

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

田晓雪¹, 周国逸^{1*}, 彭平安²

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘要:应用气相色谱-质谱联用方法测定了珠江三角洲地区 6 种主要树种叶片多环芳烃(PAHs)的含量, 并对相应的叶脂含量、叶面积、比叶面积进行了测定, 探讨了叶片 PAHs 含量特征和种间差异的影响因素. 结果显示, 松针 PAHs 含量显著高于阔叶, 马尾松松针含量最高($1\,034.7\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 荷木含量最低($199.7\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$). 在所有样品中, 芴、菲、荧蒹、芘、蒽为主要的 PAHs 组分, 3、4 环 PAHs 含量占 $\sum$ PAHs 的 80% 以上, 各环化合物与 $\sum$ PAHs 在不同显著性水平上呈显著正相关关系. 按脂含量计算 PAHs 含量能大大缩小种间含量的差异, 高、低值相差约 2 倍(分别为 $6.8\text{ ng}\cdot\text{mg}^{-1}$ 和 $2.7\text{ ng}\cdot\text{mg}^{-1}$); 按单位叶面积计算的 PAHs 含量进一步扩大了种间差异, 最高值($15.3\text{ ng}\cdot\text{cm}^{-2}$)约最低值($1.9\text{ ng}\cdot\text{cm}^{-2}$)的 8 倍. 进一步分析表明, $\sum$ PAHs、3 环 PAHs、4 环 PAHs 与脂含量呈良好线性正相关关系、与比叶面积表现出一定的线性负相关关系, 显示两者是影响叶片 PAHs 含量种间差异的重要因素.

关键词:珠江三角洲; 植物; 多环芳烃; 脂含量; 比叶面积

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)04-0849-06

Concentrations and Influence Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Leaves of Dominant Species in the Pearl River Delta, South China

TIAN Xiao-xue¹, ZHOU Guo-yi¹, PENG Ping-an²

(1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Concentrations of PAHs in leaves of six dominant species in the Pearl River Delta of South China were determined with gas chromatography and mass spectrometry (GC-MS), and synchronously leaf-lipid contents, leaf areas, specific leaf areas (SLA) were measured. The characters of PAHs abundance and influence factors on them were investigated. The results show that concentrations of PAHs in pine needles are higher than those in broad-leaves remarkably, and the highest value ($1\,034.7\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ in *Pinus massoniana*) is fivefold of the lowest ($199.7\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ in *Schima superba*). Flu, Phe, Fluo, Pyr, Chr are the main components of $\sum$ PAHs, and the concentrations of 3-ring and 4-ring PAHs exceed 80% of the total PAHs. Significant positive correlations between the components and $\sum$ PAHs were also detected. The PAHs contents by per lipid could reduce inter-species variance obviously, and the diversity is no more than two times ($6.8\text{ ng}\cdot\text{mg}^{-1}$ and $2.7\text{ ng}\cdot\text{mg}^{-1}$, respectively). Adversely, the PAHs contents by per cm^2 magnify inter-species variance, and the highest value ($15.3\text{ ng}\cdot\text{cm}^{-2}$) ascends to eight times of the lowest ($1.9\text{ ng}\cdot\text{cm}^{-2}$). Furthermore, significant positive correlation between PAHs and leaf-lipid contents was identified, as well as negative correlation between PAHs and specific leaf areas. All of these indicate that leaf-lipid contents and specific leaf areas are two significant factors which influenced PAHs contents in leaves.

Key words: the Pearl River Delta (PRD); vegetation; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); lipid content; specific leaf area

多环芳烃(PAHs)是一类生物累积性强的持久性有机污染物, 部分化合物具有致癌和致畸效应^[1,2]. 环境中的 PAHs 主要来源于石油、煤等化石燃料以及木材等含碳氢化合物的物质的不完全燃烧或在还原条件下的热解反应. 植物体由于可以富集大气中的 PAHs, 近年来常被用作大气监测的被动采样器^[3,4]. 许多学者在植物体(如地衣、苔藓和松针等)对 PAHs 的富集机理方面做了大量工作^[5~11], 但是我国在此方面的研究相对较少^[12,13]. 随着工业的发展和交通排放的增加, 近年来珠江三角洲地区有

机污染日趋受到关注, PAHs 也在其中, 但是研究载体多为大气、水、土壤或沉积物^[14~19], 对植被中 PAHs 的探讨极少, 且仅限于将植物作为大气污染的监测载体^[20], 对叶片中的含量特征未有探讨.

