

4 种城市绿化树种叶片 PAHs 含量特征 与叶面结构的关系

彭 钢¹, 田大伦^{1,2,*}, 闫文德^{1,2}, 朱 凡^{1,2}, 梁小翠^{1,2}

(1. 中南林业科技大学, 长沙 410004; 2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004)

摘要: 用气质联用仪测定了长沙市樟树(*Cinnamomu camphora*)、广玉兰(*Magnolia grandiflora*)、桂花(*Opsmanthus fragrans*)和红檵木(*Redrlowered loropetalum*) 4 个主要绿化树种叶片中 PAHs 含量, 同时测定了叶片的气孔密度、气孔长宽比、叶片的宽长比和叶面积等叶面结构特征值, 探讨了叶面结构与叶片中 PAHs 含量的关系。结果表明: 红檵木叶片的 PAHs 含量最高, 为 11.13 mg·kg⁻¹, 16 种 PAHs 在 4 种树种叶片中均有不同程度的检出, 其中以 3 环和 4 环为主, 菲的浓度最高。除桂花外, 在气温较低的秋冬季节, 其余 3 种植物叶片气孔密度大 PAHs 含量高。叶面宽长比、气孔长宽比均与叶片 PAHs 含量呈极显著正相关, 而叶面积与 PAHs 含量呈极显著负相关。表明叶面结构是影响叶片 PAHs 含量的重要因素。研究结果可为城市绿化树种合理选择与配置提供科学依据。

关键词: 多环芳烃; 气孔密度; 气孔长宽比; 叶片宽长比; 叶面积

Relationship between Polycyclic Aromatic Hydrocarbons accumulation and surface structure of leaves in four urban street tree species

PENG Gang¹, TIAN Dalun^{1,2,*}, YAN Wende^{1,2}, ZHU Fan^{1,2}, LIANG Xiaocui^{1,2}

1 Ecology Research Laboratory, College of Life Sciences and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 State Engineering Laboratory for Applied Forestry and Ecology Technology in Southern China, Changsha 410004, China

Abstract: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) are a large group of chemicals that mainly produced by incomplete combustion of coal, gasoline, wood, garbage or other organic materials. PAHs consist of a number of toxic compounds which have great harmful effects on plants, animals and human health. It has been commonly recognized that trees have great potential for the scavenging, storage and purification of relatively large amounts of PAHs. Accumulation of PAHs in vegetation depends on the properties of the particular PAHs as well as on the properties of the accumulating surface. However, while most research focused on accumulation capacity of trees on PAHs, less know the relationship between PHAs concentration and leaf surface structure. In order to examine the relationship between accumulation of PAHs and leaves' structure of major tree species in southern China, the composition and accumulation of PAHs in leaves of four major urban street tree species (*Cinnamomu camphora*, *Magnolia grandiflora*, *Opsmanthus fragrans* and *Redrlowered loropetalum*) were investigated in Changsha city, Hunan province, China. Structural features of the leaves, including leaf stomatal density, stomatal length; width ratio, leaf width; length ratio, and leaf area, were also measured. The objectives of the research were to (1) determine the composition and concentration of PAHs in leaves of the selected four tree species, (2) examine the relationship between PAHs concentration and surface structures of leaves of the four urban street tree species, and (3) compare the accumulation capacity of PAHs among the four tree species. The results showed that all 16 priority PAHs were detected in the leaves of the four tree species, but the three-ring and four-ring PAHs dominated, in particular for Phe. The highest total concentration of PAHs (11.13 mg·kg⁻¹) was found in the leaves of *Redrlowered loropetalum* while the lowest

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30771700, 30870455, 30571487); 湖南省重点实验室资助项目(06FJ3083, 2007FJ4046)

收稿日期: 2009-12-04; **修订日期:** 2010-03-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: csuftdl@126.com

($3.66\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) in the leaves of *Opsmanthus fragrans*. Total PAHs concentrations were $7.58\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $4.34\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in the leaves of *Cinnamomu camphora* and *Magnolia grandiflora*, respectively. Except the tree species of *Opsmanthus fragrans*, a closely relationship between leaf stomatal density and accumulation of PAHs was found in other three tree species' leaves. Because of low temperatures in fall and winter seasons, higher leaf stomatal density resulted in higher accumulation of PAHs in leaves. There were significant positive correlations between leaf stomatal length:width ratio, leaf width:length ratio and PAHs concentration in leaves of all test tree species. But a negative correlation was found between leaf area and PAHs concentrations in leaves. Our results indicated that structural characteristics of leaves of urban tree species were important factors in affecting the accumulation of PAHs in study area.

