

浙北 52 种景观树种对大气硫、氟污染物吸收富集能力研究

顾洪涛¹, 顾沈华^{2*}, 刘丽月², 吴小双², 王宝印³, 虞木奎^{1*}

(1. 华东沿海防护林生态系统国家定位观测研究站, 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 314000; 2. 嘉兴市林特技术推广总站, 浙江嘉兴 314050; 3. 嘉兴市环境保护监测站, 浙江嘉兴 314000)

摘要: 为探究浙北地区常见景观树种对大气硫、氟污染物的吸收净化能力, 采用典型调查法对嘉兴市北部化工区(污染区)和中央公园(清洁区)共 52 种景观树种叶片的硫、氟含量进行测定, 对其在污染环境吸收富集硫、氟污染物的能力进行评价。结果表明, 浙北地区 52 种景观树种叶片硫、氟含量差异较大, 不同采样点和不同生活型之间的变异也较大。灌木树种叶片硫和氟含量略低于乔木, 但高于小乔木; 落叶树种叶片硫和氟含量均高于常绿树种。依据叶片对硫、氟的生物富集系数(BCF)和叶片的硫、氟含量, 将这 52 种景观植物分为 5 大类, 筛选出对硫、氟污染的综合修复能力较强的树种, 如杨树(*Pterocarya stanoptera*)、柳树(*Salix babylonica*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、广玉兰(*Magnolia grandiflora*)、红花继木(*Loropetalum chinense*)、榉树(*Zelkova serrata*)、桂花(*Osmanthus fragrans*)和红枫(*Acer palmatum 'Atropurpureum'*)等。这些可为浙北地区植物修复化工区硫、氟污染研究提供借鉴。

关键词: 景观树种; 大气污染; 硫; 氟; 植物修复; 浙北地区

doi: 10.11926/jtsb.3721

Study on the Enrichment Abilities of 52 Landscape Trees on Atmospheric Sulfur and Fluorine Pollutions in Northern Zhejiang

XIE Hong-tao¹, GU Sheng-hua^{2*}, LIU Li-yue², WU Xiao-shuang², WANG Bao-yin³, YU Mu-kui^{1*}

(1. National Research Station of Eastern China Coastal Forest Ecosystem, Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China; 2. Jiaxing Extension Station of Forestry Specialty Technology, Jiaxing 314050, Zhejiang, China; 3. Jiaxing Station of Environmental Protection and Monitoring, Jiaxing 314050, Zhejiang, China)

Abstract: To evaluate the absorption and purgation capacity of 52 landscape trees to atmospheric sulfur (S) and fluorine (F) pollution in Northern Zhejiang, the leaf S and F contents of trees grown in chemical industry zone (pollution area) and Central Park (clean area) were determined, and their phytoremediation capabilities to pollution environment were evaluated. The results showed that there were significant differences in leaf S and F contents among 52 species, and variations between different sampling points and different life forms were also significant. The absorption efficiencies of shrub on S and F were both slightly lower than that of arbor, but higher than small arbor, meanwhile, the leaf S and F contents of deciduous species were higher than that of evergreen species. According to the leaf bioconcentration factors (BCF) and contents of S and F in species, these 52

收稿日期: 2017-01-17

接受日期: 2017-02-15

基金项目: 中国林业科学研究院与浙江省合作项目(16204002, 16204005); 嘉兴市科学技术局公益性应用技术研究计划项目(2014AY21019); 浙江省林科院应用技术研究项目(14204005)资助

This work was supported by the Cooperative Project between Chinese Academy of Forestry and Zhejiang Province (Grant No. 16204002, 16204005), the Public Applied Technology Research Program of Jiaxing Science and Technology Bureau (Grant No. 2014AY21019), and the Application Technology Research of Zhejiang Academy of Forestry (Grant No. 14204005).

作者简介: 顾洪涛(1989-), 男, 博士研究生, 研究方向为生态系统功能。E-mail: xiehongtaode@126.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: hylh2003@163.com, yumukui@sina.com

landscape trees could be divided into five clusters, and several species with higher comprehensive absorption ability on S and F pollutions were screened out, such as *Pterocarya stenoptera*, *Salix babylonica*, *Pyracantha fortuneana*, *Magnolia grandiflora*, *Loropetalum chinense*, *Zelkova serrata*, *Osmanthus fragrans* and *Acer palmatum* 'Atropurpureum', et al. These would provide references for the pollution control of S and F as well as phytoremediation in northern Zhejiang.

Key words: Landscape trees; Atmospheric pollution; Sulfur; Fluorine; Phytoremediation; Northern Zhejiang

工业发展给城市繁荣注入动力,同时也带来不可避免的环境污染问题,尤其是城市化工区不仅对周边区域的生态环境造成影响,降低生态系统功能的发挥,还威胁到人居环境的安全^[1]。城市景观绿化树种对于大气污染物不仅有一定的抵抗能力,而且也有相当程度的吸收净化能力^[2]。由于不同树种对特定污染物的耐受范围不同,因而在对污染物的植物修复(Phytoremediation)能力上也有差异^[3]。在化工区周围布局吸收主要污染物能力强的景观树种不仅能有效且经济地改善环境质量、降低污染物危害,还能更大限度地发挥城市景观树种的生态功能,这对于城市的绿色发展有重要意义。因此筛选对污染区主要大气污染物吸收净化能力较强的树种对于更好地发挥植物修复功能至关重要。近年来,对特定区域内城市绿化植物的大气环境效益进行了研究,主要针对园林植物吸收积累大气硫、铅等污染物,并且筛选出了一批具有代表性的抗污染物、吸收同化污染物能力较强的植物^[4]。王爱霞等^[5]分析了南京市 14 种绿化树种对空气中重金属的累积能力并对其累积等级进行划分,筛选出杨树(*Pterocarya stenoptera*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)等累积铅、镉和铜能力最强的树种。方颖等^[6]对南京市不同功能绿地类型的 26 种主要绿化树种净化大气固体悬浮物的能力进行了监测分析,认为相对于乔木而言,灌木具有更大的滞尘量。这些研究大都侧重于植物对固体颗粒污染物的吸收^[7]、净化能力^[8]上,对植物吸收气体污染物的研究则更多侧重于绿化植物对气体的阻滞作用^[9]以及特定植物对污染气体的吸收效率上^[10],但对不同功能区以及不同生活型树种吸收污染气体能力的比较研究还较少。

