 ± 1.10 b	24.14 ± 0.95 e
9	广运潭	19.35 ± 0.90 c	59.07 ± 2.12 b
平均		18.74 ± 10.95	46.10 ± 7.11

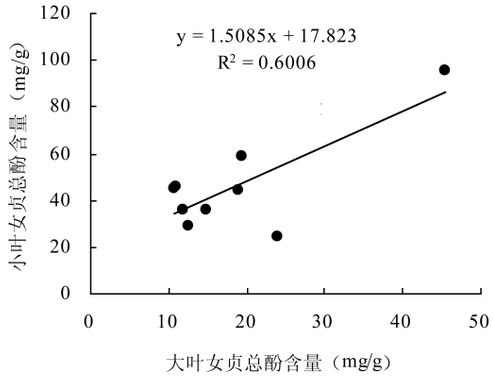

图 2　大叶女贞和小叶女贞总酚含量之间的关系

Fig. 2　The relationship between concentrations of total phenols in *Ligustrum lucidum* and in *Ligustrum quihoui*

3 讨论

暴露于空气污染环境中的植物，在明显的生态功能受损症状出现之前，会通过一些生理代谢的改变来适应环境的变化，这些变化可用于空气中的污染物的早期监测，提供空气污染物质的生物指标监测[17,18]。本研究监测的大叶女贞总酚含量为 10.82–45.36 mg/g,小叶女贞为 24.14–95.89 mg/g;Pasqualini 等[13]在自然的大气条件下测定地中海松总酚含量为 22–45 mg/g,这些结果具有一定的相似性。

SO_2、NOx 和 O_3 等空气污染物都是影响植物叶内总酚含量的主要因素。Pasqualini 等[13]发现空气中的 SO_2 被认为是影响植物总酚含量的主要因素,随着 SO_2 浓度的增加、叶中总酚的含量增高,但对其结果进一步分析，发现在部分低的 SO_2 区域也有高的总酚浓度、高的 SO_2 区域有低的总酚浓度(Luberon 的 SO_2 浓度为 0.74 μg/m^3，叶总酚含量为 34 mg/g (DW);Port de bouc 的 SO_2 浓度为 16.62 μg/m^3,叶总酚含量为 29 mg/g(DW))。随着 CO_2 浓度的升高,经常会出现 SO_2 同时升高的现象,Agrawal 和 Deepak[19]对小麦分析研究表明,CO_2+SO_2 处理可以增加小麦叶片总酚含量。而本研究的结果表明,大叶女贞中总酚含量与 SO_2 浓度之间达到 5%的负相关关系,但小叶女贞中的总酚含量与之间的关系并不密切。Irshad 等[20]在菠菜上的研究发现总酚含量与 SO_2 浓度之间具有负相关关系。由于植物的次生代谢是非常复杂的过程,植物的种类、SO_2 暴露时间的长短和暴露剂量的高低等各种因素均会影响这个过程，因此在不同的物种上可能表现出不同的响应。

暴露于 O_3 中的红三叶草(*Trifolium pratense* L.)在 O_3 浓度轻度增加时(日最大 O_3 浓度为 55.6 ppb),其叶中的总酚含量也在增加[11];欧洲银桦树(*Betula pendula Roth*)在高的 O_3 浓度时也表现出总酚增加的现象[21];大豆(*Glycine max* (L.) Merr.)经 O_3 处理后,总酚也增加了 22%–36%[22];在蒙古栎(*Quercus mongolica*)上的研究表明高浓度的 O_3 可增加叶中的总酚浓度[23]。但 O_3 和植物叶中的总酚浓度之间的关系也存在不一致的研究结果。Pasqualini 等[13]发现地中海松总酚含量与 O_3 含量没明显的关系,本研究表明大叶女贞和小叶女贞的总酚含量与 O_3 关系不明显。出现这一现象的原因,可能由于红三叶草、银桦、大豆、蒙古栎是单独暴露于 O_3 环境,O_3 为唯一的环境伤害物质而致。在 Pasqualini 等和本研究中,植物暴露于自然复合污染的环境条件下，总酚含量的升高是对包括 O_3 等复合污染的响应,因此与单个的污染物之间的关系相对较弱。