Key Words: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs); stomatal density; stomatal length:width ratio; leaf width:length ratio; leaf area; urban street tree species

多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon,简称 PAHs)是一类生物累积性强、持久性长、亲脂性的芳香族有机污染物^[1-2],大部分 PAHs 具有致癌、致畸、致突变的三致效应^[3-8]。随着我国经济的持续快速发展,工业化和城市化不断加快,城市人口迅速增加,尤其是汽车数量更是成倍的增多,环境中燃料化合物的不完全燃烧和工业交通的排放所产生的 PAHs 对人类的健康具有潜在的威胁。

植物是污染物的主要受体,它可通过多种方式对污染物进行净化,尤其是植物叶片,它是植物体暴露在环境中最大的器官,对环境因子的变化非常敏感,被认为是一种有潜力的自然环境净化器,有关植物叶片对 PAHs 的净化作用已经引起了国内外科学家的广泛关注,并报道了较多的研究成果。如 Agraw 等^[9]和 Fleek 等^[10]发现植物叶面对挥发性或者半挥发性有机物的吸收,是植物积累这些污染物的最重要途径;王晓丽等^[11]研究表明,广州白云山的阔叶植物叶片 PAHs 种类和浓度可以反映出大气中 PAHs 的状况;Daisuke 等^[12]研究了植物叶片中 PAHs 含量的季节变化特征,表明在温度较低的秋冬季节,PAHs 由大气向植物叶片迁移,而在温度较高的夏季,部分 PAHs 又通过叶片挥发返回到大气中;Simonich 等^[13-14]研究表明,在同一地点采集的植物茎叶和种子中,PAHs 含量为针叶>阔叶>种子,且与脂肪含量正相关;刘玉等^[15]对植物叶片吸收汽车尾气多环芳烃的研究结果,反映了植物种间吸收的差异;王雅琴等^[16]、田晓雪等^[17]还研究了植物叶片中 PAHs 含量与叶蜡、叶脂及叶面积、比叶面积的关系,发现叶蜡中 PAHs 比叶片中高 1—2 个数量级,叶片 PAHs 含量与叶脂含量呈正相关。与比叶面积表现出一定的负相关,与叶面积没有明显的相关关系。这些研究成果表明,植物叶片能吸附大气中的 PAHs,消减大气中 PAHs 和净化环境污染,具有重要的意义。

本文针对长沙市主要的绿化树种樟树(*Cinnamomum camphora*)、桂花(*Opsmanthus fragrans*)、广玉兰(*Magnolia grandiflora*)和红榿木(*Redrlowered loropetalum*),研究了其叶片中 16 种 PAHs 含量(美国环保局优先控制的污染物)和叶片表面结构(气孔密度、气孔 L/W、叶面积、叶片 W/L)的关系,并对 4 种城市绿化树种叶片 PAHs 含量差异进行了比较,不仅对深入探讨大气中 PAHs 的传输途径,不同植物吸附 PAHs 的种间差异,以及大气环境质量预报提供科学参考数据,而且可为城市绿化抗污树种的合理选择和配置提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验区概况

试验区设在湖南省长沙市中南林业科技大学校园内($112^{\circ}48'E$, $28^{\circ}03'N$),属典型的亚热带湿润季风气候,年均气温 16.8°C ,极端最高气温 40.6°C ,最低气温 -12°C ,年均降雨量 1400mm ;无霜期为 270—300d,年均日照时数 1677.1h 。海拔 44.9m ,土壤以板页岩(夹有红土、砂砾岩)风化物发育的红壤为主,地带性植被为亚热带常绿阔叶林。

1.2 样品采集

在试验区内随机设置了 3 块固定样地(667m^2 ,间隔 100m)距离校园主干道 10—20m,距离城市主干道 300m ,在每个样地内分别采集樟树、桂花、广玉兰和红榿木 4 种树木的叶片,每棵植物按树冠的东、南、西、北

方向各采集 10 片,共计 40 片,每种树木重复 3 次,在 10 月 24 日分白天、夜间重复采样 4 次,采集下来的叶片不经洗脱使之保存最初状态,敞口于塑胶袋中风干至恒重,作为测定 PAHs 用样。另在每棵植物上取叶 10 片封装于保鲜袋中 4℃ 保存,用于测定叶面积、叶片宽长比、气孔密度和气孔长宽比等参数。