本研究通过对珠江三角洲地区 6 种主要树种叶片 PAHs 含量和相应的叶脂含量、叶面积、比叶面积

收稿日期: 2007-05-16; 修订日期: 2007-08-09

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412501); 国家自然科学基金项目(304070306)

作者简介: 田晓雪(1978~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境生态学, E-mail: xxtian@scib.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: gyzhou@scib.ac.cn

等的测定,分析了森林叶片 PAHs 的含量特征,并对影响种间差异的因素做出探讨.以期为确立可靠的植物大气监测器提供理论依据,为探讨森林对消减大气 PAHs 的贡献提供数据支持,为寻求对 PAHs 累积性较强的植物提供方法参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取珠三角地区主要树种分布比较集中的鹤山丘陵综合开放试验站为采样点.试验站位于广东省中部(112°54'E, 22°41'N),属于亚热带季风性气候.年平均气温 21.7℃,年降雨量 1 800 mm 左右,但分配不均,有明显的干、湿季,4~9 月份为雨季.试验站总面积约 167 hm²,针叶混交林、桉树林、大叶相思林、马占相思林、乡土树种林为试验站的主要林型^[21].王俊等^[17]对整个珠江三角洲地区大气多环芳烃的观测结果显示,该区 PAHs 污染水平相对较高,可作为处于快速工业化和城市化进程中的珠三角地区的典型代表.

1.2 样品采集

分别于 2006-03 和 2006-09 在试验站进行了 2 次样品的采集工作.采集了珠三角地区 6 种主要树种的叶片,分别是:马尾松(*Pinus massoniana*, Pm)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*, Cl)、柠檬桉(*Eucalyptus citriodora*, Ec)、大叶相思(*Acacia auriculaeformis*, Aa)、马占相思(*Acacia mangium*, Am)、荷木(*Schima superba*, Ss).其中,马尾松和杉木为针叶树,其它 4 种为阔叶树.每个树种至少采集 5 棵树,且保持一定的间距,并且每棵树皆在高于地面 2m 的不同高度(一般 3、5 个高度)和方位处采样,最后合成为 1 个样品,即一共 12 个样品.样品采集后立即装入聚乙烯密封袋中,在实验室中,首先用蒸馏水冲洗去除叶面尘,摘除枝条顶端的嫩叶(若有),冷冻干燥后,粉碎至 60~80 目, -20℃ 保存备用.

1.3 PAHs 提取与测定

称取 5 g 样品并混入等量无水硫酸钠,二氯甲烷索氏抽提 48 h,抽提时向溶剂中加入回收率指示物(蔡-d₈、苾-d₁₀、菲-d₁₀、蒾-d₁₂、芘-d₁₂).浓缩后的提取液先经硅胶/氧化铝复合柱初步分离,柱内径 10 mm,自下而上依次填充 10 cm 去活化硅胶、6 cm 氧化铝、5 cm 弗罗里硅藻土和 2 cm 无水硫酸钠,淋洗液为二氯甲烷和正己烷混合液(1:1, 体积比).经初步分离的浓缩液通过凝胶色谱柱进一步净化,柱内径 10 mm,树脂床高 40 cm^[13].浓缩定容至 200 μL,仪

器分析前加入六甲基苯作为定量内标.

PAHs 化合物的定性和定量分析由气相色谱-质谱联用仪(GC: GC8000Top, MS: Voyager Finnigan-MAT)完成.目标化合物为美国 EPA 优先控制的 16 种 PAHs 中的 15 种[苾(Ace)、二氢苾(DiH)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒾(Ant)、荧蒾(Fluo)、芘(Pyr)、苯并(a)蒾(BaA)、蒾(Chr)、苯并(b)荧蒾(BbF)、苯并(k)荧蒾(BkF)、苯并(a)芘(BaP)、茚并(1,2,3-cd)芘(Ind)、二苯并(a,h)蒾(DiB)和苯并(ghi)芘(BghiP)].因蔡(Nap)挥发性强、易降解,在环境中有很大的不确定性,故未作探讨.目标化合物的平均回收率在 80.6%~112.4% 之间,相对标准偏差 < 15%,分析过程中的其他质量保证和质量控制(QA/QC)见文献[22],最终结果经回收率校正.

