高校攀缘植物大气多环芳烃监测与生态风险评估*

吕晓倩 李 敏 王子寒 汪瑞军

合肥工业大学建筑与艺术学院 合肥 230601

摘要:【目的】为高校及城市绿地植物的科学选配与空间优化提供依据,并为构建基于植物的大气污染生物监测与生态风险预警体系提供理论支持和实践参考。【方法】以南京市的东南大学四牌楼校区(WEU)、南京林业大学新庄校区(NJFU)和南京大学仙林校区(NJU)为研究区域,选取 7 种常见攀缘植物为研究对象,系统分析其叶片中 PAHs 的含量、组分特征、来源判别及健康风险评估。【结果】不同植物种类在多环芳烃(PAHs)的富集能力及组分选择性上表现出显著差异,7 种攀缘植物叶片中 PAHs 总含量为 958.47~1 734.14 ng·g^{-1}(干重),其中地锦和常春藤的富集能力显著高于其他物种。不同校园 PAHs 污染程度的差异主要受交通排放和餐饮源影响,NJFU 采样点植物叶片中 PAHs 含量普遍高于 WEU 和 NJU。7 种攀缘植物叶片中环(3 环和 4 环)PAHs 为主要成分,其次为高环,轻环含量最低。植物叶片中 PAHs 主要来自石油类产品的不完全燃烧和柴油燃料混合源。BaA 和 BbF 是对致癌性贡献最大的 PAHs 单体。尽管通过呼吸暴露途径的风险较低,但皮肤接触和摄食途径可能对人体,尤其是成年人群构成一定的致癌风险,女性相较男性对 PAHs 更为敏感。【结论】揭示了攀缘植物叶片对 PAHs 的物种选择性富集规律与源解析机制,验证了其在大气污染生物监测与健康风险评估中的应用潜力:植物种类是影响大气有机污染物沉积和分布的重要因素;人为源排放在校园环境大气污染形成中具有主导作用;高校典型大气污染主要来自石油类产品的不完全燃烧和柴油燃料混合源;经由摄食和皮肤接触的暴露途径不可忽视。

关键词:高校绿色空间;攀缘植物;多环芳烃;组分特征;累积特征;源解析

DOI:10.12169/zgcsly.2025.07.25.0002

Monitoring and Ecological Risk Assessment of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Using College Campus Climbers

Lyu Xiaoqian Li Min Wang Zihan Wang Ruijun

(College of Architecture and Art, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract:【Objective】This study aims to explore the ecological functions and application potential of climbing plants in urban air pollution monitoring and prevention.【Method】Using the Sipailou Campus of Southeast University (WEU), the XinZhuang Campus of Nanjing Forestry University (NJFU), and the Xianlin Campus of Nanjing University (NJU) in Nanjing as the study area, seven common climbing plant species were selected as research objects. The content, composition characteristics, source identification, and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in their leaves were systematically analyzed.【Result】The total PAH content in the leaves of the seven climbing plant species ranged from 958.47 to 1 734.14 ng·g^{-1} (dry weight). The enrichment capacity of Parthenocissus tricuspidata and Hedera helix was higher than that of other species. In terms of spatial distribution, the PAH content in plant leaves at the NJFU sampling site was generally higher than that at WEU and NJU, indicating that traffic

收稿日期:2025-07-25

* 基金项目:安徽省哲学社会科学规划项目(AHSKQ2021D146)

第一作者:吕晓倩(1987-),女,博士,副教授,研究方向为风景园林规划设计及理论、城乡风貌与环境设计、城市绿地生态。E-mail:eva_ lyu@ qq. com

通信作者:汪瑞军(1986-),男,博士,讲师,研究方向为风景园林规划设计及理论、城乡风貌与环境设计、城市绿地生态。E-mail:ruijun1986@ outlook. com

density and the intensity of human activities have a prominent impact on their enrichment levels. Component analysis showed that medium-ring (3-ring and 4-ring) PAHs were the main components, followed by high-ring PAHs, while light-ring PAHs had the lowest content. Source identification results revealed that PAHs mainly originated from the incomplete combustion of petroleum products and mixed sources of diesel fuel sources. Through toxic equivalent quantity (TEQ) calculation, it was found that BaA (Benzo (a) anthracene), and benzo [b] fluoranthene (BbF) were the PAH monomers that contributed the most to carcinogenicity. Health risk assessment indicated that although the risk via respiratory exposure was low, dermal contact and ingestion might pose a certain carcinogenic risk to humans, especially adults. Additionally, females were more sensitive to PAHs than males.【Conclusion】This study reveals the species-specific enrichment patterns and source apportionment mechanisms of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the leaves of climbing plants, demonstrating their potential for biomonitoring atmospheric pollution and assessing health risks. Plant species were identified as a critical factor influencing the deposition and distribution of atmospheric organic pollutants. Anthropogenic emissions were found to play a dominant role in atmospheric pollution within campus environments. Typical atmospheric pollutants in university settings primarily originate from the incomplete combustion of petroleum-based products and mixed diesel fuel sources. Exposure pathways via ingestion and dermal contact were also identified as significant and should not be overlooked.