浙北地区(嘉兴、湖州和杭州)经济发达,人口稠密,但布局了不少化工企业,尤其是一些化纤、皮革企业,会产生大量的气体污染物,以硫氧化物、氟氧化物以及氯氧化物为主。经过前期的实地调查和样地考察,我们确定以大气硫、氟污染比较典型的嘉兴市北部化工区作为研究区域,在污染区周围

设立 9 个等距样点对目标树种叶片进行采样分析,并对照清洁区筛选对大气硫、氟污染物吸收净化能力较强的景观树种,同时比较不同景观树种对硫、氟污染综合修复能力的差异,重点探讨不同功能区景观树种叶片硫、氟含量的分布特征和差异,以及不同生活型景观树种叶片吸收硫、氟污染物综合能力的差别,为指导化工区景观树种的合理搭配,在水平和垂直方向上均形成较为科学的空间配置提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验地点位于浙江省嘉兴市北部化工区附近(30°20' N, 120°17' E),属亚热带季风区和半湿润气候区,年均气温 15.9℃,年均日照时数 2017.0 h,年均降雨量 1193.7 mm,无霜期 230 d 左右,夏秋以东风为主导风向。土壤以堆叠土为主,水稻土和潮土为基本土类。绿化植物以中亚热带北缘常绿阔叶、落叶阔叶树种为主,目前自然植被已基本被人工植被替代,现有绿化植物以双子叶植物为主,主要有禾本科(Gramineae)、蔷薇科(Rosaceae)、豆科(Leguminosae)、菊科(Compositae)、柏科(Cupressaceae)、大戟科(Euphorbiaceae)、木犀科(Oleaceae)、唇形科(Labiatae)和忍冬科(Caprifoliaceae)等。

1.2 调查及取样方法

本研究开展于 2016 年 9-10 月,首先对浙北地区常见景观树种的组成和分布进行调查,并查阅各地区园林部门留存资料,筛选出 52 种测试树种,分别隶属于 32 科 50 属,其中乔木[高度(H)>10 m] 24 种,小乔木(6 m<H<10 m) 12 种,灌木(H<6 m) 16 种(表 1)。乔木林龄为 15~25 年,灌木林龄为 5~10 年,均在污染环境中自然生长了 5 年以上。该化工区的气体污染物以硫氧化物、氟氧化物和氯氧化物为主,夏秋排放量较大,其气体污染物浓度约为清

洁区的 2~3 倍。以企业排污点为中心, 分别在距离化工区污染源 100 m、600 m 和 1200 m 处设置 3 条长度为 1500 m, 垂直于污染物扩散方向(向西)的样带, 每个样带上均匀设置 3 个样点, 再在距离污染区 8000 m 处设置一个清洁对照区, 在每个样点和清洁区分别采集足量叶片和土壤样品。采集叶片

时, 每个树种选取生长状况良好且较一致的 3 株树, 乔木树种胸径大于 10 cm, 灌木树种基径大于 6 cm, 采集面向污染源方向的中高层成熟叶片装于信封袋中, 贴签标记带回实验室处理。用土壤采集器收集各样点 0 cm、20 cm 和 40 cm 处的土壤样品做混合样, 存于封口袋中带回实验室处理。

表 1 浙北地区 52 种景观树种

Table 1 Fifty-two garden species in northern Zhejiang

编号 No.	植物 Species	类型 Type	编号 No.	种类 Species	类型 Type
1	*香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	乔木 Arbor	27	红叶李 <i>Prunus cerasifera</i>	小乔木 Small arbor
2	杨树 <i>Pterocarya stenoptera</i>	乔木 Arbor	28	日本樱花 <i>Cerasus yedoensis</i>	小乔木 Small arbor
3	柳树 <i>Salix babylonica</i>	乔木 Arbor	29	*石楠 <i>Photinia serrulata</i>	小乔木 Small arbor
4	*湿地松 <i>Pinus elliottii</i>	乔木 Arbor	30	*火棘 <i>Pyracantha fortuneana</i>	灌木 Shrub
5	*雪松 <i>Cedrus deodara</i>	乔木 Arbor	31	*桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	小乔木 Small arbor
6	黄山栾树 <i>Koelreuteria integrifoliola</i>	乔木 Arbor	32	*大叶女贞 <i>Ligustrum compactum</i>	小乔木 Small arbor
7	无患子 <i>Sapindus mukurossi</i>	乔木 Arbor	33	*山茶 <i>Camellia japonica</i>	灌木 Shrub
8	合欢 <i>Albizia julibrissin</i>	乔木 Arbor	34	*海桐 <i>Pittosporum tobira</i>	灌木 Shrub
9	紫荆 <i>Cercis chinensis</i>	灌木 Shrub	35	*杜鹃花 <i>Rhododendron simsii</i>	灌木 Shrub
10	*广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	乔木 Arbor	36	*夹竹桃 <i>Nerium indicum</i>	灌木 Shrub
11	玉兰 <i>M. denudata</i>	小乔木 Small arbor	37	木芙蓉 <i>Hibiscus mutabilis</i>	灌木 Shrub
12	鹅掌楸 <i>Liriodendron chinense</i>	乔木 Arbor	38	金丝桃 <i>Hypericum monogynum</i>	灌木 Shrub
13	*乐昌含笑 <i>Michelia chapensis</i>	乔木 Arbor	39	石榴 <i>Punica granatum</i>	灌木 Shrub
14	山杜英* <i>Elaeocarpus sylvestris</i>	乔木 Arbor	40	*龟甲冬青 <i>Ilex crenata</i>	灌木 Shrub
15	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	乔木 Arbor	41	紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i>	灌木 Shrub
16	*红花继木 <i>Loropetalum chinense</i>	灌木 Shrub	42	三球悬铃木 <i>Platanus orientalis</i>	乔木 Arbor
17	水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	乔木 Arbor	43	梧桐 <i>Firmiana platanifolia</i>	乔木 Arbor
18	池杉 <i>Taxodium ascendens</i>	乔木 Arbor	44	*箬竹 <i>Indocalamus</i> sp.	灌木 Shrub
19	银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	乔木 Arbor	45	*棕榈 <i>Trachycarpus fortunei</i>	乔木 Arbor
20	榉树 <i>Zelkova serrata</i>	乔木 Arbor	46	*龙柏 <i>Sabina chinensis</i>	小乔木 Small arbor
21	榆树 <i>Ulmus pumila</i>	乔木 Arbor	47	琼花 <i>Viburnum macrocephalum</i>	灌木 Shrub
22	沙朴 <i>Aphananthe aspera</i>	乔木 Arbor	48	*珊瑚树 <i>V. odoratissimum</i>	小乔木 Small arbor
23	构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>	乔木 Arbor	49	红枫 <i>Acer palmatum</i> 'Atropurpureum'	小乔木 Small arbor
24	桑树 <i>Morus alba</i>	小乔木 Small arbor	50	*大叶黄杨 <i>Buxus megistophylla</i>	灌木 Shrub
25	海棠 <i>Malus spectabilis</i>	灌木 Shrub	51	乌柏 <i>Sapium sebiferum</i>	乔木 Arbor
26	桃 <i>Amygdalus persica</i>	小乔木 Small arbor	52	*香泡 <i>Citrus medica</i>	小乔木 Small arbor

