

冯 驰,赖 政,查 燕,等. 城市绿化树种叶片多环芳烃含量水平与叶片特征的关系[J]. 江苏农业科学,2018,46(23):366-370.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.23.090

城市绿化树种叶片多环芳烃含量水平与叶片特征的关系

冯 驰,赖 政,查 燕,李佳熙,张银龙

(南京林业大学/江苏省南方现代林业协同创新中心,江苏南京 210037)

摘要:多环芳烃(PAHs)是极具生态和健康风险的持久性有机污染物,具有长期残留性、生物蓄积性和很强的三致效应。为研究江苏省南京市常见绿化树种叶片 PAHs 含量水平以及其与叶片特征的关系,通过 GC-MS 测定树种叶片中 PAHs 含量并分析其与叶片特征(叶蜡含量、气孔密度、比叶面积)之间的关系。结果表明:洒金桃叶珊瑚叶片累积 PAHs 的能力最强(1.10 mg/kg),香樟累积能力最弱(0.22 mg/kg)。NaP、Phe、Fla、B(b)F 是叶片主要的 PAHs 组分,叶片 PAHs 以二环、三环、四环为主,占总 PAHs 的 70% 以上。在海桐、黄杨、红叶石楠、洒金桃叶珊瑚、桂花和八角金盘叶片中,叶片 PAHs 含量与叶蜡含量呈显著正相关,与气孔密度之间未发现显著相关性;除了八角金盘,5 种树种叶片 PAHs 含量与比叶面积呈显著负相关;表明叶蜡含量与比叶面积是影响叶片 PAHs 含量的重要因素。研究结果可以为城市绿化树种的选择和配置提供科学参考。

关键词:绿化树种;PAHs;叶蜡;比叶面积;气孔密度;相关性

中图分类号: X173 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)23-0366-05

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一种极具生态和健康风险的碳氢化合物^[1],具有长期残留性、生物蓄积性和很强的三致效应^[2]。美国环境保护局已将 16 种 PAHs 作为优先污染物质^[3],其中 7 种 PAHs 被国际癌症研究机构认定为 2B 类以上致癌物质^[4]。PAHs 在大气环境中广泛分布^[5-7],而植物能有效减轻大气中 PAHs 污染程度^[8-9],植物叶片更是一种有潜力的自然环境净化器^[10]。植物叶片能通过气体扩散和干湿沉降等作用有效累积大气中的 PAHs^[11],且采集样品省时省力,使大气污染监测更加经济简便。国内外学者研究发现,植物叶片特征对叶片吸收 PAHs 起重要作用。气态 PAHs 通过气孔和角质层进入叶片^[12-13],叶表面颗粒态 PAHs 也会解吸进入角质层^[14];同时比叶面积和叶蜡含量对 PAHs 的吸收也会产生显著影响^[15-16];由于不同种植物叶片特征各不相同,导致叶片 PAHs 含量存在种间差异^[17],也影响了不同环数 PAHs 在植物叶片的分布^[18]。近年来,以植物叶片 PAHs 含量作为污染检测指标已经成为大气环境方面研究的热点^[19-20],但是有关于城市绿化树种叶片 PAHs 含量特征研究不多,叶片特征与叶片 PAHs 含量之间的具体关系也少有探讨。因此,本研究通过测定江苏省南京市 9 种常见绿化树种叶片 16 种 PAHs 含量,分析部分树种叶片 PAHs 含量与叶蜡含量、气孔密度、比叶面积之间的关系,筛选出累积 PAHs 能力强的树种,为探讨 PAHs 在大气和植物叶片之间的传输机制提供参考。

