

网络出版时间:2014-4-25 15:48

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.05.006

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.05.006.html

延安 15 种园林树种叶片硫含量特征分析

宋 彬,王得祥,张 义,胡有宁

(西北农林科技大学 林学院,陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】研究陕西延安 15 种园林树种的叶片硫含量特征,评价其吸硫能力。【方法】在陕西延安城区、城郊分别设置空气污染程度不同(重度、中度、轻度污染和对照)的样区,采集 15 种园林树种叶片,采用比浊法、原子分光光度计法测定 15 种园林树种叶片的硫含量,并计算其相对吸硫量,分析其吸硫能力的差异。【结果】不同污染状况下,同一树种的叶片硫含量和相对吸硫量均存在显著差异,表现为重度污染区>中度污染区>轻度污染区。同一污染状况下,不同树种叶片硫含量存在明显差异,在重度和中度污染区,垂柳、旱柳、刺槐、紫叶李的叶片硫含量均显著高于其他树种;在轻度污染区,垂柳、旱柳、紫叶小檗、臭椿叶片硫含量均显著高于其他树种。在相同污染状况下,不同树种相对吸硫量存在显著差异,在重度、中度和轻度污染状况下,垂柳、旱柳、刺槐的相对吸硫量均显著高于其他树种。根据平均污染指数可知,旱柳、垂柳和刺槐平均吸硫能力显著强于其他树种,而云杉、臭椿和侧柏的平均吸硫能力较差。【结论】在陕西延安地区进行园林绿化时,可优先选择旱柳、垂柳、刺槐等吸硫能力较强的树种。

【关键词】 叶片;含硫量;相对吸硫量;平均污染指数;陕西延安

【中图分类号】 S727.503;[S719]

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2014)05-0091-06

Sulfur contents in foliage of 15 ornamental trees in Yan'an

SONG Bin, WANG De-xiang, ZHANG Yi, HU You-ning

(College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to determine the sulfur contents in leaves of 15 ornamental trees in Yan'an, Shaanxi and evaluate their sulfur absorption ability. 【Method】 Leaves of 15 ornamental trees were collected from sampling sites with different pollution degrees in suburban and urban area of Yan'an. BaSO₄ turbidimetry and spectrophotometer were used to determine the sulfur contents in leaves. The relative sulfur absorption ability was examined as well. 【Result】 With different pollution conditions, the differences in sulfur contents and relative sulfur absorption ability of each species were significant, in an order of heavily polluted area>moderately polluted area>lightly polluted area. With same polluted conditions, the differences in sulfur contents and relative sulfur absorption ability of different species were significant. In heavily and moderately polluted areas, the sulfur contents of *Salix matsudana*, *Salix babylonica*, *Robinia pseudoacacia* and *Prunus ceratifer* cv. *pissardii* were significantly higher than those of other species, while in lightly polluted areas, the sulfur contents of *Salix matsudana*, *Salix babylonica*, *Berberis thunbergii* cv. *atropurpurea* and *Ailanthus altissima* were higher than those of other species. With same polluted conditions, the differences in relative sulfur absorption abilities of different species were significant, and the relative sulfur absorption abilities of *Salix matsudana*, *Salix babylonica*, *Robinia pseudoaca-*

【收稿日期】 2013-04-19

【基金项目】 国家林业局林业公益性行业科研专项(201104045)

【作者简介】 宋 彬(1988—),男,陕西铜川人,在读硕士,主要从事城市森林生态研究。E-mail: songzibin0831@163.com

【通信作者】 王得祥(1966—),男,青海乐都人,教授,博士生导师,主要从事森林生态与森林可持续经营研究。

E-mail: Wangdx66@126.com

cia and *Prunus ceraifera* cv. *pissardii* were significant higher than those of other species in all the polluted areas. According to average contaminative index, the average sulfur absorption capacities of *Salix matsudana*, *Salix babylonica* and *Robinia pseudoacacia* were significantly stronger than those of other species.

【Conclusion】Trees with strong sulfur absorption ability such as *Salix matsudana*, *Salix babylonica* and *Robinia pseudoacacia* were recommended in Yan'an, Shaanxi.