*: 常绿树种。

*: Evergreen species.

1.3 样品处理及检测

将带回实验室的植物叶片用毛刷除尘后用纯净水冲洗干净, 置于 100℃烘箱中杀青 4 h 后, 80℃恒温烘干 48 h, 粉碎过 80 目筛留用。土壤样品采用自然风干法, 研磨过 80 目筛留用。将处理过的叶片和土壤样品送至国家林业局经济林产品质量检验检测中心(杭州)检测样品中硫(S)和氟(F)元素的含量。叶片硫含量测定采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)^[11], 叶片氟含量和土壤氟含量测定均采用氟离子选择电极法^[12]; 土壤硫含量测定采用元素分析仪法^[13]。

1.4 数据分析及处理

污染区和清洁区乔木、小乔木和灌木叶片硫、氟含量分别以各样点叶片硫、氟含量的算术平均值表示, 土壤硫、氟含量分别为各样点的算术平均值。在 Microsoft Excel 2010 中进行数据整理和作图, 在统计软件 SPSS 20.0 (IBM, USA)中进行数据统计分析, 在 Origin 9.1 中进行聚类分析。污染区和清洁区树木叶片以及不同类型树木叶片硫、氟含量分别用单因素方差分析(One-Way ANOVA)进行差异显著性检验。首先对数据进行方差齐性检验, 方差齐性时, 用 Duncan 进行组间差异显著性检验分析; 当

方差非齐性时,用 Tamhane 进行组间差异显著性检验分析,显著性水平设置为 $\alpha=0.05$ 。各景观树种叶片对硫和氟的富集能力用生物富集系数来衡量,对硫、氟污染物综合吸收能力的评价用聚类分析来实现。

2 结果和分析

2.1 叶片硫、氟含量的分布特征

浙北地区 52 种景观树种叶片硫含量和氟含量差异均较大,由图 1 可知,叶片硫含量和氟含量分布的

偏度值均 >1 ,呈偏态分布,经 Kolmogorov-Smirnov 检验(K-S 检验),不服从正态分布($P<0.05$)。叶片硫和氟含量均存在较强的变异性,且氟含量的变异性大于硫含量,叶片硫含量的最大值和最小值相差 7 倍以上,叶片氟含量相差 13 倍以上。叶片硫含量集中分布在 $1\sim 5\text{ g kg}^{-1}$ 的区间,占总样本数的 90% 以上,而叶片氟含量则集中分布在 $5\sim 15\text{ mg kg}^{-1}$ 的区间,占总样本数的 80% 以上。叶片硫含量分布的极大值较多,而叶片氟含量分布的极大值相对较少。总体来说,这 52 种景观树种叶片硫和氟含量分布较为相似,但树种之间体现了差异分布。