1.4 脂含量与比叶面积测定

取约 3 g 样品,二氯甲烷与丙酮混合液(1:1, 体积比)索氏抽提 48 h,抽提液经浓缩、干燥后称重,计算得叶脂含量(脂重/干重).

比叶面积的测定分 2 步.

(1)叶面积的测量 阔叶及杉木叶用叶面积仪(LI-3000A)测定(每个样随机取 50 片左右完整叶进行测定).马尾松随机取约 80 束松针测量其长度(*l*)和直径(*d*),松针面积为:

$$A = \pi dl/2 \quad (1)$$

式中, *A* 为松针面积, *d* 为松针直径, *l* 为松针长度.

(2)干重的测定 将测完叶面积的叶片,放入 80℃ 烘箱中干燥 48 h,称重,计算得比叶面积(叶面积/干重).

2 结果与分析

2.1 叶片 $\sum$ PAHs 的含量特征

由图 1 所示的 6 种植物叶片 $\sum$ PAHs 含量可知,3 月份:PAHs 的含量为马尾松(Pm) > 柠檬桉(Ec) > 杉木(Cl) > 大叶相思(Aa) > 马占相思(Am) > 荷木(Ss),分别为 1 034.7、611.1、486.6、440.9、275.9 和 199.7 ng·g⁻¹;9 月份:PAHs 的含量仍为马尾松最高(837.5 ng·g⁻¹),但比 3 月份略低;几个阔叶树种以及杉木都在 200 ng·g⁻¹ 上下浮动,变幅不大(144~270.3 ng·g⁻¹),最低值仍为荷木(144 ng·g⁻¹).与 3 月份相比,9 月样品的 PAHs 含量整体低于 3 月.

有研究表明,有机污染物在叶片的富集程度与辛醇/空气分配系数(*K_{oa}*)呈对数线性关系,而 *K_{oa}* 对

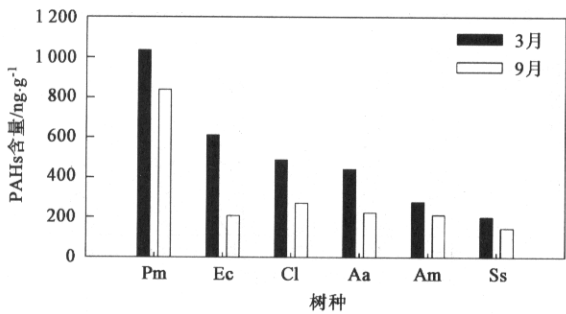


图1 6种植物叶片 Σ PAHs 的含量特征

Fig.1 Σ PAHs concentrations in the leaves of six species

温度有很强的依赖性^[9]. 即, 周围大气温度较低时 (如冬季), PAHs 倾向于向植被富集; 温度较高时 (如夏季), PAHs (特别是中、低环的) 倾向于向大气挥发. 本研究结果与此结论相一致, 笔者认为, 这可能是冬季叶片 PAHs 含量较夏季高的重要原因. 此外, 夏季较高的气温、较长的日照时间可使紫外线的光降解作用加强^[23], 尽管污染地表 (土壤、公路等) 持续不断地挥发可能使大气 PAHs 浓度保持在一个较高的水平^[15], 但是由于从大气到被叶面吸附需要一个相对较长的过程^[9], 能够进入植被叶片并长居其中的 PAHs 仍然较少. 综上所述, 在以植物作为被动采样器来监测大气污染时, 不能笼统地认为植被中的含量一定能真实地反映大气中的浓度状况, 应该充分考虑到气象条件是否会导致目标物在大气和植被中不一致的变化趋势.

另外, 除了气温的影响, 风向、风速也是影响大气污染物浓度的重要因素, 但由于其仅对颗粒态 PAHs 的影响较为显著, 对气态 PAHs 的影响不明显^[24], 因此对叶片 PAHs 含量的影响可忽略不计^[7]. 除了气候因素, 周围环境污染源的改变也不可忽略, 珠江三角洲地区大气 PAHs 主要来源于机动车尾气、工业废气和火力发电燃煤的排放^[14], 因此该地区三者的排放是否存在季节性变化也是影响大气浓度、进而影响叶片 PAHs 含量的因素之一. 由于该方面工作未曾开展, 目前只能作此初步分析.