Key words: foliage; sulfur content; relative sulfur absorption ability; average contaminative index; Shaanxi Yan'an

延安自古为陕北地区的政治、经济、文化和军事中心,是国家级历史文化名城。延安市地处陕北黄土高原丘陵沟壑区,属于内陆干旱半干旱气候,生态环境较为脆弱,风沙和水土流失严重,导致当地沙尘较大,空气质量较差^[1]。近年来,由于当地能源产业和红色旅游的繁荣,机动车尾气、燃油燃煤及焚烧生活垃圾等导致的大气硫化物等污染物的排放量日益增大^[2],大气污染的防治已经成为该市环保和城市规划的首要目标^[3]。植物通过呼吸作用,对大气中的污染物在一定程度内具有吸收转化作用,对大气具有很强的净化能力^[4-7]。因此,研究不同树种叶片硫含量对于生态环境脆弱地区绿化树种的选择具有重要意义^[8-9]。有研究表明,叶片硫含量与大气 SO_2 浓度呈显著正相关性^[10-11];也有研究认为,上述两者之间并非呈绝对正相关^[12]。近年来,对于植物吸收 SO_2 的研究较多,但研究内容多集中于 SO_2 对植物的伤害症状及生理生化指标的影响等方面,针对城市绿化树种选择方面的研究则稍显薄弱^[13]。本研究通过对陕西延安城区常见 15 种园林树种叶片硫含量和相对吸硫量进行比较分析,旨在为延安市以及类似地区关于优化空气质量的城市森林、城市园林植物的筛选及景观配置提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

延安市地处黄土高原丘陵沟壑区,位于东经 $107^{\circ}38'57''$,北纬 $35^{\circ}20'37''$,平均海拔 1 200 m,属于内陆干旱半干旱气候,年平均日照 2 300~2 700 h,年平均气温 $7.7\sim 10.6^{\circ}\text{C}$,年平均降雨量 500 mm,主要集中在 7—9 月。延安市内植物分布不均,树种单一,近山区主要树种有刺槐、侧柏和少量油松;城区分布的主要树种有国槐、垂柳等^[14]。由于地处黄土高原,扬沙天气频频出现使得该地区空气质量较差。此外,近些年随着延安社会经济和红色旅游业的繁荣发展,机动车尾气、燃油燃煤及锅炉烟尘等导致的大气硫化物等污染物的排放量大幅度增长。

1.2 研究方法

1.2.1 样区与树种的选择 根据延安市空气污染特点及不同绿化树种选择 4 个样地,分别为重度污染区(姚店工业区)、中度污染区(百米大道、小东门商业区)、轻度污染区(丽景花苑、虎头苑小区)和对照区(凤凰山、万花山景区),以上 4 个采样区空气中的 SO_2 平均质量浓度分别为 0.029 3, 0.019 7, 0.013 1 和 0.009 8 mg/L。在对延安城区现有园林绿化树种进行实地踏查的基础上,根据延安市的地理气候特点及绿化植物的生长适应性、观赏价值及综合应用频次,选取 15 种常见绿化植物作为供试材料(表 1)进行试验。

1.2.2 样叶的采集与处理 于 2012-08-21—22,在延安市各个样地分别采集样树叶片,每个树种设置 3 个重复,重复采样的树高、胸径和树龄必须一致或接近,在树冠外围上、中、下及四周均匀采集叶位相同或近似的样叶 400 g^[15]。郁梦德等^[16]的研究表明,植物叶片中的含硫量和硫的增加量主要与叶龄有关,而径级和树高对其影响不显著。因此本研究均采集一年生叶片,将所采叶片样品带回实验室后,先用自来水洗净,再用去离子水冲洗^[17],然后在 80°C 烘箱中烘干后,用粉碎机粉碎过孔径 0.2 mm 筛。精确称取 0.2 g 粉碎后样品置于 100 mL 三角瓶中,加入 5 mL 消化液(1.7 g 偏钒酸铵、1 200 mL 高氯酸、1 050 mL 硝酸、7.5 g 重铬酸钾)^[18],在电热板上保持 80°C 以下加热至不再出现黄烟,当消化液呈现淡绿色且产生高氯酸白烟及淡红色沉淀即可停止,用蒸馏水冲洗漏斗后,加 10 mL 混合酸(50 mL 冰醋酸、20 mL 盐酸、20 mL 磷酸)过滤,稀释定容至 25 mL。