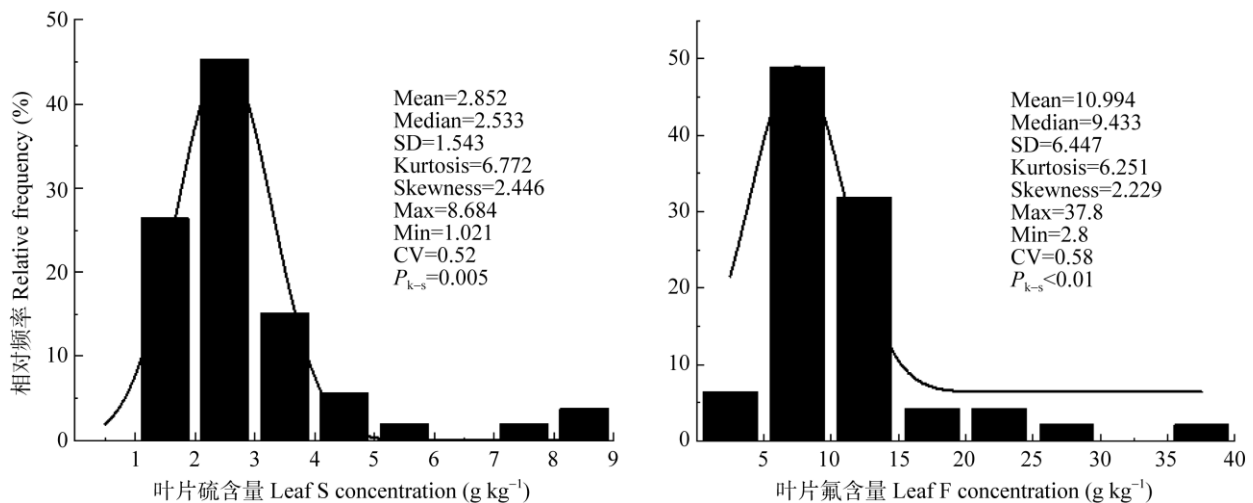


图 1 浙北地区 52 种景观树种叶片硫、氟含量的频数分布。 $n=492$; Mean: 平均值; Median: 中位数; SD: 标准差; Kurtosis: 峰度; Skewness: 偏度; Max: 最大值; Min: 最小值; CV: 变异系数; P_{k-s} : K-S 检验显著性。

Fig. 1 Histogram of leaf S and F concentration in 52 landscape trees in northern Zhejiang. $n=492$; Mean: Average; Median: Median; SD: Standard deviation; Kurtosis: Kurtosis; Skewness: Skewness; Max: Maximum; Min: Minimum; CV: Coefficient of variation; P_{k-s} : K-S significant test.

2.2 不同生活型景观树种叶片硫、氟含量比较

不同取样点以及不同生活型景观树种的叶片硫和氟含量均有差异,其中,化工区各生活型树种的叶片硫含量均高于清洁区;化工区乔木、小乔木和落叶树种的叶片氟含量高于清洁区,而灌木和常绿树种叶片氟含量低于清洁区。不管是在化工区还是清洁区,乔木树种叶片含硫和氟量均大于小乔木;化工区灌木叶片硫含量和清洁区灌木叶片氟含量也均高于小乔木,因此,灌木叶片对硫和氟的吸收效率略低于乔木,但高于小乔木。和常绿树种相比,清洁区落叶树种叶片硫和氟含量均高于常绿树种但差异不显著,但是在污染区落叶树种叶片氟含量显著高于常绿树种($P<0.05$)。

2.3 不同景观树种叶片对硫和氟的富集能力

植物对某种元素的积累能力可以用生物富集系数(Bioconcentration factor, BCF)来表示^[14-16],可用植物中某元素的含量与土壤中该元素含量的比值来计算,体现植物对该元素的富集能力^[17]。植物某部分 BCF 数值越大,证明植物该部分对某元素的富集能力越强^[18]。由图 2 可见,在浙北地区 52 种景观树种中,叶片对硫富集能力较强的树种有杨树(*Pterocarya stenoptera*)、柳树(*Salix babylonica*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、金丝桃(*Hypericum monogynum*)、玉兰(*Magnolia denudata*)和银杏(*Ginkgo biloba*)等,较弱的树种有山杜英(*Elaeocarpus sylvestris*)、海棠(*Malus spectabilis*)、榆树(*Ulmus*

pumila)和乌桕(*Sapium sebiferum*); 叶片对氟富集能力较强的树种有三球悬铃木(*Platanus orientalis*)、榉树(*Zelkova serrata*)、雪松(*Cedrus deodara*)、石榴(*Punica granatum*)、红枫(*Acer palmatum 'Atropurpureum'*)和红花继木(*Loropetalum chinense*)等, 较弱的树种有无患子(*Sapindus mukurossi*)、合欢(*Albizia julibrissin*)、桑树(*Morus alba*)和乌桕(*Sapium sebiferum*)等。总体上, 叶片对硫的富集能力相对较强, 而对氟的富集能力则相对较弱。杨树和柳树叶片对硫和氟的富集能力都很强, 而乌桕叶片对硫和氟的富集能力都很弱。但乌桕、无患子等富集能力较弱的植物均在化工区硫、氟污染环境中长势良好, 不但表现出很强的污染抗性, 而且对硫和氟也有很强的吸收净化能力, 均是比较有潜力的城市景观绿化树种, 布局在不同的区域可能会发挥更好的环境效益。

2.4 叶片吸收硫、氟污染物综合能力分析

运用系统聚类法(Hierarchical clustering method)

对浙北地区不同景观树种叶片吸收硫、氟污染的综合能力进行聚类分析, 以各树种叶片硫含量、氟含量、对硫的富集系数和对氟的富集系数为聚类要素, 可将这 52 种景观树种分为 5 大类(图 3)。第一类为叶片对硫、氟污染吸收的综合能力最强, 有杨树、柳树和火棘; 第二类对硫、氟污染的综合吸收能力较强, 有雪松、广玉兰(*Magnolia grandiflora*)、红花继木、榉树、桂花(*Osmanthus fragrans*)和红枫等; 第三类对硫、氟污染的综合吸收能力中等, 有银杏、玉兰、棕榈(*Trachycarpus fortunei*)和金丝桃等; 第四类对硫、氟污染的综合吸收能力较弱, 有湿地松(*Pinus eliottii*)、无患子、紫荆(*Cercis chinensis*)、鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)、红叶李(*Prunus cerasifera*)和木芙蓉(*Hibiscus mutabilis*)等 19 种景观树种; 第五类对硫、氟污染的综合修复能力最弱, 有香樟(*Cinnamomum camphora*)、合欢、黄山栎树(*Koelreuteria integrifoliola*)、大叶黄杨(*Buxus megistophylla*)、石榴和紫薇(*Lagerstroemia indica*)等 19 种。因此在距离化工区污染源较近的