2.2 叶片中各环 PAHs 的含量特征

叶片中不同环数 PAHs 占 Σ PAHs 的比例有明显差异. 3、4 环化合物为 Σ PAHs 的主要成分, 占 Σ PAHs 的 80% 以上 (除个别稍微偏低外), 5 + 6 环化合物仅占 10% 左右. 这是由于叶片 PAHs 主要来源于周围大气中气态的 PAHs^[7]. 随着分子量的增

大、环数的增加, PAHs 的理化性质发生变化, 在大气中的主要存在形态发生相应改变. 4 环以下低分子量的化合物, 因蒸汽压较高, 主要以气态的形式存在; 5、6 环的 PAHs 蒸汽压较低, 绝大多数是以颗粒态的形式存在, 以气态存在的很少^[25].

在不同的显著性水平上, 各环化合物与 Σ PAHs 含量均呈现出显著的正相关关系. Spearman 相关系数分别为 0.664 ($p = 0.018$)、0.965 ($p = 0.000$)、0.643 ($p = 0.024$). 这与 Wagrowski 等^[26]的研究结果相似, 笔者认为, 这说明各种植物叶片对 PAHs 各组分的吸附以及后来 PAHs 在叶片的转移、挥发、降解等过程相似, 各叶片对 PAHs 均没有特殊的累积和代谢作用.

另外, 相同环数的 PAHs 在叶片中并不是等量分配的 (图 2), 其含量模式与大气中的气态 PAHs 的模式相似^[25]. 芴、菲、荧蒹、芘、蒽等为主要 PAHs 组分. 低环的芴、二氢芴和高环数的苯并[α]芘、茚并[1,2,3-d]芘、苯并[g,h,i]芘、二苯并[a,h]蒹以及蒹、苯并[α]蒹等在所有样品中的含量都很低. 这是因为芴、二氢芴和蒹、苯并[a]蒹在大气中稳定性较差, 易于降解^[24], 苯并[a]芘、茚并[1,2,3-d]芘、苯并[g,h,i]芘、二苯并[a,h]蒹为 5、6 环 PAHs, 在大气中主要以颗粒态存在, 很少能被叶片吸附^[9,10], 说明叶片中的 PAHs 是叶片-大气长期分配平衡的结果^[7], 其浓度可反映一段时间内大气的污染状况.

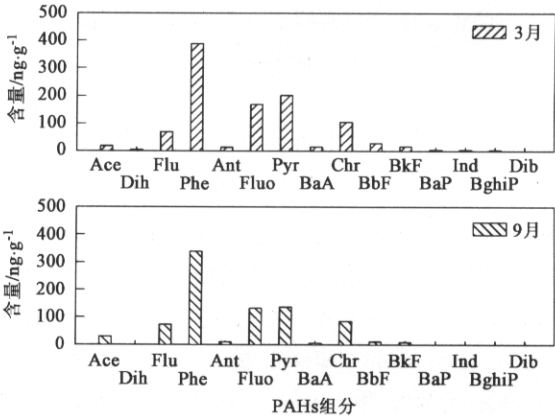


图2 马尾松松针中 PAHs 各化合物的含量

Fig.2 Compounds concentrations of PAHs in *Pinus massoniana* (Pm) needle leaves

综上所述, 不同植物、不同季节以及不同环数 PAHs 的含量存在不同程度的差别, 这是种间差异、周围环境以及 PAHs 的理化性质等共同作用的结果.

3 讨论

鉴于 PAHs 的亲脂性特征以及叶片中的 PAHs 主要来自对大气气态 PAHs 的吸附^[7], 本研究主要从脂含量、叶面积、比叶面积等方面探讨种间差异对叶片 PAHs 含量的影响. 考虑到气候条件对 9 月份叶片 PAHs 的含量影响可能较大(尤其是雨水频繁的冲刷和强烈的紫外线), 以下仅用 3 月份样品数据对 PAHs 含量加以探讨.

3.1 叶片 PAHs 含量与叶脂含量的关系

图 3 为 6 种植物叶片 PAHs 含量与叶脂含量的散点图, 可以看出二者呈正相关关系. 对各环 PAHs 来说, 4 环与脂含量的相关性最好, 5+6 环与脂含量的关系不甚明显. 但是由于 5+6 环本身含量很低, 因此仍然可以充分地说明叶片 PAHs 含量(更具体地说是主要以气态形式存在于大气中 PAHs)与脂含量有着密切的关系.