1.2.3 叶片硫含量的测定 首先用比浊法^[19-20]配备标准溶液(溶液中硫质量浓度分别为 0, 20, 40, 60, 80, 100 $\mu\text{g/mL}$),定容后,利用原子吸收分光光度计在 440 nm 波长处测定吸光度后,绘制标准曲线,相关系数为 0.999 5。最后测定样品的硫含量,同一样品 3 次重复,结果取其平均值。

表 1 延安市 15 种供试园林树种及其生长状况

Table 1 15 trees and their growth parameters in Yan'an

树种 Species	胸径/cm DBH	树高/m Height	树种 Species	胸径/cm DBH	树高/m Height
垂柳 <i>Salix babylonica</i>	12.11	16.79	碧桃 <i>Prunus persica</i> var. <i>duplex rehderi</i>	6.85	3.23
旱柳 <i>Salix matsudana</i>	10.52	14.56	刺柏 <i>Juniperus formosana</i>	2.65	2.32
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	6.85	8.14	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	2.89	2.77
紫叶李 <i>Prunus ceratifer</i> cv. <i>pissardii</i>	4.21	4.88	榆树 <i>Ulmus pumila</i>	4.87	2.55
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	7.66	5.32	云杉 <i>Picea asperata</i>	3.97	1.48
龙爪槐 <i>Sophora japonica</i> cv. <i>pendula</i>	6.90	2.11	龙柏 <i>Juniperus chinensis</i> cv. <i>kaizuka</i>	—	0.49
国槐 <i>Sophora japonica</i>	11.91	5.82	紫叶小檗 <i>Berberis thunbergii</i> cv. <i>atropurpurea</i>	—	0.44
桃树 <i>Amygdalus persica</i>	6.52	2.23			

1.3 数据分析

用 SPSS17.0 软件对不同区域树种叶片的硫含量进行单因素方差分析(ANOVA),分析不同区域之间叶片硫含量的差异显著性。再用不同区域树种叶片硫含量减去相对清洁区树种叶片硫含量,即可得到不同树种的相对吸硫量^[21]。采用平均污染指数法^[22-23]计算树种的平均污染指数(TW),将其作为树种净化能力的评价指标,即平均吸硫量。平均污染指数计算公式为:

$$TW=\sum_{i=1}^n C_i/n,$$

表 2 陕西延安不同污染区域不同树种叶片硫含量的比较

树种 Species	重度污染区 Heavily polluted area	中度污染区 Moderately polluted area	轻度污染区 Lightly polluted area	对照区 CK plots
旱柳 <i>Salix matsudana</i>	7.63±0.17 bA	5.31±0.03 bB	3.56±0.04 bC	2.01±0.01 bD
垂柳 <i>Salix babylonica</i>	7.79±0.04 aA	5.87±0.02 aB	4.40±0.04 aC	2.81±0.03 aD
紫叶李 <i>Prunus ceratifer</i> cv. <i>pissardii</i>	2.05±0.03 dA	1.77±0.01 cA	1.18±0.01 gB	0.83±0.03 fB
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	2.12±0.05 cA	1.81±0.03 cA	1.40±0.03 dB	0.79±0.01 gC
桃树 <i>Amygdalus persica</i>	1.52±0.04 hA	1.27±0.02 hB	1.09±0.01 hB	0.62±0.02 hC
云杉 <i>Picea asperata</i>	1.10±0.05 kA	0.99±0.02 kA	0.71±0.01 kB	0.55±0.02 iB
碧桃 <i>Prunus persica</i> var. <i>duplex rehderi</i>	1.41±0.01 iA	1.22±0.01 iB	1.04±0.01 iB	0.58±0.01 hC
国槐 <i>Sophora japonica</i>	1.55±0.01 hA	1.32±0.03 gB	1.25±0.05 fB	0.83±0.01 fC
龙爪槐 <i>Sophora japonica</i> cv. <i>pendula</i>	1.66±0.01 gA	1.49±0.01 fB	1.33±0.01 eB	0.94±0.01 dC
龙柏 <i>Juniperus chinensis</i> cv. <i>kaizuka</i>	0.97±0.01 lA	0.88±0.01 lAB	0.81±0.01 jB	0.61±0.01 hC
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	1.89±0.01 eA	1.57±0.01 eB	1.42±0.01 dC	1.26±0.01 cD
刺柏 <i>Juniperus formosana</i>	1.37±0.01 iA	1.24±0.03 hB	1.16±0.03 gC	0.78±0.01 gD
紫叶小檗 <i>Berberis thunbergii</i> cv. <i>atropurpurea</i>	1.83±0.01 fA	1.69±0.01 dB	1.47±0.01 cB	1.26±0.03 cD
榆树 <i>Ulmus pumila</i>	1.21±0.01 gA	1.14±0.03 jB	1.09±0.07 hB	0.75±0.02 gC
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	1.23±0.07 gA	1.18±0.05 jA	1.03±0.02 iB	0.89±0.02 eC