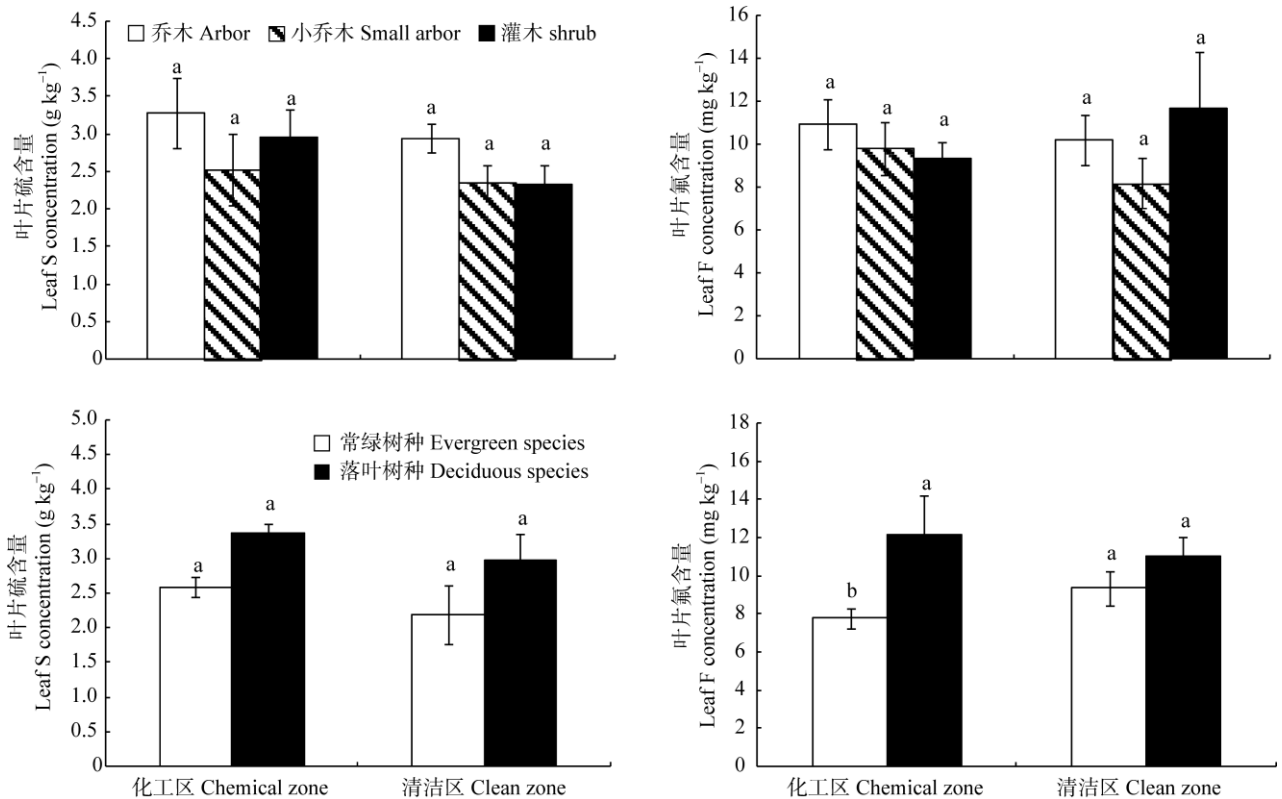


图 2 浙北地区不同生活型景观树种叶片硫、氟含量。柱上不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Fig. 2 Leaf S and F concentrations of landscape trees with different life forms in northern Zhejiang. Different small letters upon column indicate significant differences at 0.05 level.

表 2 浙北地区 52 种景观树种叶片对硫和氟的生物富集系数

Table 2 BCFs of 52 landscape trees leaves on S and F in northern Zhejiang

植物 Species	BCF _S	BCF _F	植物 Species	BCF _S	BCF _F
香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	10.98	0.220	红叶李 <i>Prunus cerasifera</i>	8.75	0.450
杨树 <i>Pterocarya stenoptera</i>	32.91	0.497	日本樱花 <i>Cerasus yedoensis</i>	9.54	0.286
柳树 <i>Salix babylonica</i>	34.78	0.369	石楠 <i>Photinia serrulata</i>	11.07	0.235
湿地松 <i>Pinus elliotii</i>	7.80	0.344	火棘 <i>Pyracantha fortuneana</i>	27.82	0.304
雪松 <i>Cedrus deodara</i>	9.02	0.765	桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	15.11	0.520
黄山栎 <i>Koelreuteria integrifoliola</i>	12.57	0.321	大叶女贞 <i>Ligustrum compactum</i>	8.64	0.281
无患子 <i>Sapindus mukurossi</i>	7.92	0.157	山茶花 <i>Camellia japonica</i>	10.27	0.295
合欢 <i>Albizia julibrissin</i>	11.14	0.131	海桐 <i>Pittosporum tobira</i>	8.58	0.314
紫荆 <i>Cercis chinensis</i>	7.96	0.213	杜鹃花 <i>Rhododendron simsii</i>	11.56	0.216
广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	11.76	0.494	夹竹桃 <i>Nerium indicum</i>	9.48	0.355
玉兰 <i>M. denudata</i>	19.70	0.410	木芙蓉 <i>Hibiscus mutabilis</i>	7.48	0.340
鹅掌楸 <i>Liriodendron chinense</i>	8.91	0.202	金丝桃 <i>Hypericum monogynum</i>	19.53	0.429
乐昌含笑 <i>Michelia chapensis</i>	6.22	0.400	石榴 <i>Punica granatum</i>	13.24	0.588
山杜英 <i>Elaeocarpus sylvestris</i>	4.86	0.329	龟甲冬青 <i>Ilex crenata</i>	11.74	0.315
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	6.53	0.514	紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i>	12.40	0.227
红花继木 <i>Loropetalum chinense</i>	11.97	0.560	三球悬铃木 <i>Platanus orientalis</i>	14.83	0.873
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	8.08	0.260	梧桐 <i>Firmiana platanifolia</i>	7.53	0.272
池杉 <i>Taxodium ascendens</i>	9.16	0.282	箬竹 <i>Indocalamus sp.</i>	6.16	0.333
银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	15.59	0.395	棕榈 <i>Trachycarpus fortunei</i>	13.48	0.442
榉树 <i>Zelkova serrata</i>	9.80	0.658	龙柏 <i>Sabina chinensis</i>	11.79	0.462
榆树 <i>Ulmus pumila</i>	4.92	0.202	琼花 <i>Viburnum macrocephalum</i>	14.09	0.471
沙朴 <i>Aphananthe aspera</i>	7.05	0.229	珊瑚树 <i>V. odoratissimum</i>	10.28	0.256
构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>	9.90	0.284	红枫 <i>Acer palmatum 'Atropurpureum'</i>	10.70	0.580
桑树 <i>Morus alba</i>	11.55	0.225	大叶黄杨 <i>Buxus megistophylla</i>	9.67	0.273
海棠 <i>Malus spectabilis</i>	5.39	0.234	乌柏 <i>Sapium sebiferum</i>	5.37	0.229
桃 <i>Amygdalus persica</i>	7.62	0.377	香泡 <i>Citrus medica</i>	13.50	0.243