收稿日期:2017-08-15

基金项目:江苏省高校自然科学研究重大项目(编号:13KJA180002);江苏高校优势学科建设工程资助项目(编号:PAPD)。

作者简介:冯 驰(1992—),男,江苏淮安人,硕士,主要从事环境生态学研究。E-mail:1427946549@qq.com。

通信作者:张银龙,博士,教授,主要从事环境生态学研究。E-mail:ecoenlyz@163.com。

1 材料与方法

1.1 采样点设置与样品采集

经过实地勘探及树种考察,在南京林业大学校园内设置 7 个采样点(图 1)。各采样点距城市交通枢纽新庄立交桥 300 m 以上,以确保外界环境因素基本一致;确保每个采样点均生长一定数量且具有 1 年以上生长周期的 9 种待测树种(八角金盘 *Fatsia japonica*、黄杨 *Buxus sinica*、海桐 *Pittosporum tobira*、红叶石楠 *Photinia × fraseri*、洒金桃叶珊瑚 *Aucuba japonica* var. *variegata*、桂花 *Osmanthus fragrans*、女贞 *Ligustrum lucidum*、香樟 *Cinnamomum camphora* 和冬青 *Ilex chinensis* Sims)。采样时间为 2016 年 11 月 1—3 日,采样期间和采样前 1 周均为晴天,气温无较大变化。在每个采样点每种树种选择 3 棵生长状况一致的树木,每棵样树保持一定间距。每棵树按树冠东、南、西、北 4 个方向和上、中、下 3 层进行采样,每种树种选择大小及生长状况一致的叶片,采集后用塑封袋封装。另在每棵样树上采集数张树叶,用于测定叶蜡含量、比叶面积、气孔密度。



图1 采样点设置

1.2 叶片 PAHs 测定

1.2.1 预处理 将叶片用蒸馏水浸泡 10 min, 清洗干净后晾干封存于塑封袋中, 放置于低温冷冻干燥器中进行冷冻干燥处理, 再进行研磨, 将干燥粉末样品存于密封的棕色玻璃瓶中, -18°C 保存。用千分之一天平称取 0.50 g 样品置于 10 mL 玻璃离心管中, 用 5 mL 丙酮-二甲甲烷溶液(体积比 1:1)萃取 20 min; 超声波清洗机温度控制在 30°C 以下, 低速冷冻离心 10 min, 重复操作 3 次, 收集萃取液; 40°C 条件下, 用旋转蒸发仪将萃取液浓缩至 1 mL 左右; 转移萃取液, 通过层析柱进行样品净化; 净化后的萃取液再一次进行旋转蒸发浓缩至微干状态, 用 2 mL 乙腈进行定容封存, 并置于 -18°C 保存, 以备气相色谱-质谱(GC-MS)测定分析。

1.2.2 分析测定 使用 GC-MS 对 16 种 PAHs[二环: 萘 Nap; 三环: 苊 Ace、二氢苊 Acy、苊 Flo、菲 Phe、蒽 Ant; 四环: 荧蒽 Fla、芘 Pyr、苯并(a)苊 BaA、蒎 Chr; 五环: 苯并(b)荧蒽 B(b)F、苯并(k)荧蒽 B(k)F、苯并(a)芘 BaP、二苯并(a,h)苊 DahA; 六环: 苯并(g,h,i)芘 B(ghi)P、茚并(1,2,3-c,d)芘 IcdP]进行测定分析。色谱柱为 DB5 石英毛细管柱(30 m \times 0.25 mm; 膜厚 0.25 μm), 载气使用氮气, 流动相流速控制在 1.2 mL/min, 进样量 2 μL , 进样口温度控制在 280°C 。将色谱柱初始温度 80°C 保持 2 min, 以 $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 100°C , 再以 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 200°C , 最后以 $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 280°C , 并保持 21 min。

1.3 叶蜡含量测定

每个树种称取新鲜叶片 0.20 g, 用蒸馏水浸泡 10 min 晾干后置于已知质量 m_1 (g) 的培养皿中, 加入 30 mL 三氯甲烷浸泡 1 min, 夹出叶片, 待三氯甲烷完全挥发, 再次称量培养皿质量 m_2 (g), 利用差值法, 测算叶蜡含量^[21]。每个树种重复操作 5 次。

$$\text{叶蜡含量}(\text{mg/g}) = \frac{\sum_{i=1}^5 (m_2 - m_1)}{5}。$$

1.4 比叶面积测定

每个树种选取 5 张生长状况一致的正常叶片, 采用叶面积仪测定植物叶片面积(S); 然后在 65°C 条件下烘干 48 h 至恒质量, 用天平称量叶片干质量(DW), 通过计算公式获得比叶面积(SLA)。