注:同列数据后标不同小写字母表示不同树种间差异显著($P<0.05$),同行数据后标不同大写字母表示不同样地间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note:Lowercase letters in each column indicate significant difference among species at $P<0.05$ level while uppercase letters in each column indicate significant difference among regions at $P<0.05$ level. The same below.

表 2 表明,不同污染状况下,同一树种叶片硫含量存在明显差异。对同一树种而言,叶片硫含量随着空气污染程度的加重而升高,表现为重度污染区>中度污染区>轻度污染区>对照区。除紫叶李、刺槐、云杉、龙柏和侧柏叶片硫含量在重度污染区与轻度污染区之间无显著差异外,其他树种叶片

$C_i=C_m/C_k$ 。
式中: C_i 为污染指数, C_m 为采样区某种树的叶片硫含量, C_k 为对照区对应树种叶片硫含量, n 为相应树种所处污染区数量。

2 结果与分析

2.1 不同污染状况下不同树种之间叶片硫含量的比较

陕西延安地区不同程度空气污染区不同树种叶片硫含量的测定结果如表 2 所示。

硫含量均以重度污染区显著高于轻度污染区($P<0.05$);除桃树、碧桃、国槐、龙爪槐、龙柏、紫叶小檗和榆树叶片硫含量在中度污染区与轻度污染区无差异显著外,其他树种叶片硫含量在中度污染区与轻度污染区之间均有显著差异($P<0.05$)。

表 2 显示,在相同的污染环境,15 种树种对

硫元素的积累能力有明显差异。在重度污染区,旱柳、垂柳叶片硫含量分别为 7.63 和 7.79 mg/g,均显著高于其他树种;紫叶李和刺槐叶片硫含量次之,分别为 2.05 和 2.21 mg/g;其他树种叶片硫含量为 0.97~1.89 mg/g,均显著低于以上 4 个树种。在中度污染区,旱柳、垂柳叶片硫含量分别为 5.31 和 5.87 mg/g,均显著高于其他树种;紫叶李和刺槐叶片的硫含量次之,分别为 1.77 和 1.81 mg/g;其他树种叶片硫含量为 0.88~1.69 mg/g,均显著低于以上 4 个树种。在轻度污染区,旱柳、垂柳叶片硫含量分别为 3.56 和 4.40 mg/g,均显著高于其他树

种;紫叶小檗和臭椿叶片硫含量次之,分别为 1.42 和 1.47 mg/g;其他树种叶片硫含量为 0.71~1.40 mg/g,均显著低于以上 4 个树种。在对照区,旱柳、垂柳叶片硫含量也显著高于其他树种。

2.2 不同污染状况下不同树种吸硫量的比较

陕西延安不同污染区各树种相对吸硫量的测算结果见表 3。表 3 显示,不同污染状况下,同一树种叶片相对吸硫量存在显著差异,且均随空气污染程度的加重而升高,表现为重度污染区>中度污染区>轻度污染区。