NO_x 在低的浓度下会对植物产生刺激作用,促进生长,在高浓度下产生抑制作用。Pasqualini 等[13]发现地中海松总酚与 NO_x 具有显著的负相关关系，然而本研究发现两者之间在大叶女贞和小叶女贞上均没有相关性。一般认为,NO_x 可以促进硝酸还原酶的活性从而影响次生代谢[24];但 SO_2 的作用与此相反，因此不同浓度的 NO_x 和 SO_2 的组合会对总酚的形成产生不同的影响[25]。由于处于自然的大气环境，NO_2 和 SO_2 均具有较高的浓度，其对次生代谢产物反方向的影响可能是总酚含量与 NO_2 之间关系不显著的原因之一。

酚类化合物是植物中重要的次生代谢产物,对于植物色素的形成、生长发育、光合过程、抵抗病虫害和空气污染胁迫均具有重要的作用。空气污染可诱导次生代谢产物的酚类物质的种类和数量变化，在污染情况下植物叶内总酚含量增大。但由于在自然环境中,空气复合污染影响因素多、各个因素之间相互作用复杂，导致了不同污染区域的植物叶内酚类物质含量之间虽有明显的变化，但不同的物种变化不一，且即使同一植物也对不同的大气污染物反应不一。酚类物质中的酚羟基容易被氧化,因此通过还原反应可以降低植物体内的活性氧的产生，保护质膜的稳定性。酚类在叶中的增加可影响 CO_2 的固定和 ATP 的合成;同时酚类的代谢可促进木质素的合成，而叶肉细胞壁的木质化可进一步抵抗氧化胁迫。但酚类物质的组成、结构和消除自由基活性之间的关系有待于进一步研究，以便认识植物通过酚类物质的累积响应大气环境的机制。

4 结论

在不同的空气污染条件下，植物叶内的酚类物

质含量具有一定的差异；同一环境下不同物种叶内总酚含量也有较大差异。由于酚类含量的增加是一个复杂的次生代谢过程，环境、物种对酚类的含量具有重要的影响，植物暴露于自然复合污染的环境条件下，总酚含量的升高是对复合污染的响应，与单个的污染物之间的关系相对较弱，因此用总酚含量作为指示环境污染物的指标还有待进一步研究。此外，对酚类物质的组成、结构和不同空气污染物之间关系的进一步研究，可为解释植物次生代谢对环境响应机制提供进一步的依据。

参考文献：

[1] 张力平，孙长霞，李俊清，等. 植物多酚的研究现状及发展前景[J]. 林业科学, 2005, 41(6): 157–162.

[2] Li Z H, Wang Q, Ruan X, et al. Phenolics and plant llelopathy[J]. Molecules, 2010, 15: 8933–8952.

[3] Loponen J, Ossipov V, Lempa K, et al. Concentrations and among–compound correlations of individual phenolics in white birch leaves under air pollution stress[J]. Chemosphere, 1998, 37(8): 1445–1456.

[4] Bennett R N, Wallsgrove R M. Secondary metabolites in plant defence mechanisms[J]. New Phytologist, 1994, 127(4): 617–633.

[5] 朱 静, 柴 强, 赵 财, 等. 供水及丁香酚对间作小麦蚕豆生长速率及籽粒产量的影响[J]. 农业现代化研究, 2012, 33(4): 489–492.

[6] 杨彩红, 柴 强. 间甲酚对不同供水条件下小麦蚕豆的化感作用[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(5): 614–617.

[7] Yunus M, Iqbal M. Plant response to air pollution[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1996: 241–266.