1.3 PAHs 的提取与测定

将风干后的叶片粉碎过筛后,取 1g 置于 10mL 玻璃离心管中,分别加入 4mL 丙酮和 4mL 二氯甲烷,于 40℃ 超声提取 1h。然后离心 15min(转速为 2000 转)。取上层清液经硅胶柱萃取,用 29mL 正己烷洗脱,再加入 25mL 正己烷和二氯甲烷的混合液(3:2)淋洗后收集洗脱液,经旋转蒸发后用 5mL 二氯甲烷转移至氮吹管中吹至 1mL,密封于样品瓶中待 GC-MS 分析。用 Agilent 6890GC/5973MS 气质联用仪测定 PAHs 含量。升温顺序为:

60℃ $\xrightarrow{15^{\circ}\text{C}/\text{min}}$ 100℃ (5min) $\xrightarrow{8^{\circ}\text{C}/\text{min}}$ 210℃ (3min) $\xrightarrow{2^{\circ}\text{C}/\text{min}}$ 290℃ (5min) 色谱柱为 HP5 毛细管色谱柱 30m $\times$ 0.25mm。不分流进样,气化温度 280℃,载气为高纯 He。PAHs 标样 16 种组分的回收率为 71.2%—94.5%。

1.4 叶面积和叶片 W/L 的测定

用叶面积仪(CanoScan LiDE90)扫描,每株植物重复 7 次。

1.5 气孔长/宽度、气孔密度的测量

将叶片先用 10% 铬酸、10% 硝酸(1:1 铬酸和硝酸)浸泡 48h 后,分离下表皮测定指标值。利用光学显微镜进行显微摄影,Digimizer 测量软件进行计数测量。在显微摄影图中截取适当面积观察并计数叶表面的气孔个数,除以截取面积取平均值,得到每种树木叶片的气孔密度,重复 3 次。再用显微摄影图进行气孔长宽度测定,气孔长度为气孔纵面最长距离,气孔宽度为气孔横面最长距离,重复 3 次。

1.6 数据处理

用 SPSS13.0(SPSS Inc., USA)统计软件进行数据处理。数据统计采用单因子方差分析对不同植物叶片中 PAHs 含量进行比较,多元回归分析检验 4 种植物叶面结构特征值与 PAHs 含量间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 4 种城市绿化树种叶片 PAHs 总含量

从表 1 可以看出,4 种绿化树种叶片中的 PAHs 总含量分别为 11.13、7.58、4.34、3.66mg·kg⁻¹,且樟树叶片的 PAHs 总含量显著高于桂花和广玉兰($P < 0.05$),而红继木叶片中 PAHs 总含量又显著高于樟树 1.5 倍、高于桂花 3 倍、高于广玉兰 2.6 倍($P < 0.05$)。这主要是因为红继木为灌木,植株比较矮小,成簇状生长,叶片生长较密集,所以其吸附和滞尘的作用较樟树、桂花和广玉兰大。

表 1 不同树种叶片的 PAHs 总量(mg·kg⁻¹)

Table 1 Concentration of total PAHs in the leaves of the four tree species

树种 Species	总含量 Total contents	最大值 Max	最小值 Min	变异系数 CV/%
樟树 <i>C. camphora</i>	7.576(2.299) a	10.785	4.346	30.34
桂花 <i>O. fragrans</i>	3.658(1.148) b	5.689	2.509	31.39
广玉兰 <i>M. grandiflora</i>	4.335(0.871) b	6.217	3.229	20.09
红继木 <i>R. loropetalum</i>	11.129(6.019) c	15.506	2.913	44.30

表中括号内数据为标准差 同列相同字母表示无显著差异($P > 0.05$),不同字母表示差异显著($P < 0.05$)

2.2 不同环数 PAHs 在 4 树种叶片 PAHs 总量中所占的比例

在 16 种 PAHs 化合物中,有 2 环化合物萘(Nap);3 环化合物包括二氢萘(Ace)、萘(AcP)、芴(Fl)、菲(Phe)、蒽(An);4 环化合物包括荧蒽(Flu)、芘(Pyr)、苯并(a)蒽(BaA)、屈(Chr);5 环化合物包括苯并(b)荧蒽(BbF)、苯并(k)荧蒽(BkF)、苯并(a)芘(BaP)、二苯并(a,h)蒽(DbA);6 环化合物包括茚并(1,2,3-cd)芘(Inp);苯并(g,h,i)芘(Bghip)。不同环数的 PAHs 在 4 种绿化树种叶片总含量中所占的比例是不同的。如