表 3 陕西延安不同污染区各树种间相对吸硫量的比较

树种 Species	相对吸硫量/(mg·g ⁻¹) Sulfur absorption ability			TW
	重度污染区 Heavily polluted area	中度污染区 Moderately polluted area	轻度污染区 lightly polluted area	
旱柳 <i>Salix matsudana</i>	5.62 aA	3.30 aB	1.55 bC	2.64
垂柳 <i>Salix babylonica</i>	4.98 bA	3.06 bB	1.59 aC	2.28
紫叶李 <i>Prunus cerasifera</i> cv. <i>pissardii</i>	1.22 dA	0.55 eB	0.35 gC	1.95
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	1.33 cA	1.02 cA	0.61 cC	2.26
桃树 <i>Amygdalus persica</i>	0.89 eA	0.65 dB	0.47 dC	2.15
云杉 <i>Picea asperata</i>	0.55 iA	0.44 gA	0.16 iC	1.34
碧桃 <i>Prunus persica</i> . var. <i>duplex rehderi</i>	0.83 fA	0.64 dB	0.46 dC	2.20
国槐 <i>Sophora japonica</i>	0.73 gA	0.49 fB	0.43 eB	1.73
龙爪槐 <i>Sophora japonica</i> cv. <i>pendula</i>	0.72 gA	0.55 eB	0.38 fC	1.67
龙柏 <i>Juniperus chinensis</i> cv. <i>kaizuka</i>	0.36 kA	0.27 jA	0.19 hC	1.43
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	0.63 hA	0.31 iB	0.16 iC	1.30
刺柏 <i>Juniperus formosana</i>	0.59 hA	0.46 fB	0.38 fB	1.72
紫叶小檗 <i>Berberis thunbergii</i> cv. <i>atropurpurea</i>	0.57 iA	0.43 gB	0.21 hC	1.41
榆树 <i>Ulmus pumila</i>	0.46 jA	0.39 hB	0.34 gB	1.79
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	0.34 kA	0.29 jA	0.14 jB	1.13

表 3 表明,不同污染状况下 15 种树种的吸硫量也存在明显差异。在重度、中度和轻度污染区,旱柳、垂柳、刺槐叶片的相对吸硫量均显著高于其他树种。在重度污染区,各树种叶片相对吸硫量由大到小依次为:旱柳>垂柳>刺槐>紫叶李>桃树>碧桃>国槐>龙爪槐>臭椿>刺柏>紫叶小檗>云杉>榆树>龙柏>侧柏;在中度污染区,各树种叶片相对吸硫量由大到小依次为:旱柳>垂柳>刺槐>桃树>碧桃>龙爪槐>紫叶李>国槐>刺柏>云杉>紫叶小檗>榆树>臭椿>侧柏>龙柏。与重度污染区相比,除垂柳、旱柳和刺槐的叶片相对吸硫量排序靠前,侧柏、龙柏叶片相对吸硫量排序处于最末之外,其余树种相对吸硫量顺序不完全相同。在轻度污染区,各树种叶片相对吸硫量依次表现为:垂柳>旱柳>刺槐>桃树>碧桃>国槐>龙爪槐>刺柏>紫叶李>榆树>紫叶小檗>龙柏>臭椿>云杉>侧柏。

由表 3 还可知,旱柳、垂柳和刺槐的平均吸硫能

力最强,平均污染指数均较高,分别为 2.64,2.28,2.26;其次为碧桃、桃树、紫叶李、榆树、国槐、刺柏、龙爪槐、龙柏和紫叶小檗,云杉、臭椿和侧柏的平均吸硫能力均较差。

3 结论与讨论

本研究中,垂柳、旱柳等柳属植物的叶片硫含量较高,这与薛皎亮等^[24]对太原市不同植物叶片硫含量的研究结果一致。本研究结果显示,在不同污染条件下,同一树种的叶片硫含量表现出明显差异,其硫含量均随着空气污染程度的上升而增加,表现为重度污染区>中度污染区>轻度污染区>对照区。可以推测,在一定范围内,植物吸收的 SO₂ 量随环境 SO₂ 质量浓度的增大而增加,这与吴云霄等^[25]研究得出的“空气污染越严重,区域植物叶片硫含量越高”的结论相一致。