[8] Kareolewki P, Giertych M J. Changes in the level of phenols during needle development in Scots–pine populations in a control and polluted environment[J]. European Journal of Forest Pathology, 1995, 25(6–7): 297–306.

[9] Penuelas J, Estiarte M, Kimball B A, et al. Variety of responses of plant phenolic concentration to CO_2 enrichment[J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47(9): 1463–1467.

[10] Kainulainen P, Holopainen J K, Oksanen J. Effects of gaseous air pollutants on secondary chemistry of Scots pine and Norway spruce seedlings[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1995, 85(3): 1393–1398.

[11] Saviranta N M M, Julkunen–Tiitto R, Oksanen E, et al. Leaf phenolic compounds in red clover (*Trifolium pratense* L.) induced by exposure to moderately elevated ozone[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(2): 440–446.

[12] Loponen J, Ossipov V, Lempa K, et al. Concentrations and among–compound correlations of individual phenolics in white birch leaves under air pollution stress[J]. Chemosphere, 1998, 37(8): 1445–1456.

[13] Pasqualini V, Robles C, Garzino S, et al. Phenolic compounds content in *Pinus halepensis* Mill. needles: a bioindicator of air pollution[J]. Chemosphere, 2003, 52: 239–248.

[14] Robles C, Greff S, Pasqualini V, et al. Phenols and flavonoids in Aleppo pine needles as bioindicators of air pollution[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(6): 2265–2271.

[15] 王会霞, 石 辉, 李秧秧. 城市大气环境下绿化植物叶片比叶重和光合色素含量[J]. 中国环境科学, 2011, 31(7): 423–430.

[16] 李文仙, 俞 丹, 林 玲, 等. Folin–Ciocalteu 比色法应用于蔬菜和水果总多酚含量测定的研究[J]. 营养学报, 2011, 33(3): 302–307.

[17] Posthumus A C. Higher plants as indicators and accumulators of gaseous air pollution[A]. Best E P H. and J Haeck (eds), Ecological indicators for the assessment of the quality of air, water, soil, and ecosystems[C]. Netherlands, Springer, 1984, 263–272.

[18] Godefroid S. Temporal analysis of the Brussels flora as indicator for changing environmental quality[J]. Landscape and Urban Planning, 2001, 52(4): 203–224.

[19] Agrawal M, Deepak S S. Physiological and biochemical responses of two cultivars of wheat to elevated levels of CO_2 and SO_2, singly and in combination[J]. Environmental Pollution, 2003, 121: 189–197.

[20] Irshad A H, FayazAhmad S, Sultan P. Effect of sulphur dioxide on the biochemical parameters of Spinach (*Spinacea Oleracia* Mill.)[J]. Trakia Journal of Science, 2011, 9(1): 24–27.

[21] Saleem A, Loponen J, Pihlaja K, et al. Effects of long–term open–field ozone exposure on leaf phenolics of European silver birch (*Betula pendula* Roth) [J]. Journal of Chemical Ecology, 2001, 27 (5): 1049–1062.

[22] Booker F L, Miller J E. Phenylpropanoid metabolism and phenolic composition of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) leaves following exposure to ozone[J]. Journal of Experimental Botany, 1998, 49(324): 1191–1202.

[23] 张国友, 何兴元, 唐 玲, 等. 高浓度臭氧对蒙古栎叶片酚类物质含量和总抗氧化能力的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 725–728.

[24] Mir A Q, Yazdani T, Ahmad S, et al. Total flavonoids and phenolics in *Catharanthus roseus* L. and *Ocimum sanctum* L. as biomarkers of urban auto pollution[J]. Caspian Journal of Environmental Sciences, 2009, 7(1): 9–16.

[25] Hamid N, Jawaid F. Effect of short–term exposure of two different concentrations of sulphur dioxide and nitrogen dioxide mixture on some biochemical parameter of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.)[J]. Pakistan Journal of Botany, 2009, 41(5): 2223–2228.

（责任编辑：童成立）