表 2 所示,2、3、4、5、6 环化合物在樟树、桂花、广玉兰、红榿木叶片总含量中分别占 8.34%—19.45%、40.96%—54.93%、31.49%—43.88%、2.68%—7.47%、0.65—3.5%。可以看出,4 种树种叶片 PAHs 总量中均以 3、4 环 PAHs 为主,占总量的 70% 以上,而 5—6 环的 PAHs 却占总量的 10% 以内,6 环的 PAHs 仅占总量的 4% 以下,由于化合物蒸汽压的不同,各环化合物表现出不同的理化性质,通常 4 环以下的 PAHs 以气态形态存在,而 5—6 环的 PAHs 则以颗粒态形态存在^[18],叶片表面结构中气孔作为植物叶片和外界进行气体交换的重要器官,对气态 PAHs 的吸收起着重要作用。因此,气态 PAHs 更容易被叶片中吸附。

表 2 不同植物叶片 PAHs 中各环所占的比例/%
Table 2 Ratio of Different ring PAHs in four street tree species

树种 Species	2 环比例 Two rings	3 环比例 Three rings	4 环比例 Four rings	5 环比例 Five rings	6 环百分比 Six rings
樟树 <i>C. camphora</i>	10.40	42.88	36.92	7.47	2.34
桂花 <i>O. fragrans</i>	19.45	40.96	32.37	3.72	3.50
广玉兰 <i>M. grandiflora</i>	9.33	54.93	31.49	3.62	0.65
红榿木 <i>R. loropetalum</i>	8.34	44.26	43.88	2.68	0.83

2.3 4 种城市绿化树种叶片中 16 种 PAHs 含量特征

从表 3 可以看出,在各树种叶片 16 种 PAHs 含量中,Nap 表现为广玉兰显著低于樟树、桂花和红榿木($P<0.05$);Acp、BaA、Bap、BkF、DbA 为樟树显著高于桂花、广玉兰和红榿木($P<0.05$);Ace 为樟树和红榿木显著高于广玉兰($P<0.05$);Fl 为樟树显著高于桂花和广玉兰,而红榿木又显著高于桂花($P<0.05$);Phe、An、Pyr 为红榿木显著高于樟树、桂花和广玉兰,而樟树又显著高于桂花($P<0.05$);Flu 为红榿木显著高于樟树桂花和广玉兰,而樟树又显著高于桂花和广玉兰($P<0.05$);Chr 为樟树显著高于桂花、广玉兰和红榿木,而红榿木又显著高于桂花和广玉兰($P<0.05$);BbF 为红榿木显著高于桂花和广玉兰($P<0.05$);Bghip 为樟树显著高于广玉兰和红榿木,而桂花又显著高于广玉兰($P<0.05$);Inp 在 4 种树种叶片中的含量间均无显著差异($P>0.05$)。表明不同树种叶片对于不同 PAHs 的含量存在着差异。由此可见,植物叶片吸附 PAHs 的能力,存在着种间差异。除特殊植物外,总的趋势为吸附低环 PAHs 的量大于高环 PAHs 的量。

表 3 4 种城市绿化树种叶片中各 PAHs 组分浓度/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 3 PAHs of various concentrations in leaves of four urban greening tree species