$$SLA(\text{cm}^2/\text{g}) = \frac{S(\text{cm}^2)}{DW(\text{g})}。$$

式中: SLA 表示比叶面积, cm^2/g ; S 表示双面叶面积, cm^2 ; DW 表示植物干质量, g。

1.5 气孔密度测定

每个树种选择 5 张生长状况一致的正常叶片, 不进行清洗, 通过冷冻干燥预处理, 切取 1 cm \times 1 cm 方形叶片, 喷金处理后, 利用 SEM 扫描电子显微镜进行观察。每张叶片样品选择 5 个视野进行拍照。通过计数法获取气孔数量, 从而计算气孔密度。

$$\text{气孔密度}(\text{个}/\text{cm}^2) = \frac{\sum_{i=1}^{25} \text{气孔数}_i(\text{个})}{\sum_{i=1}^{25} \text{视野面积}_i(\text{cm}^2)}。$$

1.6 数据处理方法

采用 SPSS 16.0 软件进行数据分析, 变量之间的相关性

用 Pearson 检验, 显著性水平设定为 0.05, 叶片特征与 PAHs 含量间的相关关系用回归方程分析。

2 结果与分析

2.1 典型树种叶片总 PAHs 含量

由图 2 可知, 9 种树种叶片总 PAHs 含量在 0.22 ~ 1.10 mg/kg, 洒金桃叶珊瑚含量最高, 总体而言, 常绿乔木树种如香樟、女贞、冬青叶片总 PAHs 含量低于八角金盘、红叶石楠、洒金桃叶珊瑚、黄杨等灌木植物。这可能是因为常绿阔叶灌木植株矮小, 叶片密度高, 贴近地面簇状生长, 受地面扬尘影响较大^[22-23], 更易截留大气颗粒物, 导致叶片检测出较多的 PAHs 含量。桂花叶片总 PAHs 含量相对较高, 一则桂花是小乔木或灌木, 同时因为桂花叶片表面角质层相较于其他树种更厚, 而角质层能够很好地吸附 PAHs^[24]。

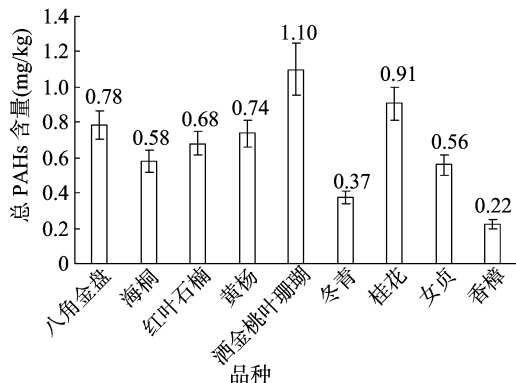


图2 不同树种叶片中总 PAHs 含量

2.2 典型树种叶片 PAHs 单体含量

由表 1 和图 3 可知, 植物叶片吸收 PAHs 单体的能力存在种间差异。其中 NaP ($4.38 \times 10^{-2} \sim 0.25$ mg/kg)、Phe ($3.26 \times 10^{-2} \sim 0.18$ mg/kg)、Fla ($2.93 \times 10^{-2} \sim 0.17$ mg/kg)、B(b)F ($5.20 \times 10^{-3} \sim 0.16$ mg/kg) 含量占总 PAHs 含量的平均百分比分别为 23.76%、15.70%、10.36%、12.13%, 共占总 PAHs 含量的 61.95%, 说明 NaP、Phe、Fla、B(b)F 是南京市绿化树种叶片主要 PAHs 组分。其余 PAHs 组分含量较低。Ace 和 Acy (两者为同分异构体, 联合测定为 $9.00 \times 10^{-4} \sim 7.13 \times 10^{-2}$ mg/kg)、Flo ($9.47 \times 10^{-3} \sim 4.48 \times 10^{-2}$ mg/kg)、Ant ($1.49 \times 10^{-2} \sim 5.52 \times 10^{-2}$ mg/kg)、BaA ($5.04 \times 10^{-3} \sim 0.19$ mg/kg) 含量占总 PAHs 含量的平均百分比分别为 1.43%、5.31%、5.83%、5.98%, 可能是因为低分子量的 PAHs 稳定性差, 在环境中易被降解^[25]。Chr ($8.39 \times 10^{-3} \sim 0.11$ mg/kg)、Pyr ($3.24 \times 10^{-3} \sim 5.62 \times 10^{-2}$ mg/kg)、B(k)F ($3.26 \times 10^{-3} \sim 3.51 \times 10^{-2}$ mg/kg)、BaP ($4.00 \times 10^{-3} \sim 1.85 \times 10^{-2}$ mg/kg)、DahA ($3.43 \times 10^{-3} \sim 7.18 \times 10^{-2}$ mg/kg)、B(ghi)P ($2.79 \times 10^{-3} \sim 5.27 \times 10^{-2}$ mg/kg) 和 IcdP ($3.78 \times 10^{-3} \sim 0.10$ mg/kg) 含量占总 PAHs 含量的平均百分比分别为 3.70%、3.04%、1.35%、1.21%、2.70%、3.05%、4.45%, 可能是因为高环 PAHs 主要附着在颗粒物上, 很难被叶片吸收^[26]。