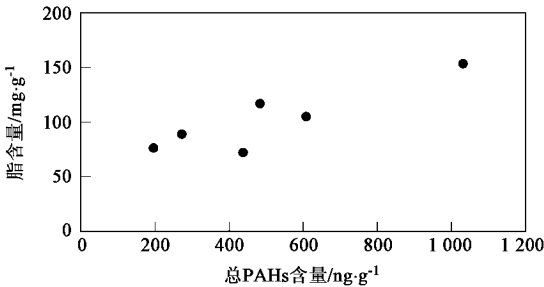


图 3 PAHs 含量与叶脂含量的关系

Fig.3 Relationship between PAHs concentrations and leaf-lipid contents

图 4 显示的是 6 种植物叶片按叶脂含量计算的 $\sum$ PAHs 含量. 与图 1(单位干重的含量)对照不难发现, 2 种计算方法都是马尾松的含量最高, 荷木的最低, 但是 2 个结果仍有明显区别. 按单位叶干重计算的 PAHs 含量, 马尾松的含量约为荷木的 5 倍; 按单位脂含量计算的 PAHs 含量, 二者的差异被大大缩小, 马尾松为 $6.79 \text{ ng}\cdot\text{mg}^{-1}$, 荷木为 $2.67 \text{ ng}\cdot\text{mg}^{-1}$, 两者相差不到 2 倍. 这说明虽然叶脂含量的差异不能完全解释种间 PAHs 含量差异的全部原因, 但显然它能在一定程度上减小这种差异, 表明其是影响 PAHs 含量的重要因素.

王雅琴等^[12]曾研究了叶蜡和叶片(去蜡质)中 PAHs 的关系, 发现叶蜡中 PAHs 比叶片中高 1~2 个数量级. 结合本研究的结果, 可对叶片累积 PAHs 的过程作如下推测: 位于叶表面的叶蜡层首先从周围

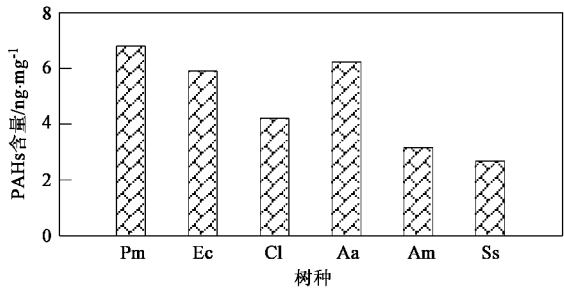


图 4 6 种植物叶片按脂含量计算的 $\sum$ PAHs 含量

Fig.4 $\sum$ PAHs concentrations by leaf-lipid contents in the leaves of six species

大气中吸附固定 PAHs, 而后叶蜡层中的一部分 PAHs 再缓慢扩散到叶的内部组织, 与 Simonich 等^[7,9]的观点一致. 至于有研究者^[27]认为的可能以气体交换的方式通过气孔直接进入叶组织所占的比例可能非常小, 因为如果 PAHs 可以通过气孔大量进入叶片, 那么, ①叶片中的 PAHs 不应该比叶蜡层中的低太多; ②主要以颗粒态存在的 5+6 环 PAHs 也可以通过气孔, 即也应和中、低环 PAHs 一样与脂含量呈正相关关系. 因此, 叶的表面特征可能是影响 PAHs 在叶片富集的又一重要因子.

3.2 叶片 PAHs 含量与叶面积、比叶面积的关系

图 5 为 $\sum$ PAHs 含量与比叶面积(常用来作为表征叶厚度的指标)和叶面积关系图. 由图 5(a)可以看出: 去掉杉木的偏离点后(其可能是由于其特殊的羽状叶而不同于而其他几种植物), $\sum$ PAHs 含量与比叶面积表现出一定的负相关关系. 即: 周围大气的状况相同时, 较厚的叶片(SLA 值小的)趋向于吸附更多的 PAHs. 进一步分析, 笔者认为, 导致这种结果的原因可能是叶片的厚度往往与叶表面的蜡质层有关, 因为一般叶片厚, 蜡质层相应也较厚^[28].