PAHs 组分	樟树 <i>C. camphora</i>	桂花 <i>O. fragrans</i>	广玉兰 <i>M. grandiflora</i>	红榿木 <i>R. loropetalum</i>
萘 Nap	0.788 (0.073) a	0.712 (0.083) a	0.404 (0.031) b	0.928 (0.153) a
芴 Acp	0.290 (0.089) a	0.069 (0.007) b	0.058 (0.003) b	0.141 (0.038) b
二氢芴 Ace	0.075 (0.009) a	0.050 (0.011) ab	0.033 (0.003) b	0.063 (0.012) a
芴 Fl	0.799 (0.077) a	0.342 (0.031) b	0.572 (0.041) c	0.693 (0.093) ac
菲 Phe	1.980 (0.155) a	0.982 (0.090) b	1.636 (0.093) ab	3.859 (0.606) c
蒽 An	0.105 (0.010) a	0.055 (0.005) b	0.082 (0.005) ab	0.171 (0.027) c
荧蒽 Flu	1.078 (0.128) a	0.520 (0.047) b	0.589 (0.034) b	1.937 (0.228) c
芘 Pyr	0.963 (0.134) a	0.343 (0.031) b	0.444 (0.036) ab	2.407 (0.396) c
苯并(a)蒽 BaA	0.038 (0.005) a	0.021 (0.003) b	0.024 (0.003) b	0.025 (0.004) b
屈 Chr	0.717 (0.079) a	0.300 (0.037) b	0.308 (0.035) bc	0.514 (0.054) d
苯并(a)芘 BaP	0.138 (0.025) a	0.018 (0.005) b	0.047 (0.011) b	0.052 (0.005) b
苯并(k)荧蒽 BkF	0.159 (0.034) a	0.036 (0.011) b	0.062 (0.024) b	0.045 (0.014) b
苯并(b)荧蒽 BbF	0.050 (0.022) ab	0.013 (0.006) a	0.003 (0.002) a	0.100 (0.060) b
二苯并(a,h)蒽 DbA	0.217 (0.053) a	0.068 (0.023) b	0.044 (0.029) b	0.102 (0.041) b
苯并(g,h,i)芘 Bghip	0.150 (0.027) a	0.109 (0.033) ac	0.018 (0.007) b	0.067 (0.015) bc
茚并(1,2,3-cd)芘 Inp	0.028 (0.007) a	0.019 (0.005) a	0.010 (0.003) a	0.026 (0.009) a

表中括号内数据为标准误 同行相同字母表示无显著差异($P>0.05$),不同字母表示差异显著($P<0.05$)

2.4 叶片 PAHs 含量与叶面结构的关系

图 1A 所示,除桂花外,其余 3 种树种叶片的气孔密度与 PAHs 含量呈极显著指数正相关($P < 0.01$),说明气孔密度越大,气体交换能力越好,吸附 PAHs 能力越强。这与王雅琴等^[16]研究认为夏季气孔多的叶片 PAHs 向外迁移的速率快于气孔少的叶片,从而造成气孔密度与叶片中的 PAHs 呈负相关关系结果正好相反。因为本研究在秋冬季节进行,吸附 PAHs 的速率大于向外迁移的速率,表明叶片气孔密度对 PAHs 的吸附能力与季节变化密切相关。但桂花树的叶片气孔密度大,其含量反而少,反映桂花叶片对环境 PAHs 的吸附不敏感,其原因尚待进一步研究。

气孔长度和宽度的比值可以用来表征气孔形状特征的基本状况。4 种树种叶片气孔 L/W 和叶片 PAHs 含量呈极显著正相关关系($P < 0.01$) (图 1B),表现出叶片气孔 L/W 比值越大,PAHs 含量越高。相关回归方程为 $y = 16.343x - 10.164$ 。PAHs 含量和气孔 L/W 值相关表明合适的气孔长宽比有利于气孔在气体交换中对 PAHs 的吸附。

4 种绿化树种的叶面积与叶片中 PAHs 含量间呈极显著对数负相关关系($P < 0.01$) (图 1C),随着叶面积增大,PAHs 含量有减少的趋势,叶面积增大到一定水平,趋势表现要较缓慢。可能是由于叶面积小更容易受到大气流动的影响,因此 PAHs 含量相对较多。这与田晓雪等^[17]通过研究珠江三角洲地区主要树种叶片多环芳烃含量特征表明 PAHs 总量与比叶面积有一定的线性负相关关系的结论基本一致。而与董瑞斌等^[19]研究表明大叶植物比小叶植物含更多的 PAHs 的研究结果正好相反。

叶面积和叶片表面 W/L 是表征叶片表面形态特征的重要因子。图 1D 表明 4 种城市绿化树种叶片 PAHs 含量与叶片表面 W/L 间存在着极显著的正相关关系($P < 0.01$),相关回归方程为 $y = 26.632x - 6.3694$ 。表明叶片宽长比越明显,吸附 PAHs 能力越强,可能是因为形态粗短的叶片相比细长的叶片特征会更加有利于对 PAHs 的吸附。