本研究发现,在相同的污染状况下,不同树种叶片对硫的相对吸收能力存在显著差异。在重度及中

度污染区中,垂柳、旱柳、刺槐叶片的相对吸硫量均显著高于其他树种,而龙柏、侧柏的吸硫能力较差;在轻度污染区中,垂柳、旱柳和碧桃叶片的相对吸硫量远高于其他树种,以云杉、臭椿和侧柏的吸硫能力较差^[26]。供试 15 种树种在不同污染状况下的相对吸硫量有明显差异,表现为重度污染区>中度污染区>轻度污染区,15 种树种平均吸硫能力的排序依次为:旱柳>垂柳>刺槐>碧桃>桃树>紫叶李>榆树>国槐>刺柏>龙爪槐>龙柏>紫叶小檗>云杉>臭椿>侧柏。

本研究中,不同污染状况下不同树种叶片硫含量及相对吸硫量的变化有一定差异,大部分树种的叶片硫含量越高,其相对吸硫量也越高,但有的树种并不遵循这一规律。如云杉在中度污染区叶片硫含量较低,仅为 0.99 mg/g,但其相对吸硫量却较高,为 0.44 mg/g;而紫叶小檗在中度污染区叶片硫含量为 1.69 mg/g,但其相对吸硫量却较低,仅为 0.43 mg/g。

本研究结果显示,在不同污染状态下,除垂柳、旱柳及刺槐叶片相对吸硫量较大外,其余树种相对吸硫量顺序完全不同。由此可以推断,植物相对吸硫量并非绝对随着污染区污染程度的上升而增加,即在一定范围内,叶片对二氧化硫的吸收量随着二氧化硫质量浓度的增加到达一定峰值后开始下降。导致这种情况的原因可能有 2 种:(1)当空气中 SO₂ 的质量浓度过高时,植物不仅不能积累过多的硫,还可能会导致植物体的含硫蛋白质遭到破坏^[27],这可以通过不同污染情况下植物含硫氨基酸含量的变化来进一步研究。(2)植物对其他污染物如重金属的吸收,可能会对植物的吸硫能力产生抑制作用^[28],这一点在选取吸硫植物时也应加以考虑。

本研究中,阔叶树种的相对吸硫量随着叶片硫含量的升高而升高,两者之间呈正相关;针叶树种相关性则极低,如云杉,其在各个污染区对硫的吸收能力均表现较差,但是其相对吸硫量却较高,可能与针叶树种的叶量及叶的表面特征^[29-30](气孔开度、皱纹、油脂)等因素有关。因此,针叶树种叶片对硫的吸收积累及其相对吸硫量呈现出相当复杂的关系,应该进一步研究探索。

[参考文献]

[1] 康博文,刘建军,侯琳,等.延安市城市森林健康评价[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2003,34(10):81-86.
Kang B W,Liu J J,Hou L,et al. Health assessment of urban forest ecosystem in Yan'an City [J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Nature Science