Keywords: university green space; climbing plant; polycyclic aromatic hydrocarbon; component characteristics; accumulation characteristics; source analysis

随着城市化进程的不断加快，城市环境污染问题日益凸显，其中大气颗粒物污染尤为严重。作为大气颗粒物中的重要组成部分，多环芳烃（Polycyclic Aromatic Hydrocarbons，PAHs）因其广泛存在、高稳定性和“三致”效应（致癌、致畸和致突变）而受到广泛关注[1]。PAHs 主要来源于煤炭、石油等化石燃料的不完全燃烧过程，也可由机动车尾气、工业排放、餐饮油烟以及垃圾焚烧等途径进入大气环境[2-3]。由于其疏水性和难降解性，PAHs 易吸附在大气颗粒物表面并通过沉降作用累积在环境介质中，从而对城市居民健康构成潜在威胁。研究显示，长期暴露于 PAHs 污染环境中可能引发呼吸系统疾病、皮肤病以及多种癌症，对儿童和女性群体尤其敏感[4]。因此，如何开展高效、低成本的城市 PAHs 监测已成为生态环境保护和城市可持续发展的重要课题。

传统大气污染监测通常依赖仪器采样和实验室分析，虽能提供准确数据，但存在费用高、覆盖面有限和实时性不足等问题。近年来，利用植物叶片作为大气污染的生物监测工具受到广泛关注[5-6]。植物叶片表面面积大、结构复杂，可通过静电吸附、气孔吸收及角质层富集等方式捕获空气中的颗粒物及吸附的有机污染物，从而在一定程度上反映周边空气污染水平。与传统监测手段相比，植物生物监测方法具有成本低、覆盖广和长期积累特征明显等优势，尤其适用于对城市局部污染状况和空间差异的评估。

在众多城市绿化植物中，攀缘植物因具垂直扩展能力、较高叶面积指数和多样叶片形态（如粗糙表面、绒毛或蜡质层）特点，在有限空间中可实现立体增绿，并表现出显著颗粒物与 PAHs 富集潜力[7-8]。研究表明，叶片微观结构（气孔密度、角质层厚度、毛状体分布等）及环境因子（交通强度、餐饮分布、气象条件等）共同影响植物对 PAHs 的富集效率[9-10]。

目前关于攀缘植物叶片对大气 PAHs 的富集特征及其健康风险效应的研究仍然有限。已有工作多集中于乔木或灌木，对高校蓝绿空间中的攀缘植物关注不足。同时，现有研究大多基于单季节或单时间点，缺乏系统性分析，结果在空间代表性和时间解释力上均存在不足。对于城市校园而言，蓝绿空间不仅是生态基础设施的重要组成部分，也是学生和居民日常学习与活动的主要场所，其空气质量直接关系到校园生态安全与公众健康。因此，亟需针对校园环境开展系统研究，评估攀缘植物在 PAHs 富集、来源解析及健康风险方面的生态功能。

基于此，本研究以南京市 3 所高校为例，选取 7 种常见攀缘植物，分析其叶片 PAHs 含量、

组分特征与空间分布，评估健康风险，并利用诊断比率法解析污染物来源，探讨叶片微观结构对富集能力的影响，反思单次采样局限，展望未来研究方向。本研究重点关注以下问题：1）不同攀缘植物富集 PAHs 的能力差异；2）高校环境中 PAHs 的来源结构与健康风险水平；3）植物叶片形态与 PAHs 富集之间的潜在机制。

1 材料与方法

1.1 样品采集

为了比较不同环境下攀缘植物叶片 PAHs 富集能力，选取相对一致、树龄等生长状况基本处于同一水平的树种，所选择的攀缘植物物种涵盖了一系列的树形、景观应用、生长条件和叶片特征。通过对南京市攀缘植物现状进行实地调查，确定地锦、凌霄、七姊妹、木通、常春藤、五叶地锦和油麻藤 7 种攀缘植物为研究树种（表 1）。选取东南大学四牌楼校区（WEU）、南京林业大学新庄校区（NJFU）和南京大学仙林校区（NJU）作为研究样地。于 2021 年 7 月开展攀缘植物叶片样品的采集工作，所有样品采集均在 1 d 内完成。挑选的植物生长状况良好，叶片茂盛且无虫害，树龄为 25～30 年。对于每个树种，选择 3 棵攀缘树，根据植物结构，用修剪器在墙的 4 个方向（东、南、西、北）和离地 1.0～2.5 m 的 4 个方向（上、下、左、右）随机采集叶片。叶片样品带回实验室用去离子水冲刷数次，叶片表面无灰尘颗粒物后放入自封袋中。

表 1 攀缘植物叶片微形态结构特征

学名	拉丁名	气孔密度（相对水平）	毛被/绒毛特征	蜡质层特征	备注(富集潜力)
地锦	*Euphorbia humifusa*	中等—较高	表面粗糙,少量绒毛	蜡质层发达	颗粒物截留能力较强
凌霄	*Campsis grandiflora*	中等	叶片表面少毛	蜡质层一般	适中
七姊妹	*Rosa iflora*	中等	叶片具稀疏毛被	蜡质层较弱	对颗粒物有一定吸附
木通	*Akebia quinata*	偏低—中等	叶片表面光滑	蜡质层中等	富集潜力一般
常春藤	*Hedera nepalensis*	中等—较高	表面少毛,叶质厚	蜡质层发达	常绿,长期积累能力强
五叶地锦	*Parthenocissus quinquefoliai*	中等	叶片粗糙,有绒毛	蜡质层较发达	颗粒物吸附能力较强
油麻藤	*Mucuna sempervirens*	中等—偏高	幼叶表面稀疏短绒毛,成熟叶片仅叶脉少量绒毛	蜡质层中等发达	对颗粒物有中等富集潜力