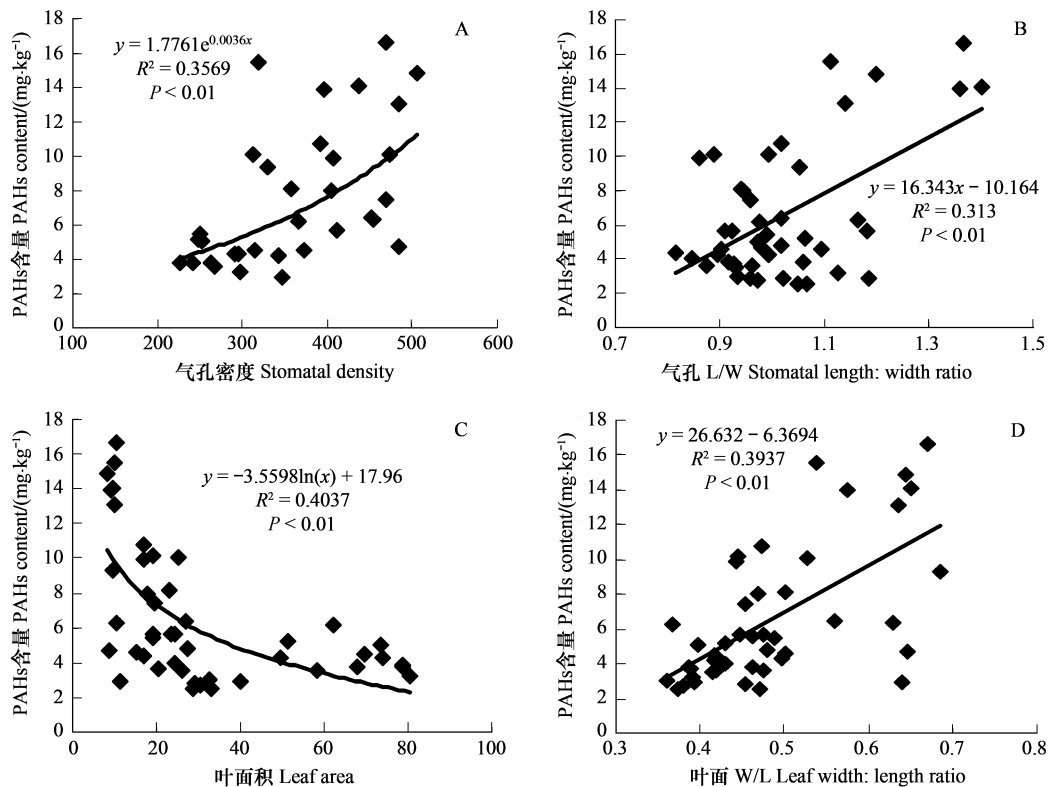


图 1 4 种绿化树种叶面结构与 PAHs 含量间的相关关系

Fig. 1 Relationship between leaf surface structure and PAHs concentration in four urban street tree species

3 结论与讨论

4 种绿化树种(樟树、桂花、广玉兰、红榿木)叶片中 PAHs 总含量为 3.66—11.13 mg kg⁻¹。这明显高于董瑞斌等^[19]认为植物中 PAHs 浓度范围(20—1000 ng·g⁻¹),而接近王雅琴等^[16]测定北京大学校园及其周围交通干线路侧 6 种植物叶片叶蜡中 PAHs 含量(6.57×10^4 ng·g⁻¹)和提过叶蜡叶片中 PAHs 含量(9.01×10^2 ng·g⁻¹)。叶片 PAHs 含量较高的主要原因是研究区距长沙市的城市交通主干道仅 300m,距校园主干道仅 10m,车流量大,尾气污染严重^[15,20],表明大气中 PAHs 含量较高。

不同环数的 PAHs 在 4 种绿化树种叶片总含量中虽然所占比例不同,但均以 3、4 环 PAHs 为主,可占总的 70% 以上,而 5—6 环 PAHs 却占总量的 10% 以内,6 环的 PAHs 仅占 4% 以下。毕新慧等^[18]对 PAHs 在大气中的相分布研究表明,通常 4 环以下的 PAHs 以气态形式存在,而 5—6 环 PAHs 则颗粒态形式存在;Smith 等^[21]指出,叶面气孔途径对于以气态形式存在的有机污染物较为重要;Franzaring 等^[22]说明了叶片气孔及其气体交换作用,为气态和部分颗粒态 PAHs 进入叶片内提供了通道和方式。4 种绿化树种叶片中均以气态 3、4 环 PAHs 为主,这与毕新慧等^[18]、Smith 等^[21]和 Franzaring 等^[22]报道是相符的。并且和刘国卿等^[23]研究珠江三角洲地区马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)的松针,主要吸附大气中气态 PAHs,其中苈、菲、荧蒹和屈的含量占主导,单个化合物中,菲的含量最高的结论是基本相似的。