$\sum$ PAHs 含量与叶面积没有明显的相关关系[图 5(b)], 显示叶面积不是影响 PAHs 在叶片富集的重要因素, 单纯的叶面积不能说明叶片对 PAHs 的吸附能力. 按单位叶面积计算的 PAHs 含量(图 6), 表现出种间差异被进一步放大, 高值(马尾松 $15.35 \text{ ng}\cdot\text{cm}^{-2}$)升至极低值(荷木 $1.91 \text{ ng}\cdot\text{cm}^{-2}$)的 8 倍. 说明按此方法计算 PAHs 含量更突显了种间的差异, 暗示叶的表面结构特征可能对 PAHs 的富集产生一定影响. 几种植物叶片的表面特征表明: 在脂含量相当的情况下(如杉木和柠檬桉, 大叶相思和荷木), 表面粗糙(大叶相思)或叶形为羽状(杉木)的叶

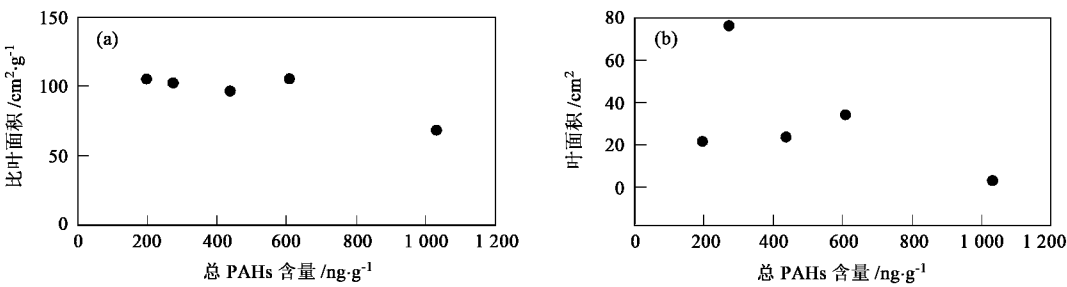


图 5 PAHs 含量与比叶面积、叶面积的关系

Fig.5 Relationship between PAHs concentrations and specific leaf area, leaf area

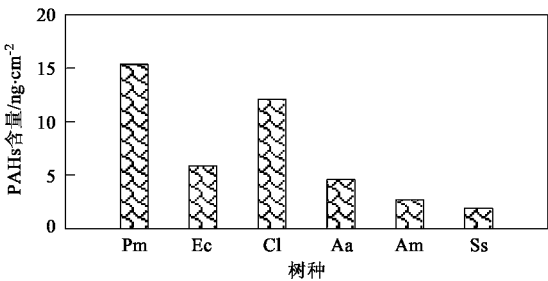


图 6 6 种植物叶片单位叶面积上的 $\sum$ PAHs 含量

Fig.6 $\sum$ PAHs concentrations per cm² in the leaves of six species

片比表面光滑平整(桉树, 荷木)的单位叶面积上的 PAHs 含量高。

4 结论

研究区马尾松松针中的 PAHs 含量显著高于阔叶, 阔叶之间差异不明显. 3、4 环 PAHs 为主要的 PAHs 成分, 占 80% 以上; 各环均与 $\sum$ PAHs 呈显著正相关关系. 按叶脂含量计算 PAHs 含量能大大缩小种间含量的差异, 最大值、最小值相差不到 2 倍. 按单位叶面积计算的 PAHs 含量, 种间差异扩大, 高、低值相差达 8 倍. PAHs 含量与叶片脂含量呈明显的正相关关系、与比叶面积呈一定的负相关, 揭示叶脂含量、比叶面积是影响 PAHs 在叶片富集的重要因素。

参考文献:

[1] Menzie C A, Potocki B B, Santodonato J. Exposure to carcinogenic PAHs in the environment[J]. Environ Sci Technol, 1992, 26(7): 1278-1284.

[2] McLachlan M S. Bioaccumulation of Hydrophobic Chemicals in Agricultural Food Chains[J]. Environ Sci Technol, 1996, 30(1): 252-259.

[3] Fan Z, Jung K H, Lioy P J. Development of a Passive Sampler To Measure Personal Exposure to Gaseous PAHs in Community Settings [J]. Environ Sci Technol, 2006, 40(19): 6051-6057.

[4] Hwang H M, Wade T L, Sericano J L. Concentrations and Source Characterization of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Pine Needles from Korea, Mexico, and United States [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(16): 2259-2267.

[5] Bacci E, Calamari D, Gaggi C, et al. Bioconcentration of Organic Chemical Vapors in Plant Leaves: Experimental Measurements and Correlation[J]. Environ Sci Technol, 1990, 24(6): 885-889.