1.2 样品前处理及分析

称取 2.0 g 植物样品在索氏提取器中提取至少 18 h，溶剂为丙酮和二氯甲烷（1/3，v/v）[8]。使用旋转蒸发仪将所得提取液旋转浓缩到 2 mL 左右，再利用 1 cm 的玻璃层析柱净化，并用 60 mL 体积比为 1∶1 的正己烷和二氯甲烷混合溶液对层析柱进行洗脱。净化液和洗脱液混合后使用旋转蒸发仪旋转蒸法至干，甲醇溶液并定容至 2 mL，然后通过 0.22 μm 有机滤膜，避光保存于棕色色谱瓶后待测。采用高效液相色谱法（HPLC）对样品 PAHs 进行测定。

1.3 质量控制与质量保证

方法空白无 PAHs 检出，16 种 PAHs 的回收率为 72.12%～93.32%，满足环境样品中 PAHs 浓度测定的检测要求。

1.4 PAHs 毒性当量

利用毒性当量因子（TEFs）计算叶片 PAHs 的毒性当量（TEQ），TEFs 越大则 PAHs 的致癌毒性越弱[11]。

1.5 致癌风险评估

根据美国环保局的标准模型对叶片 PAHs 产生终生致癌风险（ILCRs）进行评价，3 种暴露风险模型（摄入 Ingestion、吸入 Inhalation 和皮肤接触 Dermal）的 ILCRs 模型分别为：

$$ILCRs_{Ingestion} = (CS \times (CSF_{Ingestion} \times \sqrt[3]{BW/70}) \times IR_{soil} \times EF \times ED) / (BW \times AT \times 10^6) \quad (1)$$

$$ILCRs_{Dermal} = (CS \times (CSF_{Dermal} \times \sqrt[3]{BW/70} \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED) / (BW \times AT \times 10^6) \quad (2)$$

$$ILCRs_{Inhalation} = (CS \times (CSF_{Inhalation} \times \sqrt[3]{BW/70}) \times I_{Rair} \times EF \times ED) / (BW \times AT \times PEF) \quad (3)$$

$$ILCRs = ILCRs_{Ingestion} + ILCRs_{Dermal} + ILCRs_{Inhalation} \quad (4)$$

式(1)～(3)中：*CS* 为总 TEQ_{Bap} 值（$ng \cdot g^{-1}$）；*CSF* 为致癌斜率因子（$mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$）；不同年龄段人群划分为儿童（0～10 岁）、青少年（11～

18 岁）、成年人（19～70 岁），*BW* 指平均体重（kg）；*AT* 为人均寿命（a）；*EF* 指暴露频率（$d \cdot a^{-1}$）；*ED* 指暴露年数（a）；*AF* 为叶片吸附因子（$mg \cdot cm^{-2}$）；*ABS* 为皮肤吸附系数；*PEF* 为叶片形成系数（$m^3 \cdot kg^{-1}$）[12]；致癌斜率因子的确定是基于每种 PAHs 的致癌能力，$CSF_{Ingestion}$、CSF_{Dermal}、$CSF_{Inhalation}$ 分别为 7.3、3.85 和 25 $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$[13]。

1.6　数据处理

采用 Origin 9.0 和 SPSS 19.0 对不同研究样地、不同品种攀缘植物叶片中 PAHs 含量进行单因素方差分析，本研究所有数据均以平均值±标准差表示。

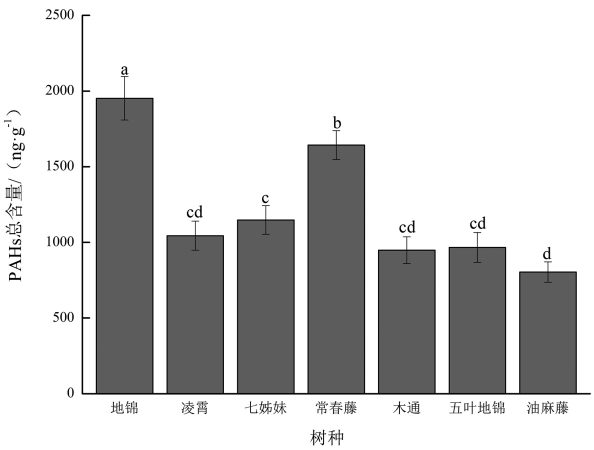
2　结果与分析

2.1　攀缘植物叶片 PAHs 含量的种类特征

图 1 显示，7 种攀缘植物叶片中 PAHs 总含量为 958.47～1 734.14 $ng \cdot g^{-1}$（干重），其中，地锦叶片中 PAHs 总含量显著（$P<0.05$）高于其他树种，其总含量是七姊妹的 1.81 倍；常春藤叶片 PAHs 含量显著（$P<0.05$）高于凌霄、七姊妹、木通、五叶地锦和油麻藤；七姊妹叶片 PAHs 含量显著（$P<0.05$）高于油麻藤、凌霄、木通和五叶地锦；木通和五叶地棉叶片中 PAHs 总含量无显著差异（$P>0.05$）。