4 种绿化树种叶片,对于不同 PAHs 的含量存在差异。即不同树种的叶片中各 PAHs 组分的含量不同,就是同一树种叶片中因 PAHs 组分不同而含量不同。表明植物叶片吸附 PAHs 的能力,存在着种间差异。但总的趋势为吸附低环 PAHs 量大于高环 PAHs 量。这与 Tao 等^[24]从事阔叶对 PAHs 的吸收研究发现气孔路径对于干燥气体的沉积占主导地位,PAHs 通过气孔而大量进入叶片内部,造成了叶片中低环 PAHs 高吸附量的结论是一致的。

樟树、广玉兰、红榿木叶片气孔密度与 PAHs 含量间呈极显著指数正相关($P < 0.001$),气孔密度越大,吸附 PAHs 能力越强。这与王雅琴等^[16]研究认为夏季气孔多的叶片,PAHs 向外迁移的速率快于气孔少的叶片,从而造成气孔密度与叶片 PAHs 含量呈负相关的结果相反,这是由于采样的季节不同所致。但桂花叶片气孔密度大,反而吸附少,其原因尚有待进一步研究。

4 种树叶片气孔 L/W 和叶片 PAHs 含量间呈极显著正相关($P < 0.001$)。表明合适的气孔长宽比有利于气孔在气体交换中对 PAHs 的吸附。而叶面积与叶片中 PAHs 含量间呈极显著负相关,表明随着叶面积增大,PAHs 含量有减少趋势,这与田晓雪等^[17]研究树种叶片 PAHs 含量与比叶面积有一定的线性负相关结论基本一致。而与董瑞斌等^[19]研究的大叶植物比小叶植物含有更多的 PAHs 的结果正好相反;4 种绿化树种叶片 PAHs 含量与叶表面 W/L 间存在着极显著正相关($P < 0.001$),叶片长宽比越明显,吸附 PAHs 能力越强。

References:

- [1] Menzie C A, Potocki B B, Santodonato J. Exposure to carcinogenic PAHs in the environment. *Environmental Science Technology*, 1992, 26(7): 1278-1284.
- [2] McLachlan M S. Bioaccumulation of hydrophobic chemicals in agricultural food chains. *Environmental Science Technology*, 1996, 30(1): 252-259.
- [3] Sims R C, Overcash M R. Fate of polycyclic aromatic compounds (PNAs) in soil-plant system. *Residue Reviews*, 1983, 88: 1-68.
- [4] Yan W D, Tian D L, Kang W X, Xiang W H, Pan Y J. Transfer and transformation of PAHs in the hydrological process of camphor forest ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1882-1888.
- [5] Harald G Z, Stefan D, Daniela H, Alarich R, Andrea H, Sigrid S. Pilot study on road traffic emissions (PAHs, Heavy Metals) measured by using mosses in a tunnel experiment in Vienna, Austria. *Road Traffic Emissions*, 2006, 13(6): 398-405.
- [6] Srogi K. Monitoring of environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2007, 5: 169-195.
- [7] Barakat A O. PAHs and petroleum markers in the atmospheric environment of alexandria city, Egypt. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 139: 289-310.
- [8] Zhu F, Tian D L, Yan W D, Wang G J, Liang X C, Zheng W. The response of soil enzyme activity to PAHs contamination for four urban