Edition,2003,34(10):81-86. (in Chinese)
[2] 屈永建,聂西省,韩虹,等.延安市绿地系统规划[J].西北林学院学报,2001,16(3):57-60.
Qu Y J,Nei X S,Han H,et al. Greenbelt system of Yan'an City planning [J]. Journal of Northwest Forest University, 2001,16(3):57-60. (in Chinese)
[3] 何兴元,金莹杉,朱文泉,等.城市森林生态学的基本理论与研究方法[J].应用生态学,2002,13(12):1679-1683.
He X Y,Jin Y S,Zhu W Q,et al. Basic theory and research method of urban forest ecology [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2002,13(12):1679-1683. (in Chinese)
[4] 陶豫萍,吴宁,罗鹏,等.森林对污染物(SO₂²⁻)的过滤器效应研究[J].长江流域资源与环境,2005,14(5):628-632.
Tao Y P,Wu N,Luo P,et al. Review on the function of forest filter in buffering SO₂²⁻ contamination [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2005,14(5):628-632. (in Chinese)
[5] 陈昕,王保莉,曲东,等.植物硫转运蛋白研究进展[J].西北植物学报,2004,24(10):1966-1971.
Chen X,Wang B L,Qu D,et al. Advance of sulphate transporters of plant [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2004,24(10):1966-1971. (in Chinese)
[6] 彭长连,温达志,孙梓健,等.城市绿化植物对大气污染的影响[J].热带亚热带植物学报,2002,10(4):321-327.
Peng C L,Wen D Z,Sun Z J,et al. Respons of some plants for municipal greening to air pollutants [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany,2002,10(4):321-327. (in Chinese)
[7] Paul B K,Smith P H. Particulate pollution capture by urban trees;Effect of species and windspeed [J]. Global Change Biology,2000,6:995-1003.
[8] 陶玲,任珺,杜忠. SO₂ 对兰州市主要绿化树种形态症状的影响[J].环境科学研究,2009,32(6):34-37.
Tao L,Ren J,Du Z,et al. Effect of SO₂ pollution on morphological symptoms of landscaping tree species in Lanzhou [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 32 (6): 34-37. (in Chinese)
[9] 温达志,孔国辉,张德强,等.30 种园林植物对短期大气污染的生理生态反应[J].植物生态学报,2003,27(3):311-317.
Wen D Z,Kong G H,Zhang D Q,et al. Ecophysiological responses of 30 gardens plant species exposed to short-term air pollution [J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2003,27(3):311-317. (in Chinese)
[10] 何蓉,张学星,施莹,等.绿化树种叶片中硫元素的含量特征[J].云南环境科学,2006,25(6):6-9.
He R,Zhang X X,Shi Y,et al. Content characteristics of sulfur in greening tree species [J]. Yunnan Environmental Science,2006,25(6):6-9. (in Chinese)
[11] 孙淑萍,邱靖,万欣,等.3 种垂直绿化植物对 SO₂ 的净化能力及其生理生化反应[J].沈阳农业大学学报,2010,41(4):438-443.
Sun S P,Qiu J,Wan X,et al. Absorption abilities,physiological and biochemical responses of three vertical greening plants to SO₂ [J]. Journal of Shenyang Agricultural University,