2.2　攀援植物叶片 PAHs 含量的空间特征

如表 2 所示，南京林业大学（NJFU）五叶地锦叶片中 PAHs 总含量显著（$P<0.05$）高于东南大学四牌楼校区（WEU）和南京大学仙林校区（NJU）。NJFU 中七姊妹、常春藤、木通、五叶地锦和油麻藤叶片轻环 PAHs 含量显著（$P<0.05$）高于 WEU 和 NJU，NJFU 木通和油麻藤叶片中环 PAHs 含量显著（$P<0.05$）高于 WEU 和 NJU，NJFU 五叶地锦叶片高环 PAHs 显著（$P<0.05$）高于 WEU 和 NJU。总体上，NJFU7 种攀缘植物叶片中总 PAHs 含量、轻环和中环 PAHs 含量显著（$P<0.05$）高于 WEU 和 NJU，这可能与 NJFU 紧邻城市主干道和新庄立交高架有关。综上，不同校园 PAHs 污染程度的差异主要受交通排放和餐饮源影响，表明城市功能区差异对植物 PAHs 富集具有一定影响。



注：不同小写字母表示在 0.05 水平上存在显著性差异，下同。

图 1　7 种攀缘植物叶片 PAHs 总含量

表 2　南京高校不同树种攀缘植物 PAHs 含量　　$ng \cdot g^{-1}$

PAHs	地点	地锦	凌霄	七姊妹	常春藤	木通	五叶地锦	油麻藤	均值
总量	NJFU	2145.31±65.61a	1163.56±34.47a	1246.3±43.62a	1766.26±30.09a	1089.64±50.84a	1167.96±33.64a	879.74±38.75a	1522.68±69.42a
	WEU	1946.25±31.44ab	1205.48±32.85a	1176.56±37.94a	1487.69±26.77b	897.47±37.75a	847.35±40.63b	779.9±20.74b	1191.53±46.77b
	NJU	1845.99±28.96ab	804.67±28.081b	946.94±31.09ab	1688.74±30.08a	926.68±41.84a	975.85±38.63b	915.79±28.74a	986.38±35.34c
轻环	NJFU	546.76±20.06a	267.55±27.65b	312.65±10.94a	409.84±27.83a	276.45±20.83a	309.55±20.74a	178.63±20.85a	328.78±26.731a
	WEU	487.05±17.75ab	309.81±18.68a	288.54±12.36b	321.82±25.97b	216.53±19.63b	217.49±20.73b	109.5±11.75b	278.68±24.531b
	NJU	507.69±33.52a	276.86±21.17b	288.59±13.37b	349.75±23.88b	175.57±18.36c	209.11±17.631b	89.77±15.75bc	271.05±27.45b
中环	NJFU	220.46±17.631b	297.04±27.84a	155.44±7.54c	321.86±10.86a	345.77±20.85a	159.68±21.75b	133.73±10.65a	404.85±42.86a
	WEU	260.65±421.84b	110.69±16.71b	200.93±10.071a	289.03±15.75ab	175.31±16.94c	154.09±18.741b	81.36±12.74b	181.72±20.06b
	NJU	348.87±26.53a	69.76±8.45c	170.36±6.07b	169.42±18.64c	216.87±20.05b	277.71±17.17a	77.75±14.86b	198.68±21.751b
高环	NJFU	1378.09±55.31a	598.97±21.85ab	778.2±37.84a	1034.56±50.06a	467.42±27.85b	698.73±35.55a	567.3±20.85b	789.05±48.57a
	WEU	1198.55±48.42a	784.98±36.63a	687.09±47.84a	876.84±42.74ab	505.63±40.04a	475.77±20.96b	589.0±33.75b	731.12±36.771a
	NJU	989.43±43.53b	658.05±35.83a	487.99±28.93b	969.57±48.73a	534.24±41.161a	489.03±18.66b	748.27±46.88a	696.65±26.71b

注：表中数据均为平均值±标准差；不同小写字母表示该树种的该指标在 0.05 水平上差异显著。

2.3 南京高校攀缘植物叶片 PAHs 组分特征

由图 2 可知，7 种攀缘植物叶片中环（3 环和 4 环）为叶片中 PAHs 的主要成分，其次为高环，最低为轻环。其中，地锦叶片中环和高环 PAHs 含量显著（$P<0.05$）高于其他树种，常春藤叶片轻环 PAHs 含量显著（$P<0.05$）高于除地锦以外的其他树种。