BCF_S: 叶片对硫的富集系数; BCF_F: 叶片对氟的富集系数。

BCFs: Bioconcentration factors of leaves on S; BCF_F: Bioconcentration factors of leaves on F.

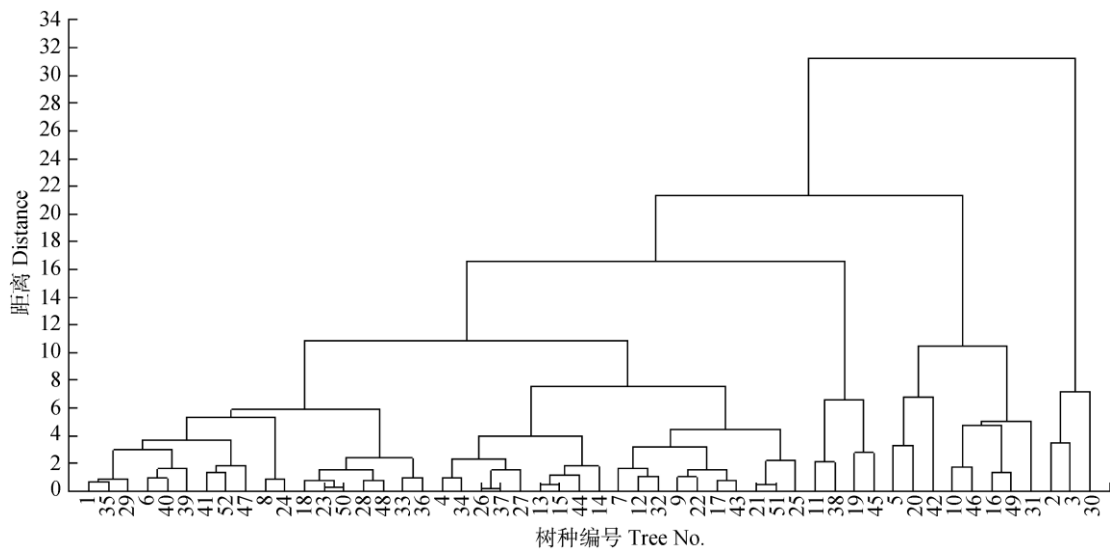


图 3 浙北地区 52 种园林树种叶片吸收硫、氟污染能力的聚类分析

Fig. 3 Clustering analysis based on leaf S and F absorbing ability of 52 landscape trees in northern Zhejiang

地方可以布局杨树、柳树和广玉兰等高大乔木以及火棘、金丝桃和石榴等灌木,形成第一梯度树种,可对硫、氟污染进行较有效的吸收,而将雪松、棕榈、银杏和红枫等布局为第二梯度树种,对硫、氟污染扩散物进行进一步的截留和吸收。

3 结论和讨论

城市化工区污染物的扩散会影响人居生态环境,而运用绿色、高效的生态修复技术不仅可以修复环境损伤^[19],还有助于美化和改善城市环境,但这是一个极其复杂的生态过程。植物对污染物的吸收富集和环境修复功能受到多种因素的影响,包括气候条件、水热条件、地形条件、污染物本身的属性以及植物本身的特性等^[20]。而且植物在不同的生长时期其修复能力有明显差异,处于生长季的植物由于具有旺盛的新陈代谢,物质循环和能量流动会加快,因此可能具有较强的修复功能,因此认识不同植物对污染物的修复特性有利于更好地实现其植物修复功能。

叶片是植物进化过程中对环境变化较敏感的器官,其生理特性最能体现植物对环境的适应或者环境因子对植物的影响,因此城市景观植物叶片的污染物含量可作为环境污染程度的指示物^[21-22]。在本研究中,浙北地区 52 种常见的景观树种对于化工区硫、氟污染不仅有较强的抵抗能力,还有相当程度的吸收富集能力,可以比较有效地修复环境硫、氟污染。各树种叶片硫、氟含量差异明显,这种树种间的差异可能与土壤、降雨、风、树木叶片本身的结构、树木叶片的空间位置以及所吸收元素的性质等多种外部因素以及生理生化特征、基因的差异等内部因素影响有关^[2,23-24],其中树木叶片的结构可能起决定性作用,主要是叶片上气孔的数量、分布、气孔的开闭特征以及形状等因素^[25]影响其吸收特性。在本研究中,除了树种差异外,对叶片硫、氟影响最大的因素可能是降雨和风,降雨会使气体污染物沉降到树木叶片上,而风向和风速则会影响树木叶片对污染物质的吸收效率。叶片硫、氟含量在不同采样点以及不同生活型间的变异也较大。灌木叶片对硫和氟的吸收效率略低于乔木,但高于小乔木,和常绿树种相比,落叶树种叶片硫含量和氟含量均高于常绿树种。这与方颖等^[6]对南京市主要绿化树种滞尘量的研究结果相似,均为落