- afforestation species. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (9):4195-4202.
- [9] Agrawal M, Singh J. Impact of coal power plant emission on the foliar elemental conc in Plants in a low rainfall tropical region. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, 60:261-282.
- [10] Fleek J A, Grigal D F, Nater E A. Mercury uptake by trees: an observational experiment. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1999, 115: 513-523.
- [11] Wang X L, Peng P A, Zhou G Y. Polycyclic aromatic hydrocarbons in leaves of broadleaved plants from Baiyun Mountain, Guangzhou. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6):1597-1601
- [12] Daisuke N, Yukiko Y, Junzo S, Shizuo S. Seasonal changes in the concentration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Azalea leave and relationship to atmospheric concentration. *Chemosphere*, 1995, 30(3):409-418.
- [13] Simonich, S L, Hites R A. Vegetation-atmosphere partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Science and Technology*, 1994, 28: 939-943.
- [14] Simonich S L, Hites R A. Organic pollutant accumulation in vegetation. *Environmental Science and Technology*, 1995, 29: 2905-2914.
- [15] Liu Y, Zhou L L. Research on absorption of PAHs of vehicle discharges by plant leaves. *Proceedings of China POPs Forum 2008 & 3rd National Symposium on POPs*. Beijing China, 2008, 92-93.
- [16] Wang Y Q, Zuo Q, Jiao X C, Wu S P, Tao S. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in plant leaves from Peking university campus and nearby in summer season. *Environmental Science*, 2004, 25 (4):23-27.
- [17] Tian X X, Zhou G Y, Peng P A. Concentrations and influence factors of polycyclic aromatic hydrocarbons in leaves of dominant species in the Pearl River Delta, South China. *Environmental Science*, 2008, 29 (4):849-854.
- [18] Bin X H, Sheng G Y, Tan J H, Tang X L, Fu J M. Phase partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the atmosphere. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24 (1):101-106.
- [19] Dong R B, Xu D F, Liu L, He Z J, Qi M F, Zeng H Q. The behavior of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the environment. *Environment and Exploitation*, 1999, 14 (4):10-12.
- [20] Zhu L Z, Wang J, Du Y, Xu Q Q. Research on PAHs fingerprints of vehicle discharges. *Environmental Science*, 2003, 24 (3):26-29.
- [21] Smith, K E C, Jones K C. Particles and vegetation: implications for the transfer of particle-bound organic contaminants to vegetation. *Science and Total Environment*, 2000, 246:207-236.
- [22] Franzaring J, Vander Eerder. L J M. Accumulation of airborne persistent organic pollutants(POPs) in plants. *Basic and Applied Ecology*, 2000, 1 (1):25-30.
- [23] Liu G Q, Zhang G, Liu X, Li Jun, Guo L L. Gaseous PAHs distribution in pine needles and SPMDs. *Environmental Chemistry*, 2005, 24 (1): 81-85.
- [24] Tao Z Y, Hornbuckle K C. Uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by broad leaves: analysis of kinetic limitations. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*. 2001, 1(5/6): 275-283.

参考文献:

- [4] 闫文德, 田大伦, 康文星, 项文化, 潘勇军. 樟树林生态系统水文学过程中多环芳烃的迁移与转化机理. *生态学报*, 2006, 26 (6): 1882-1888.
- [8] 朱凡, 田大伦, 闫文德, 王光军, 梁小翠, 郑威. 四种绿化树种土壤酶活性对不同浓度多环芳烃的响应. *生态学报*, 2008, 28(9): 4195-4202.
- [11] 王晓丽, 彭平安, 周国逸. 广州白云山风景区阔叶植物叶片中的多环芳. *生态环境*, 2007, 16(6): 1597-1601.
- [15] 刘玉, 周璐璐. 植物叶片吸收汽车尾气多环芳烃的研究. *持久性有机污染物论坛 2008 暨第三届持久性有机污染物全国学术研讨会论文集*, 中国北京, 2008: 92-93.
- [16] 王雅琴, 左谦, 焦杏春, 吴水平, 陶澍. 北京大学及周边地区非取暖期植物叶片中的多环芳烃. *环境科学*, 2004, 25(4): 23-27.
- [17] 田晓雪, 周国逸, 彭平安. 珠江三角洲地区主要树种叶片多环芳烃含量特征及影响因素分析. *环境科学*, 2008, 29(4): 849-854.
- [18] 毕新慧, 盛国英, 谭吉华, 唐小玲, 傅家谟. 多环芳烃在大气中的相分布. *环境科学学报*, 2004, 24 (1): 101-06.
- [19] 董瑞斌, 许东风, 刘雷, 何宗健, 齐美富, 曾慧卿. 多环芳烃在环境中的行为. *环境与开发*, 1999, 14(4): 10-12.
- [20] 朱利中, 王静, 杜烨, 许青青. 汽车尾气中多环芳烃(PAHs)成分谱图研究. *环境科学*, 2003, 24 (3): 26-29.
- [23] 刘国卿, 张干, 刘向, 李军, 郭玲利. 大气中多环芳烃(PAHs)在松针和 SPMD 上的分布. *环境化学*, 2005, 24 (1): 81-85.