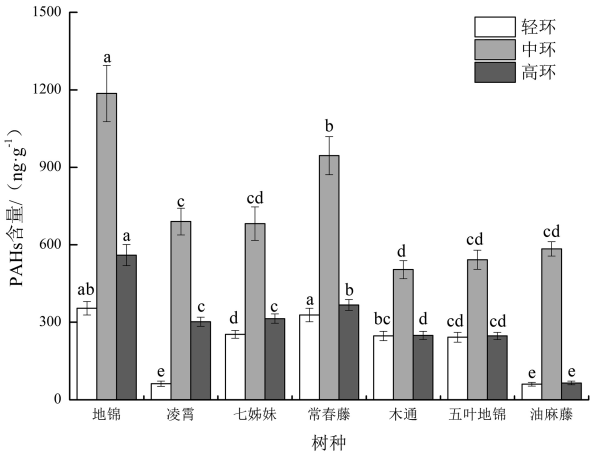
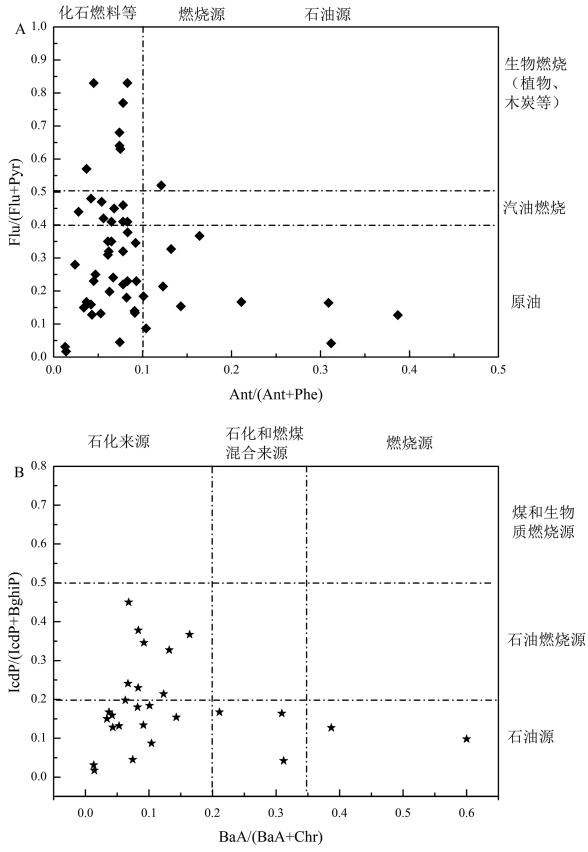


图 2 7 种攀缘植物叶片中不同环数 PAHs 含量占比

2.4 南京高校攀缘植物叶片 PAHs 溯源分析

由图 3A 可知：Flu/（Flu+Pyr）绝大多数比值小于 0.5，表明叶片中 PAHs 是石油源和液体燃料的混合来源；Ant/（Ant+Phe）绝大多数比值小于 0.1，表明叶片中 PAHs 主要来源于石油类产品与燃烧源；BaA/（BaA+Chr）绝大多数比值小于 0.2，说明其主要来源于石油源；IcdP/（IcdP+BghiP）绝大多数比值小于 0.2，说明柴油燃烧源是南京高校区攀缘植物叶片中 PAHs 的主要来源（图 3B）。



注：Ant/（Ant+Phe）区分石油源与燃烧源，< 0.1（石油源）；> 0.1（燃烧源）；BaA/（BaA+Chr）区分石油源与燃烧源、< 0.2（石油源）；0.2~0.35（混合）；> 0.35（燃烧源）；IcdP/（IcdP+BghiP）在燃烧源内区分汽油/煤燃烧与柴油燃烧、< 0.5（柴油燃烧）；> 0.5（汽油/煤燃烧）；Flu/（Flu+Pyr）区分石油源、液体燃料燃烧和固体燃料燃烧，< 0.4（石油源）；0.4~0.5（液体燃料）；> 0.5（煤炭/生物质燃烧）。

图 3 南京高校区攀缘植物叶片中 PAHs 诊断比率

2.5 南京高校攀缘植物叶片 PAHs 毒性当量评估

由于许多 PAHs 具有致突变或致癌特性，美国环境保护署将 16 种 PAHs 列为优先污染物[14]。南京高校常见的 7 种攀缘植物叶片在富集多环芳烃（PAHs）方面表现出明显差异，尤其是 7 种致癌性 PAHs（BaA、Chr、BbF、BkF、BaP、DEP、IcdP）的组成比例存在一定的植物种间差异（图 4）。从总体上看，除油麻藤之外，其余 6 种植物叶片中 PAHs 毒性当量的贡献主要集中在 BbF 和 BaA 组分，7 种植物叶片中 DEP 组分所占比例最低，但其高毒性特征不容忽视。具体而言，地锦、凌霄、常春藤和木通叶片中 BaA 所占比例最高，揭示其对颗粒相 PAHs 均有较强吸附潜力。七姊妹和五叶地锦叶片中 BbF 组分所占比例最高，说