- 2010,41(4):438-443. (in Chinese)
- [12] 邱媛,管东生,陈华,等.惠州绿化乔木叶片及其叶面降尘对大气 SO₂ 污染的生物监测 [J]. 生态环境,2007,16(2):317-322.
- Qiu Y, Guan D S, Chen H, et al. Biomonitoring atmospheric sulfur dioxide using urban tree leaves and foliar dusts in Huizhou, Guangdong province [J]. Ecology and Environment, 2007,16(2):317-322. (in Chinese)
- [13] 廖飞勇,何平,谢瑛. SO₂ 对植物光合作用影响的研究进展 [J]. 经济林研究,2003,21(3):85-87.
- Liao F Y, He P, Xie Y. The evolution of the effect of SO₂ on plant [J]. Economic Forest Researches, 2003, 21(3): 85-87. (in Chinese)
- [14] 杜锦华. 延安市园林绿化树种的调查研究 [J]. 延安大学学报:自然科学版,2009,28(1):76-80.
- Du J H. Study on the investigation of garden plants in Yan'an City [J]. Journal of Yan'an University: Nat Sci Edi, 2009, 28(1):76-80. (in Chinese)
- [15] 张家洋,朱南,李慧,等. 10 种常见绿化树种叶片含硫量差异性分析 [J]. 西北师范大学学报:自然科学版,2012,48(4):115-120.
- Zhang J Y, Zhu N, Li H, et al. Difference analysis on foliage sulfur content of 10 common afforestation trees [J]. Journal of Northwest Normal University: Natural Science, 2012, 48(4):115-120. (in Chinese)
- [16] 郁梦德,余清发. 接骨草叶片硫的积累与转移 [J]. 生态学报,1986,6(2):101-106.
- Yu M D, Yu Q F. Accumulation and translocation of sulfur by *Gendarussa vulgaris* [J]. Acta Ecologica Sinica, 1986, 6(2):101-106. (in Chinese)
- [17] Codzik S, Staszewski T. The effects of pine (*Pinus sylvestris* L.) needle surface wax layer structure on water loss and uptake of ¹⁴CO₂ and ³⁵SO₂ [C]//Percy K E, Cape J N, Jagels R, et al. Air pollutant and the leaf cuticle. Amsterdam: Elsevier Science Press, 1994:269-276.
- [18] 胡舒,肖昕,贾含帅. 不同污染条件下绿化树种对大气二氧化硫吸收积累能力的研究 [J]. 北方园艺,2012(11):69-72.
- Hu S, Xiao X, Jia H S. Research on absorption and accumulation capacity of tree species to SO₂ under different polluted conditions [J]. Northern Horticulture, 2012(11): 69-72. (in Chinese)
- [19] 张志杰,张维平. 环境污染生物监测与评价 [M]. 北京:中国环境科学出版社,1991.
- Zhang Z J, Zhang W P. Biological monitoring and assessment in environmental pollution [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1991. (in Chinese)
- [20] 国家环境保护局. 空气和废气监测分析方法 [M]. 北京:中国环境科学出版社,1990.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Analysis method for monitoring air and waste gas [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. (in Chinese)
- [21] 刘艳菊,丁辉. 植物叶片相对吸硫量的研究及在绿化中的应用 [J]. 城市环境与城市生态,2003,16(2):10-12.
- Liu Y J, Ding H. Sulfur absorption ability by plant leaves and its use in landscape [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2003,16(2):10-12. (in Chinese)
- [22] 丁桑兰. 环境影响评价概论 [M]. 北京:化学工业出版社,2001.
- Ding S L. Concept of environment impact assessment [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [23] 冯采芹. 绿化环境效应研究 [M]. 北京:中国环境科学出版社,1992.
- Feng C Q. Study on greening effect [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1992. (in Chinese)
- [24] 薛皎亮,谢映平,李景平,等. 太原市空气中硫污染物在植物体内积累的研究 [J]. 城市环境与城市生态,2001,14(1):47-49.
- Xue J L, Xie Y P, Li J P, et al. Accumulation of air sulfide pollutant in the body of plants in Taiyuan City [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2001, 14(1): 47-49. (in Chinese)
- [25] 吴云霄,王海洋,董仕平. 重庆市主城区主要绿化植物叶片含硫量分析 [J]. 林业调查规划,2006,31(3):118-121.
- Wu X H, Wang H Y, Dong S P. Analysis on sulphur content of leaf blades of main green plants in central downtown of Chongqing City [J]. Forest Inventory and Planning, 2006, 31(3):118-121. (in Chinese)
- [26] 孙向武,徐克,王均国,等. 大气污染物的植物修复 [J]. 湖北农业科学,2009,48(5):1256-1259.
- Sun X W, Xu K, Wang J G, et al. Phytoremediation on air pollution [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2009, 48(5): 1256-1259. (in Chinese)
- [27] 侯恩庆,谭家得,黎建力,等. 陶瓷工业污染区污染元素在 8 种树种中的积累与分布 [J]. 热带亚热带植物学报,2011,19(5):438-445.
- Hou E Q, Tan J D, Li J L, et al. Allocation and accumulation of pollutants in 8 tree species grown in ceramic industry polluted area [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2011, 19(5):438-455. (in Chinese)
- [28] Domenica H, Simon S, Andren B, et al. Impact of SO₂ on *Arabidopsis thaliana* transcriptome in wildtype and sulfite oxidase knockout plants analyzed by RNA deep sequencing [J]. New Phytologist, 2012, 196:1074-1085.
- [29] 张明明,高瑞馨. 针叶植物叶片比较解剖及生态解剖研究综述 [J]. 森林工程,2013,28(2):9-13.
- Zhang M M, Gao R X. Research review on comparative anatomy and ecological anatomy of conifers blade [J]. Forest Engineering, 2013, 28(2):9-13. (in Chinese)
- [30] 张楠,贺学林,韩英. 榆林市城区常绿针叶植物滞尘能力的研究 [J]. 安徽农业科学,2009,37(26):12519-12521.
- Zhang N, He X L, Han Y. Study on the dust catching property of the evergreen coniferophyte in Yulin City [J]. Journal of Anhui Agri Sci, 2009, 37(26):12519-12521. (in Chinese)