2.3 典型树种叶片不同环数 PAHs 含量

由表 2 和图 4 可知, 不同环数 PAHs 在 9 种绿化树种叶片中所占比例不同, 因此叶片对不同环数 PAHs 的吸收存在

表 1 9 种树种叶片中 PAHs 单体含量

树种	PAHs 单体含量(μg/kg)														
	Nap	Ace + Acy	Flo	Phe	Ant	Fla	BaA	Chr	Pyr	B(b)F	B(k)F	BaP	DahA	B(ghi)P	IcdP
八角金盘	209.01	1.14	40.26	150.32	53.08	80.61	13.16	18.39	6.48	159.92	5.59	7.02	12.63	2.79	21.78
海桐	206.89	0.90	34.04	54.63	27.89	74.70	14.39	15.37	8.16	84.24	7.01	8.19	11.71	3.19	27.93
红叶石楠	204.95	1.70	13.67	43.02	31.14	29.26	194.27	14.27	46.12	5.20	5.26	4.54	71.78	12.42	3.78
黄杨	247.67	1.99	44.61	141.04	50.24	62.12	12.86	18.20	8.92	84.37	5.44	7.09	12.60	4.61	34.75
洒金桃叶珊瑚	185.43	71.30	36.33	125.78	41.79	62.80	108.67	111.90	56.16	84.76	35.11	7.75	15.64	52.74	102.45
冬青	94.73	1.13	40.33	69.13	23.59	32.00	5.69	8.39	4.18	41.49	3.26	4.27	4.64	28.67	12.16
桂花	108.02	3.37	20.97	179.83	55.19	172.74	37.42	35.60	16.06	158.20	17.11	18.46	26.33	13.23	42.80
女贞	77.88	2.01	44.79	127.13	37.06	52.71	8.93	17.27	43.00	51.46	6.91	7.03	7.37	49.37	25.41
香樟	43.81	10.16	9.47	32.56	14.90	32.49	5.04	9.63	3.24	36.68	3.41	4.00	3.43	2.90	11.83

注:相对标准偏差(RSD)均低于 15%。下同。

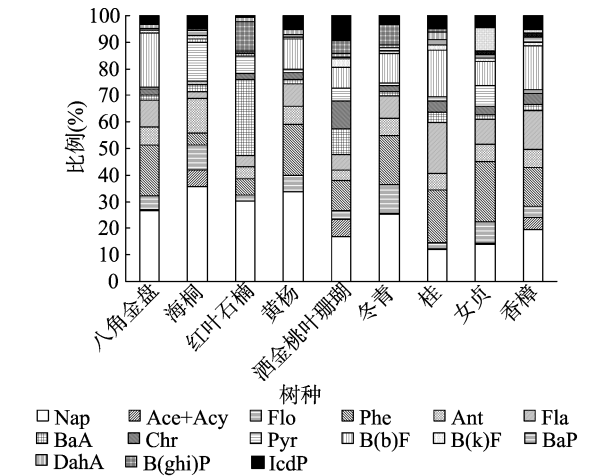


图3 9 种树种叶片中 PAHs 单体含量比例

表 2 9 种树种叶片各环 PAHs 含量

树种	不同环数 PAHs 含量(μg/kg)				
	二环	三环	四环	五环	六环
八角金盘	209.01	244.79	118.64	185.16	24.57
海桐	206.89	117.47	112.62	111.15	31.12
红叶石楠	204.95	89.54	283.92	86.78	16.20
黄杨	247.67	237.88	102.10	109.50	39.36
洒金桃叶珊瑚	185.43	275.21	339.53	143.26	155.19
冬青	94.73	134.17	50.26	53.66	40.83
桂花	108.02	259.36	261.82	220.10	56.03
女贞	77.88	211.00	121.91	72.77	74.78
香樟	43.81	67.09	50.40	47.52	14.73