叶树种的吸附能力强于常绿树种,这可能与落叶树种叶片中物质转运速度快,元素循环周期较短有关,而且采样期处于落叶树种物质积累量最高的时期,因此其叶片含硫和氟量均高于同等条件下的常绿树种。根据各树种叶片对硫、氟的 BCF 大小以及叶片本身的含量高低,将这 52 种园林植物分为 5 大类,筛选出杨树、柳树、火棘、雪松、广玉兰、桂花、红枫和红花继木等对硫、氟污染的综合吸收能力较强的树种,这与黄会一等人^[26]的研究结果有相似之处,这些结果筛选出的树种既具理论依据和环保性,又符合物种多样性原则,是化工区绿化的首选树种,同时可为该地化工区硫、氟污染治理和修复提供借鉴。

城市景观树种在生长过程中受到环境的影响是综合性的,其对污染元素的富集和吸收能力往往受到自然因素还有人为因素等的共同影响^[27],因此在评价筛选优质抗污染树种时也要考虑多种因素。本研究仅对叶片含量这一因素进行了分析,下一步我们将对这些树种叶片污染物质量分数与其它因子,如叶面结构、比叶重等内因以及和季节变化、降雨量、风力等外因的关系进行深入研究。本研究的结果可为浙北地区硫、氟环境污染的植物修复治理提供理论依据,同时利用筛选出的景观树种进行乔、灌、草搭配,在化工区形成高效美观的景观树种布局。

参考文献

- [1] GAO S, CUI H X, FU Q Y, et al. Characteristics and source apportionment of VOCs of high pollution process at chemical industrial area in winter of China [J]. *Environ Sci*, 2016, 37(11): 4094-4102. doi: 10.13227/j.hjlx.201603104.
高松, 崔虎雄, 伏晴艳, 等. 某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2016, 37(11): 4094-4102. doi: 10.13227/j.hjlx.201603104.
- [2] DOCKERY D W. Epidemiologic evidence of cardiovascular effects of particulate air pollution [J]. *Environ Health Persp*, 2001, 109(S4): 483-486.
- [3] ZHANG D Q, CHU G W, YU Q F, et al. Decontamination ability of garden plants to absorb sulfur dioxide and fluoride [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2003, 11(4): 336-340. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2003.4.005.
张德强, 褚国伟, 余清发, 等. 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*, 2003, 11(4): 336-340. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2003.4.005.

- [4] DU Z Y, XING S J, SONG Y M, et al. Study on traffic noise attenuation by green belts along expressway [J]. *Ecol Environ*, 2007, 16(1): 31–35. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2007.01.006.
杜振宇, 邢尚军, 宋玉民, 等. 高速公路绿化带对交通噪声的衰减效果研究 [J]. *生态环境*, 2007, 16(1): 31–35. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2007.01.006.
- [5] WANG A X, ZHANG M, HUANG L B, et al. Accumulation capacity of Nanjing 14 virescence tree species to heavy metal pollutants of the atmosphere [J]. *Bull Bot Res*, 2009, 29(3): 368–374.
王爱霞, 张敏, 黄利斌, 等. 南京市 14 种绿化树种对空气中重金属的累积能力 [J]. *植物研究*, 2009, 29(3): 368–374.
- [6] FANG Y, ZHANG J C, WANG Y H. Dustfall adsorbing capacity of major species of greening trees in Nanjing and its law [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2007, 23(2): 36–40. doi: 10.3969/j.issn.1673-4831.2007.02.008.
方颖, 张金池, 王玉华. 南京市主要绿化树种对大气固体悬浮物净化能力及规律研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(2): 36–40. doi: 10.3969/j.issn.1673-4831.2007.02.008.
- [7] LIU L, GUAN D S, PEART M R. The dust retention capacities of urban vegetation: A case study of Guangzhou, south China [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2013, 20(9): 6601–6610. doi: 10.1007/s11356-013-1648-3.
- [8] KRÖNIGER W, RENNENBERG H, POLLE A. Purification of two superoxide dismutase isozymes and their subcellular localization in needles and roots of Norway spruce (*Picea abies* L.) trees [J]. *Plant Physiol*, 1992, 100(1): 334–340. doi: 10.1104/pp.100.1.334.
- [9] WU X G, LIN Y D. Impact of plant configuration mode of greening segregating belt on air quality of adjacent sidewalk in urban street [J]. *Acta Sci Circumst*, 2015, 35(4): 984–990. doi: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0863.
武小刚, 蔺银鼎. 城市道路隔离带绿化模式对人行道空气质量的影响评价 [J]. *环境科学学报*, 2015, 35(4): 984–990. doi: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0863.
- [10] WANG H X, WANG Y H, YANG J, et al. Multi-scale comparisons of particulate matter and its size fractions deposited on leaf surfaces of major greening tree species [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, 51(7): 9–20. doi: 10.11707/j.1001-7488.20150702.
王会霞, 王彦辉, 杨佳, 等. 不同绿化树种滞留 PM_{2.5} 等颗粒污染物能力的多尺度比较 [J]. *林业科学*, 2015, 51(7): 9–20. doi: 10.11707/j.1001-7488.20150702.
- [11] HUANG Z D, WANG J, LU H, et al. Advances and applications in method for determination of sulfur by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *J Chin Mass Spectrom Soc*, 2013, 34(1): 57–64. doi: 10.7538/zpxb.2013.34.01.0057.
黄志丁, 王军, 逯海, 等. 电感耦合等离子体质谱测定硫的方法研究及应用进展 [J]. *质谱学报*, 2013, 34(1): 57–64. doi: 10.7538/zpxb.2013.34.01.0057.
- [12] ZHANG N, ZHANG L Y. Advance in the study on the detection and safety of fluoride in tea [J]. *J Tea*, 2009, 35(1): 3–6. doi: 10.3969/j.issn.0577-8921.2009.01.002.
张楠, 张凌云. 茶叶中氟的安全性及检测方法研究进展 [J]. *茶叶*, 2009, 35(1): 3–6. doi: 10.3969/j.issn.0577-8921.2009.01.002.
- [13] CHENG S H, CHEN D H, WANG F. Rapid determination of sulfur content in marine sediment by elemental analyzer [J]. *Chem Anal Met*, 2010, 19(3): 32–35. doi: 10.3969/j.issn.1008-6145.2010.03.026.
程思海, 陈道华, 王飞. 元素分析仪法快速测定海洋地质样品中的硫 [J]. *化学分析计量*, 2010, 19(3): 32–35. doi: 10.3969/j.issn.1008-6145.2010.03.026.
- [14] ZHANG W, WEI H, SUN X C, et al. Transfer characteristics of cadmium from soil to *Salix × aureo-pendula* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33(19): 6147–6153. doi: 10.5846/stxb201306091495.
张雯, 魏虹, 孙晓灿, 等. 镉在土壤-金丝垂柳系统中的迁移特征 [J]. *生态学报*, 2013, 33(19): 6147–6153. doi: 10.5846/stxb201306091495.
- [15] ARNOT J A, GOBAS F A P C. A review of bioconcentration factor (BCF) and bioaccumulation factor (BAF) assessments for organic chemicals in aquatic organisms [J]. *Environ Rev*, 2006, 14(4): 257–297. doi: 10.1139/a06-005.
- [16] ALI H, KHAN E, SAJAD M A. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications [J]. *Chemosphere*, 2013, 91(7): 869–881. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.01.075.
- [17] RENUKA N, SOOD A, PRASANNA R, et al. Phycoremediation of wastewaters: A synergistic approach using microalgae for bioremediation and biomass generation [J]. *Int J Environ Sci Technol*, 2015, 12(4): 1443–1460. doi: 10.1007/s13762-014-0700-2.
- [18] CHEN Y B, HUANG J L, XU H Q, et al. The coupling mechanism and industrialization mode of ecological restoration in the weak semi arid mining area of Inner Mongolia [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34(1): 149–153. doi: 10.5846/stxb201311252807.
陈玉碧, 黄锦楼, 徐华清, 等. 内蒙古半干旱生态脆弱矿区生态修复耦合机理与产业模式 [J]. *生态学报*, 2014, 34(1): 149–153. doi: 10.5846/stxb201311252807.
- [19] STANDISH R J, HOBBS R J, MILLER J R. Improving city life: options for ecological restoration in urban landscapes and how these might influence interactions between people and nature [J]. *Landscape Ecol*, 2013, 28(6): 1213–1221. doi: 10.1007/s10980-012-9752-1.
- [20] CHEHREGANI A, NOORI M, YAZDI H L. Phytoremediation of