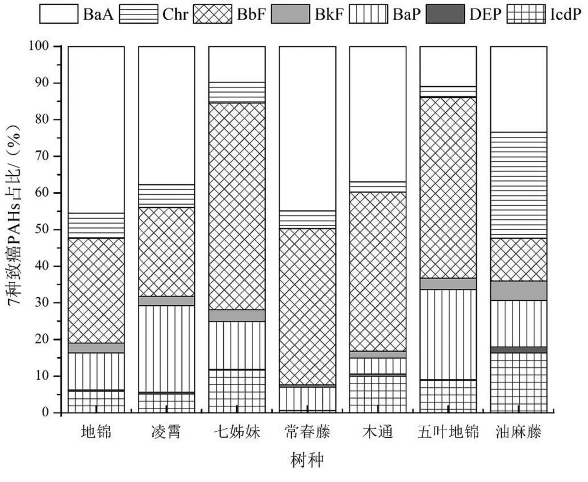


图 4 7 种攀缘植物叶片 PAHs 毒性当量评估

明其在大气颗粒物滞留与致癌 PAHs 累积方面具有较强的能力。油麻藤叶片中 Chr 比例最高。

2.6　南京高校区攀缘植物叶片中 PAHs 健康风险评价

研究表明，当 ILCRs 值为 10^{-4}～10^{-6}，说明存在一定的健康风险，大于 10^{-4}时说明存在较高的致癌风险[15]。由图 5 可知，南京高校不同年龄段人群由呼吸产生 ILCRs 值范围在 10^{-14}～10^{-11}，远低于致癌风险阈值 10^{-6}，说明通过摄入途径未对人群健康产生致癌风险。由呼吸和皮肤接触产生的致癌风险范围为 10^{-9}～10^{-5}，说明存在一定的健康风险。总体上，不同年龄段群体的总 ILCRs 值均表现出成人>儿童>青少年，其中通过摄入途径的女性（儿童、青少年、成人）对 PAHs 污染的反应较男性更为敏感；通过皮肤接触的女性（青少年、成人）对 PAHs 污染的反应较男性更为敏感。南京高校群体中以成年人为主，说明 3 种暴露途径对成年人的影响较大。不同接触方式对不同年龄段群体的影响也不同，通过皮肤接触的暴露途径表现为成人>青少年>儿童，表明成年人暴露在有机污染物的时间最长。

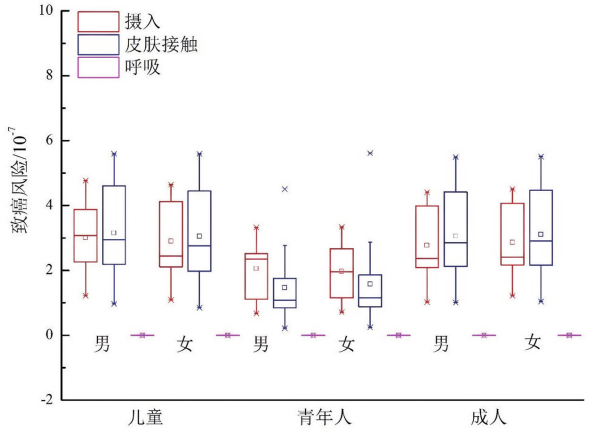


图 5　南京高校攀缘植物叶片 PAHs 的终生致癌风险

2.7　植物叶片微形态与 PAHs 污染监测的关联及 PAHs 来源多元判别

根据诊断比率法，南京高校区攀缘植物叶片中的 PAHs 主要来源于石油及其燃烧过程，同时伴随石油产品不完全燃烧的贡献，呈现出典型的混合来源特征。这与高校区周边常见污染源相符，如交通尾气排放、供暖燃料燃烧及餐饮油烟等。不同指标的综合判别结果（Flu/（Flu + Pyr）、Ant/（Ant+Phe）、BaA/（BaA+Chr））进一步印证了石油燃烧源在该区域的主导作用，IcdP/（IcdP + BghiP）主要来源于柴油源，同时提示存在一定的多元来源叠加效应。

值得注意的是，叶片的微形态结构在 PAHs 的吸收与滞留中发挥了重要作用。气孔密度、表皮蜡质层厚度和毛被发育程度等特征共同决定了植物对气态和颗粒态 PAHs 的富集效率。例如，地锦和常春藤叶片蜡质层较厚、表面粗糙，更易捕获颗粒结合态 PAHs；而气孔密度较高的物种则更敏感于气态 PAHs 的沉积。这种结构差异不仅解释了不同植物间的 PAHs 富集差异，也提示攀缘植物在空气污染监测中的功能具有“选择性”。

由此可见，南京高校区的攀缘植物并非仅是 PAHs 的被动累积者，而是能够结合其叶片结构特征，反映 PAHs 来源差异的潜在生物监测器。通过“叶片结构—污染物累积机制”的结合分析，可以更全面地理解高校区空气污染的多元来源，并为未来选择合适的植物材料开展环境监测提供依据。

3　讨论

3.1　南京高校攀缘植物 PAHs 污染水平、组分特征及富集差异

本研究显示，南京市高校区 7 种攀缘植物叶片 PAHs 总含量（958.47～1 734.14 ng · g^{-1}）高于上海樟树叶片（199.14～488.77 ng · g^{-1}）[16]，低于巴西圣保罗州库巴坦地区番石榴（均值为 1 754 ng · g^{-1}）[17]和意大利那不勒斯冬青（106.6～4 607.5 ng · g^{-1}）[18]，表明南京高校区 PAHs 污染处于中等水平。地锦和常春藤叶片 PAHs 含量显著（P<0.05）高于其他植物，可能与叶片特征（叶蜡含量、气孔密度）有关[10]；七姊妹含量高于油麻藤等，可能因其攀附墙面更易富集交通源 PAHs[19]。与乔木（如樟树）相比，攀缘植物因贴近污染源（如墙体、地面）可能更敏感反映局部 PAHs 输入，建议作为城市大气污染的指示物种。未来需结合 PAHs 组分特征及污染源解析，进一步探讨植物富集机制。