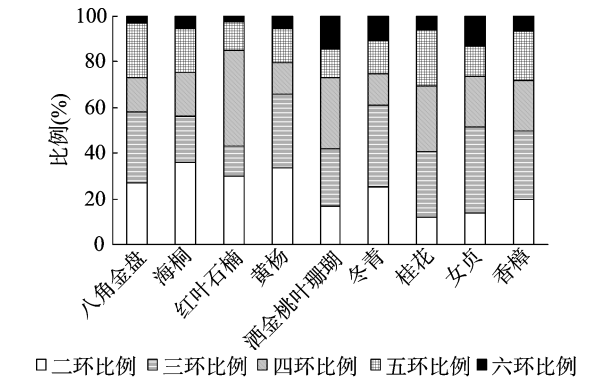


图4 9 种树种叶片中各环 PAHs 含量比例

种间差异。二环($4.38 \times 10^{-2} \sim 0.25 \text{ mg/kg}$)、三环($6.71 \times 10^{-2} \sim 0.28 \text{ mg/kg}$)、四环($5.03 \times 10^{-2} \sim 0.34 \text{ mg/kg}$)、五环($4.75 \times 10^{-2} \sim 0.22 \text{ mg/kg}$)、六环($1.47 \times 10^{-2} \sim 0.16 \text{ mg/kg}$)PAHs 占总 PAHs 含量的平均百分比分别为 23.76%、28.27%、23.09%、17.38%、7.50%,9 种绿化树种叶片中以二环、三环、四环 PAHs 为主,占总量的 75.12%,五环、六环 PAHs 占总 PAHs 含量的 24.88%。

2.4 叶片 PAHs 含量与叶片特征的关系

2.4.1 叶片 PAHs 含量与叶蜡含量的关系 由图 5 可知,6 种绿化树种(海桐、八角金盘、黄杨、桂花、红叶石楠和洒金桃叶珊瑚)叶片总 PAHs 含量与叶蜡含量之间呈显著正相关关系($P < 0.05$)。随着叶蜡含量的变大,树种叶片总 PAHs 含量也变大,相关回归方程为 $y = 0.063 3x + 0.592 6$ 。叶蜡是覆盖在叶表面的一层疏水性脂类物质,因此研究结果与 Simonich 等认为的植物 PAHs 含量与脂含量显著正相关的结论^[27]一致。

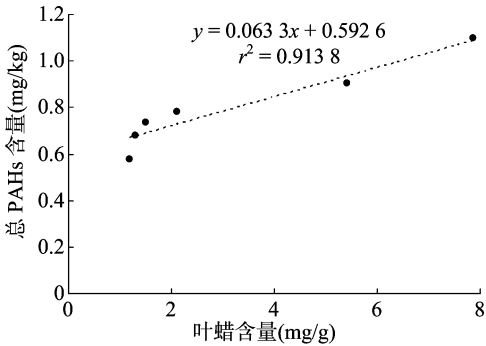


图5 叶片总 PAHs 含量与叶蜡的关系

采用 Pearson 相关性分析分析叶蜡含量与不同环数 PAHs 含量、PAHs 单体含量的关系。结果(表 3)表明,6 种树种叶片叶蜡含量与不同环数 PAHs 含量无显著相关性,这与叶蜡含量同总 PAHs 含量呈正相关的结论不一致。叶蜡含量与 Pyr 含量相关性系数为 0.977,呈显著正相关($P < 0.05$),与其他 PAHs 组分无显著相关性。这可能是因为不同 PAHs 具有的亲脂性大小不同以及外界因素的干扰。

2.4.2 叶片 PAHs 含量与比叶面积的关系 5 种绿化树种(八角金盘叶面积远远大于其他树种,不利于比较分析,因此未计入其数据)叶片 PAHs 含量同比叶面积呈显著负相关($P < 0.05$)(图 6),相关回归方程为 $y = -0.029 5x +$