- heavy-metal-polluted soils: Screening for new accumulator plants in Angouran mine (Iran) and evaluation of removal ability [J]. *Ecotoxicol Environ Safe*, 2009, 72(5): 1349–1353. doi: 10.1016/j.ecoenv.2009.02.012.
- [21] ZENG J R, ZHANG G L, BAO L M, et al. Sulfur speciation and bioaccumulation in camphor tree leaves as atmospheric sulfur indicator analyzed by synchrotron radiation XRF and XANES [J]. *J Environ Sci*, 2013, 25(3): 605–612. doi: 10.1016/S1001-0742(12)60056-4.
- [22] ANAND M, MA K M, OKONSKI A, et al. Characterising biocomplexity and soil microbial dynamics along a smelter-damaged landscape gradient [J]. *Sci Total Environ*, 2003, 311(1/2/3): 247–259. doi: 10.1016/S0048-9697(03)00058-5.
- [23] SONG B, WANG D X, ZHANG Y, et al. Sulfur contents in foliage of 15 ornamental trees in Yan'an [J]. *J NW Agri For Univ (Nat Sci)*, 2014, 42(5): 91–96. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.05.006.
宋彬, 王得祥, 张义, 等. 延安 15 种园林树种叶片硫含量特征分析 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(5): 91–96. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.05.006.
- [24] XIAO H Y, WANG Y L, TANG C G, et al. Indicating atmospheric sulfur by means of S-isotope in leaves of the plane, osmanthus and camphor trees [J]. *Environ Pollut*, 2012, 162: 80–85. doi: 10.1016/j.envpol.2011.11.006.
- [25] LI L, ZENG H, GUO D L. Leaf venation functional traits and their ecological significance [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2013, 37(7): 691–698. doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00072.
李乐, 曾辉, 郭大立. 叶脉网络功能性状及其生态学意义 [J]. *植物生态学报*, 2013, 37(7): 691–698. doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00072.
- [26] HUANG H Y, ZHANG Y B, ZHANG C X, et al. Study on the absorbing and cleaning gaseous pollutants by woody-plants [J]. *Acta Ecol Sin*, 1981, 1(4): 335–344.
黄会一, 张有标, 张春兴, 等. 木本植物对大气气态污染物吸收净化作用的研究 [J]. *生态学报*, 1981, 1(4): 335–344.
- [27] HONG Y, ZHANG D P, HUANG J H. Effect of SO₂ on leave's sulfur content and chlorophyll fluorescence of gardens plants in Shenzhen [J]. *Ecol Sci*, 2006, 25(6): 558–560. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2006.06.018.
洪渊, 张冬鹏, 黄俊华. 硫污染对 9 种园林植物叶片硫含量与叶绿素荧光参数的影响 [J]. *生态科学*, 2006, 25(6): 558–560. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2006.06.018.