[6] Schreiber L, Schoenherr J. Uptake of organic chemicals in conifer needles: surface adsorption and permeability of cuticles[J]. Environ Sci Technol, 1992, 26(1): 153-159.

[7] Simonich S L, Hites R A. Vegetation-atmosphere partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Environ Sci Technol, 1994, 28(5): 939-943.

[8] Tolls J, McLachlan M S. Partitioning of Semivolatile Organic Compounds between Air and *Loilum multiflorum* (Welsh Ray Grass) [J]. Environ Sci Technol, 1994, 28(1): 159-166.

[9] Simonich S L, Hites R A. Organic Pollutant Accumulation in Vegetation[J]. Environ Sci Technol, 1995, 29(12): 2905-2914.

[10] Kipopoulou A M, Manoli E, Samara C. Bioconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables grown in an industrial area[J]. Environmental Pollution, 1999, 106(3): 369-380.

[11] McLachlan M S. Framework for the Interpretation of Measurements of SOCs in Plants[J]. Environ Sci Technol, 1999, 33(11): 1799-1804.

[12] 王雅琴, 左谦, 焦杏春, 等. 北京大学及周边地区非取暖期植物叶片中的多环芳烃[J]. 环境科学, 2004, 25(4): 23-27.

[13] 刘向, 张干, 刘国卿, 等. 南岭北坡苔藓中多环芳烃的研究 [J]. 中国环境科学, 2005, 25(1): 101-105.

[14] Fu J M, Mai B X, Sheng G Y, et al. Persistent organic pollutants in environment of the Pearl River Delta, China: an overview[J]. Chemosphere, 2003, 52(9): 1411-1422.

[15] Li J, Zhang G, Li X D, et al. Source seasonality of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a subtropical city, Guangzhou, South China[J]. Science of the Total Environment, 2006, 355(1-3): 145-155.

[16] Liu G Q, Zhang G, Li X D, et al. Sedimentary record of polycyclic aromatic hydrocarbons in a sediment core from the Pearl River Estuary, South China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, 51(8-12): 912-921.

[17] 王俊, 张干, 李向东, 等. 珠江三角洲地区大气中多环芳烃的被动采样观测[J]. 环境科学研究, 2007, 20(1): 42-46.

- [18] Luo X J, Mai B X, Yang Q S, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorine pesticides in water columns from the Pearl River and the Macao harbor in the Pearl River Delta in South China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, **48**(11-12): 1102-1115.
- [19] Mai B X, Fu J M, Sheng G Y, *et al.* Chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Pollution*, 2002, **117**(3): 457-474.
- [20] 刘国卿,张干,刘向,等. 大气中多环芳烃(PAHs)在松针和SPMD上的分布[J]. *环境化学*, 2005, **24**(1): 81-84.
- [21] 曹洪麟,张文其. 鹤山丘陵综合试验站植被类型[J]. *资源生态环境网络研究动态*, 1996, **7**(2): 44-48.
- [22] 林峥,麦碧娴,张干,等. 沉积物中多环芳烃和有机氯农药定量分析的质量保证和质量控制[J]. *环境化学*, 1999, **18**(2): 115-121.
- [23] Wang D G, Chen J W, Xu Z, *et al.* Disappearance of polycyclic aromatic hydrocarbons sorbed on surfaces of pine [*Pinus thunbergii*] needles under irradiation of sunlight: Volatilization and photolysis[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(25): 4583-4591.
- [24] 李军,张干,祁士华. 广州市大气中多环芳烃分布特征、季节变化及其影响因素[J]. *环境科学*, 2004, **25**(3): 7-13.
- [25] 毕新慧,盛国英,谭吉华,等. 多环芳烃在大气中的相分布[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(1): 101-106.
- [26] Wagrowski D M, Hites R A. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Accumulation in Urban, Suburban, and Rural Vegetation[J]. *Environ Sci Technol*, 1997, **31**(1): 279-282.
- [27] Franzaring J, Van der Eerden L J M. Accumulation of airborne persistent organic pollutants(POPs) in plants[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2000, **1**(1): 25-30.
- [28] 李跃林,彭少麟,戴智明,等. 鹤山重建植被的几种优势种叶解剖学研究[J]. *生态科学*, 2002, **21**(1): 41-44.