1.490 1。随着比叶面积的增加,植物叶片对 PAHs 的吸收量逐渐下降。比叶面积值越小,相同叶面积下叶片可能越厚。有研究表明,叶片越厚,叶蜡含量越高,亲脂性 PAHs 更易被吸收^[28]。

由表 3 可知,比叶面积与各环 PAHs 无显著相关性,与 B(b)F 含量呈显著正相关($P < 0.05$),其他单体含量与比叶面积没有显著相关性。这与总 PAHs 含量与比叶面积呈负相关正好相反,可能是由 B(b)F 本身的物理化学性质所致。

表 3 叶片特征与叶片 PAHs 相关性分析

PAHs	相关系数		
	叶蜡含量	比叶面积	气孔密度
二环	0.029	0.919	0.228
三环	-0.602	0.131	-0.236
四环	-0.901	-0.157	-0.278
五环	-0.274	-0.477	0.896
六环	0.892	0.329	0.659
Nap	0.029	0.919	-0.689
Ace + Acy	-0.164	-0.255	-0.236
Flu	-0.532	-0.017	0.254
Phe	-0.677	0.181	-0.374
Ant	-0.243	0.235	0.012
Flo	-0.587	0.536	-0.448
BaA	0.070	-0.709	0.535
Chr	-0.621	0.852	-0.713
Pyr	0.977 *	-0.349	0.955 *
B(b)F	-0.146	0.977 *	-0.427
B(k)F	-0.615	0.875	-0.733
BaP	-0.196	-0.429	0.267
DahA	0.894	0.107	0.748
B(ghi)P	-0.919	-0.033	-0.622
IcdP	-0.871	0.118	-0.580

注:“*”表示在 0.05 水平显著相关。

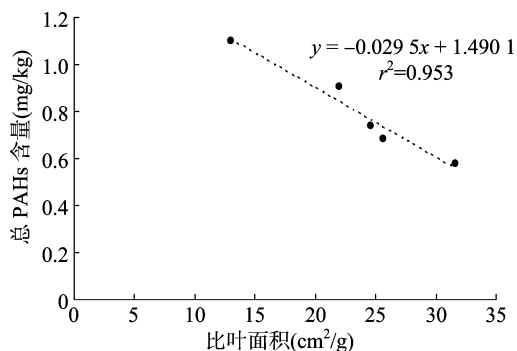


图6 叶片总 PAHs 含量与比叶面积的关系

2.4.3 叶片 PAHs 含量与气孔密度的关系 由图 7 可知,叶片总 PAHs 含量与气孔密度之间无显著线性相关关系($r^2 = 0.3486$)。无显著相关性可能是因为气孔开合度受气孔的长宽比及外界条件影响较大,合适的长宽比有利于气孔在气体交换时对 PAHs 的吸附^[10];温度、表面异物、湿度等也会影响气孔的开合,特别是叶片表面颗粒物的存在,会导致叶片气孔受到不同程度的堵塞^[29]。

叶面结构 SEM 影像显示,被测树种叶片表面覆盖有大量颗粒物堵塞气孔,极大地影响了叶片 PAHs 的吸收。

6 种树种叶片气孔密度与叶片各环 PAHs 含量无显著相

关性(表 3)。不同环数 PAHs 相关性系数有正有负,表明气孔密度对不同环数 PAHs 影响不同。气孔密度与 Pyr 含量相关系数为 0.955,在 0.05 水平下呈显著正相关性,可能因为 Pyr 是四环 PAHs,四环 PAHs 可在气态-固态间相互转化^[30],当颗粒物堵塞气孔时,Pyr 较容易脱离颗粒物,以气态的形式被叶片从气孔吸收。