田璐[20]研究发现，中环和高环为植物叶片 PAHs 主要成分；广州白云阔叶植物叶片中 3、4 环含量最高，2 环含量较低[21]。以上均与本研究

规律一致，原因可能是植物叶片 PAHs 主要来自大气 PAHs 的吸收。低环 PAHs 具有易挥发和降解的特性，由于夏季高温，攀缘植物叶片低环 PAHs 通过气孔挥发到大气中，因此 7 种攀缘植物叶片中 2 环 PAHs 含量最低。尚娜娜等[10]研究发现，合芜池 3 市樟树叶片中以中低环为主，高环 PAHs 所占比例较低，与本研究结果不一致，可能是由于研究区域 PAHs 各组分在大气中所占不同有关。本研究发现，7 种攀缘植物叶片中 PAHs 以中环（3~4 环）为主要成分，占总量的 52.3%~68.7%，这一分布特征与植物对大气 PAHs 的吸收机制密切相关。地锦叶片表现出对中环和高环 PAHs 的特殊富集能力，其含量显著（$P<0.05$）高于其他树种，这可能与其叶片表面蜡质层厚度和吸附作用有关，这些特性有利于吸附颗粒中的中高分子量 PAHs[22]。低分子量 PAHs 具有较高的挥发性，易叶片富集[8]。常春藤叶片轻环 PAHs 含量显著偏高，可能与其气孔吸收过程对低分子量 PAHs 的选择性富集有关，这与李军等[23]的结论一致；但不同树种间的显著差异表明，除环境浓度外，植物形态和生理特征也是影响 PAHs 富集的重要因素。建议未来研究结合叶片微观结构和生理参数，深入探讨不同攀缘植物对 PAHs 的选择性富集机制。

3.2 PAHs 来源解析与周边环境特征

Flu/（Flu+Pyr）比值小于 0.5，表明存在石油和液体燃料的混合来源，这与城市环境中交通排放和工业活动的复合污染特征相符[24]。Ant/（Ant+Phe）比值（<0.1）和 BaA/（BaA+Chr）比值（<0.2）的分布特征进一步证实石油类燃烧源的主导地位，可能主要来自机动车尾气排放[25]。值得注意的是，IcdP/（IcdP+BghiP）比值小于 0.2，说明 PAHs 污染主要来源于柴油发动机的燃烧，也表明该研究区域的大气/土壤/沉积物中，柴油燃烧贡献了绝大部分的致癌风险的高分子量 PAHs，这可能与当地活跃的柴油车交通、工业或建筑机械密切相关[26]，研究结果与南京高校区的实际环境特征具有良好的一致性。BaA/（BaA+Chr）绝大多数比值小于 0.2，说明其主要来源于石油源，特别是 NJFU 校区紧邻城市主干道和新庄立交，持续的机动车尾气排放可能导致石油类燃烧产物的持续输入。同时，WEU 校区周边密集的餐饮活动可能贡献了部分燃烧源 PAHs[27]。不同校区植物叶片 PAHs 来源特征的差异，反映了城市不同功能区污染源分布的异质性。

机动车尾气排放是城市 PAHs 的重要来源[28]，而 NJFU 周边车流量大，导致植物叶片中 PAHs（尤其是高环组分）富集量较高。WEU 虽无大型工业排放源，但餐饮业密集，高温烹饪产生的油烟含大量 PAHs[29]，这可能是其轻环和中环 PAHs 含量较高的原因之一。NJU 位于车流量较低的仙林高教园区，污染源较少，因此 PAHs 富集水平最低。未来研究可结合 PAHs 组分特征（如 IND/BghiP 比值）进一步解析具体污染源贡献。

3.3 致癌性贡献组分及环境健康启示

BaA、Chr、BbF、BkF、BaP、DEP 和 IcdP 作为主要致癌贡献组分，其优势地位与全球城市环境 PAHs 污染特征一致[30]。值得注意的是，BaA 的高贡献比例（35.35%）可能反映了特定污染源特征，因为 BaA 主要来源于高温燃烧过程（如机动车排放）[31]。研究结果具有重要的环境健康启示：BaP 作为传统指标污染物，其 TEQ 占比证实了其在风险评估中的核心地位[32]。BaA 的高贡献提示我们在未来环境监测中需要加强对这类高毒性但常被忽视的 PAHs 同系物的关注[33]。此外，不同攀缘植物 TEQ 的显著差异（如地锦最高）表明植物选择对降低城市环境健康风险具有实际意义。

3.4 暴露途径与人群健康风险差异

综上，呼吸途径的风险可忽略不计，这与 PAHs 主要吸附在颗粒物上的特性有关[34]。然而，对于成年人群，皮肤接触途径的风险值得关注，这可能与其在校园环境中活动时间较长、皮肤暴露面积较大有关[35]。儿童通过摄食途径的较高风险，可能源于其手-口接触频率较高的行为特征[36]，这一发现与儿童环境健康研究领域的普遍认识一致。值得注意的是，研究结果显示女性对 PAHs 污染更为敏感，这可能与生理代谢差异和皮肤渗透性等因素有关[35]。虽然总体风险值低于重大健康风险阈值，但考虑到 PAHs 的累积效应和长期暴露可能性，仍需保持警惕。特别值得注意的是，风险评估中采用的毒性当量因子可能低