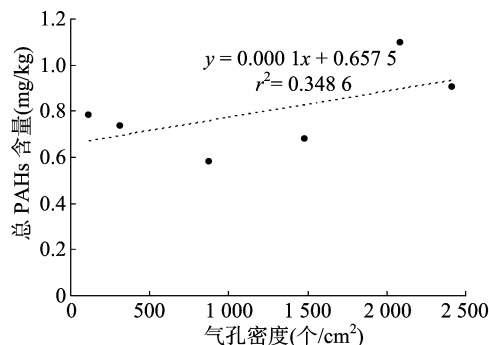


图7 叶片总 PAHs 含量与气孔密度的关系

3 结论与讨论

3.1 绿化树种叶片 PAHs 的含量特征

从 9 种树种叶片总 PAHs 含量可知,香樟、女贞、冬青叶片总 PAHs 含量低于八角金盘、海桐、红叶石楠、洒金桃叶珊瑚、黄杨,其中洒金桃叶珊瑚对总 PAHs 累积能力最强。9 种树种叶片总 PAHs 含量范围基本上与董瑞斌等研究的植物体内 PAHs 浓度范围(0.02 ~ 1.00 mg/kg)一致^[31]。这可能原因是采样点距交通枢纽新庄立交桥均超过 300 m,受到机动车尾气污染程度相对较低,植物叶片能在一个相对稳定的环境下积累大气中的 PAHs。

9 种树种叶片中各 PAHs 组分的含量不同,NaP、Phe、Fla、B(b)F 是叶片主要 PAHs 组分。刘营等也研究发现,在樟树叶片中,低环数的 Acy、Ace、Ant 和高环数的 BaA、BaP、IcdP、B(ghi)P、DahA 等都处于低含量水平^[32]。9 种树种叶片中 PAHs 单体含量存在不同程度的差异,可能是因为每种 PAHs 单体物理化学性质不相同,每种树种叶片组成及结构特征也不同。

9 种树种叶片对不同环数 PAHs 的吸收量也不同。总体来看,树种叶片对二环、三环、四环 PAHs 的吸收量高于五环、六环 PAHs。9 种绿化树种叶片中以二环、三环、四环 PAHs 为主,占总量的 70% 以上。这是因为在大气中,二环、三环 PAHs 呈气态,四环 PAHs 介于气态-固态平衡之间,五环、六环 PAHs 常吸附于颗粒物上,气态 PAHs 更容易被叶片吸收^[10,33]。

3.2 绿化树种叶片 PAHs 含量与叶片特征的关系

6 种绿化树种叶片总 PAHs 含量与叶蜡含量之间存在显著正相关关系($P < 0.05$)。叶蜡是覆盖在叶表面的一层疏水性脂类物质,有机脂类的组成决定了蜡质对 PAHs 较强的吸附能力。因此本研究与 Simonich 等的植物 PAHs 含量与脂含量显著正相关结论^[27]一致。

5 种绿化树种叶片 PAHs 含量同比叶面积存在显著负相关性($P < 0.05$)。比叶面积值越小,相同叶面积下叶片可能越厚。有研究表明,叶片越厚,叶蜡含量越高。当叶蜡含量增

加时,亲脂性 PAHs 更易被叶蜡吸收^[28]。

叶片总 PAHs 含量与气孔密度无显著相关性。这与 Cornejo 等研究发现气孔密度同叶片 PAHs 含量存在一定的正相关性的结论^[34]不一致。这可能是因为缺乏对环境温度、湿度、表面异物和气孔宽长比等因素的进一步控制,在以后的研究中可以深入探讨。

参考文献:

- [1] Tsai W T, Mi H H, Chang Y M, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in bio-crudes from induction-heating pyrolysis of biomass wastes[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(5):1133-1137.
- [2] 薛鸿斌. 多环芳烃在颗粒活性炭上的吸附脱附研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011:1-86.
- [3] Ayotamuno J, Okparanma R N, Davis D, et al. PAH removal from Nigerian oil-based drill-cuttings with spent oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) substrate[J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2010, 8(3/4):914-919.
- [4] 杨威, 郎印海, 李国梁, 等. 胶州湾湿地土壤多环芳烃分布及健康风险评价[J]. *环境化学*, 2013, 32(10):1989-1990.
- [5] Liu C J, Zhang P, Yang B, et al. Kinetic studies of heterogeneous reactions of polycyclic aromatic hydrocarbon aerosols with NO₃ radicals[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(14):7575-7580.
- [6] 刘营. 上海城市植物叶片多环芳烃时空分布特征及源解析[D]. 上海: 华东师范大学, 2014:1-119.
- [7] Lian J J, Ren Y, Chen J M, et al. Distribution and source of alkyl polycyclic aromatic hydrocarbons in dustfall in Shanghai, China: the effect on the coastal area[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2009, 11(1):187-192.
- [8] Bacci E, Cerejeira M J, Gaggi C, et al. Bioconcentration of organic chemical vapors in plant leaves: the azalea model[J]. *Chemosphere*, 1990, 21(4/5):525-535.
- [9] Baumard P, Budzinski H, Garrigue P. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments and mussels of the Western Mediterranean Sea[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1998, 17(5):765-776.
- [10] 彭钢, 田大伦, 闫文德, 等. 4 种城市绿化树种叶片 PAHs 含量特征与叶面结构的关系[J]. *生态学报*, 2010, 30(14):3700-3706.
- [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烃[J]. *生态环境学报*, 2007, 16(6):1597-1601.
- [12] 黄勇. 城市植物叶片 PAHs 特性及对土壤微生物与酶的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011:1-135.
- [13] 张萍. 气相色谱测定松针中菲、蒎、荧蒎、芘、苯并[a]蒎、屈的研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012:1-53.
- [14] 李青青. 植物表面对多环芳烃和石墨烯量子点的摄取过程及作用机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2016:1-150.
- [15] Howsam M, Jones K C, Ineson P. PAHs associated with the leaves of three deciduous tree species. II: Uptake during a growing season[J]. *Chemosphere*, 2001, 44(2):155-164.
- [16] Jouraeva V A, Johnson D L, Hassett J P, et al. Differences in accumulation of PAHs and metals on the leaves of *Tilia × euchlora* and *Pyrus calleryana*[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 120(2):331-338.
- [17] Smith K E C, Thomas G O, Jones K C. Seasonal and species differences in the air-pasture transfer of PAHs[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(11):2156-2165.
- [18] Howsam M, Jones K C, Ineson P. PAHs associated with the leaves of three deciduous tree species. I - Concentrations and profiles[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 108(3):413-424.
- [19] 安海龙, 刘庆倩, 曹学慧, 等. 不同 PM_{2.5} 污染区常见树种叶片对 PAHs 的吸收特征分析[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(1):59-66.
- [20] 张萍, 李崇瑛, 刘敏, 等. 植物被动采样器监测大气中多环芳烃(PAHs)研究现状[J]. *广州化工*, 2011, 39(18):4-7.
- [21] 黄玲, 张正斌, 崔玉亭, 等. 小麦叶片蜡质含量与水分利用率和产量的关系[J]. *麦类作物学报*, 2003, 23(3):41-44.
- [22] 王赞红, 李纪标. 城市街道常绿灌木植物叶片滞尘能力及滞尘颗粒物形态[J]. *生态环境*, 2006, 15(2):327-330.
- [23] 聂蕾, 邓志华, 陈奇伯. 城市森林对大气颗粒物净化效果研究[J]. *西部林业科学*, 2016(5):119-123.
- [24] 李桂云. 典型有机污染物在植物角质层上的吸附行为与跨膜过程[D]. 杭州: 浙江大学, 2011:1-130.
- [25] 包贞, 潘志彦, 杨晔, 等. 环境中多环芳烃的分布及降解[J]. *浙江工业大学学报*, 2003, 31(5):528-533.
- [26] 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.
- [27] Simonich S L, Hites R A. Vegetation-atmosphere partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Environmental Science & Technology*, 1994, 28(5):939-943.
- [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.
- [29] 石婕, 刘庆倩, 安海龙, 等. 不同污染程度下毛白杨叶表面 PM_{2.5} 颗粒的数量及性质和叶片气孔形态的比较研究[J]. *生态学报*, 2015, 35(22):7522-7530.
- [30] 张伟伟, 宋崇林, 吕刚, 等. 柴油机排放多环芳香烃气/颗粒相分配研究[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(10):2315-2320.
- [31] 董瑞斌, 许东风, 刘雷, 等. 多环芳烃在环境中的行为[J]. *环境与开发*, 1999, 14(4):10-11, 45.
- [32] 刘营, 刘敏, 杨毅, 等. 上海市中心城区樟树叶片中多环芳烃的分布及来源辨析[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(7):1855-1862.
- [33] Bi X H, Sheng G Y, Tan J H, et al. Phase partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the atmosphere[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(1):101-106.
- [34] Cornejo J J, Muñoz F G, Ma C Y, et al. Studies on the decontamination of air by plants[J]. *Ecotoxicology*, 1999, 8(4):311-320.