估了某些 PAHs 同系物的实际毒性[37]，这意味着实际风险可能被低估。

3.5　叶片微形态特征对不同物种 PAHs 及颗粒物富集水平的影响机制

在不同物种 PAHs 富集水平差异中，叶片微形态特征可能是重要影响因素。例如，地锦和常春藤叶片角质层厚、具明显蜡质覆盖，且气孔多分布于下表皮，能够增强对半挥发性有机物的吸附与滞留[38]。常春藤常绿特性也使其具有长期累积优势。相较之下，凌霄和七姊妹叶片气孔密度较高（约 25~30 个/mm^2），下表皮具多细胞腺毛或单细胞柔毛，有利于颗粒物的机械截留和快速交换，但也可能因叶片更新较快而降低长期富集量[39]。木通叶片结构较为简单，气孔密度低（约 15 个/mm^2），蜡质层发育一般，仅偶见星状毛[40]，这与本研究表现的低富集水平相一致。油麻藤叶片则具明显的多细胞腺毛和厚角质层，下表皮气孔深陷[41]，这有助于增强对颗粒物的吸附。

4　结论

南京市 3 所高校校园 7 种常见攀缘植物在 PAHs 的吸收、富集及组分选择性上存在显著差异，其中地锦和常春藤表现出更强的富集能力，说明植物种类是影响大气有机污染物沉积和分布的重要因素。同时，校园间的差异主要受交通排放和餐饮活动影响，提示人为源排放在校园环境大气污染形成中具有主导作用。在组分特征上，3 环和 4 环 PAHs 是主要成分，且来源解析显示石油类产品的不完全燃烧和柴油燃料混合源是主要贡献者，揭示了城市高校典型大气污染的来源特征。健康风险评估进一步指出，尽管呼吸途径的风险相对较低，但皮肤接触和摄食途径对成年人尤其是女性人群可能构成潜在的致癌威胁，BaA 和 BbF 是主要致癌单体，对人群健康应予以重点关注。

未来研究可进一步结合植物叶片微形态特征与 PAHs 吸附机制，深入探索不同植物在城市生态环境治理中的功能差异，为城市空气质量改善和健康风险防控提供更加精准和可持续的策略。

参考文献

[1] LIU C Y, HUANG Z F, QADEER A, et al. The sediment-water diffusion and risk assessment of PAHs indifferent types of drinking water sources in the Yangtze River Delta, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 309: 127456.

[2] WANG C H, WU S H, ZHOU S L, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from urban to rural areas in Nanjing: Concentration, source, spatial distribution, and potential human health risk[J]. Science of The Total Environment, 2015, 527: 375-383.

[3] 陆烨. 餐饮油烟对大气污染的影响与应对[J]. 资源节约与环保, 2019(7): 2.

[4] 段小倩, 程子茜, 杜雨峰, 等. 妊娠期多环芳烃暴露对妊娠结局及儿童早期发展影响的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2018, 35(12): 1104-1108.

[5] DE NICOLA F, CLAUDIA L, MARIAVITTORIA P, et al. Biomonitoring of PAHs by using Quercus ilex leaves: Source diagnostic and toxicity assessment[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(7): 1428-1433.

[6] ZHA Y, LIU X, TANG J, et al. PAHs in foliage dust of typical tree specieswith urbanization gradient in Nanjing, China[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 27(3): 1359-1370.

[7] 胡海燕, 娄钢. 藤本植物立体绿化[J]. 陕西林业科技, 2005(2): 32-34.

[8] 王晋峰, 李嘉, 蔡军, 等. 叶片绒毛和气孔对冬小麦叶面吸收多环芳烃的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(1): 31-39.

[9] TRAPP S. Modelling uptake into roots and subsequent translocation of neutral and ionisable organic compounds[J]. Pest Management Science, 2000, 56(9): 767-778.

[10] 尚娜娜, 余何愚, 李茂蝶, 等. 城市绿化带樟树叶片 PAHs 富集特征及来源分析[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(8): 91-98.

[11] TSAI P J, SHIH T S, CHEN H L, et al. Assessing and predicting the exposures of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their carcinogenic potencies from vehicle engine exhausts to highway toll station workers[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(2): 333-343.

[12] 王震. 辽宁地区土壤中多环芳烃的污染特征、来源及致癌风险[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.

[13] KNAFLA A, PHILLIPPS K A, BRECHER R W, et al. Development of a dermal cancer slope factor for benzo[a]pyrene[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2006, 45(2): 159-168.

[14] FRANCO C F J, DE RESENDE M F, DE ALMEIDA FURTADO L, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in street dust of Rio de Janeiro and Niterói, Brazil: particle size distribution, sources and cancer risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2017, 599/600: 305-313.

[15]邹子航,陈莲,张培珍,等.广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估[J].环境科学,2024,45(2):1015-1025.

[16]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.

[17]RINALDI M C S,DOMINGOS M,DIAS A P L,et al.Leaves of lolium multiflorum 'Lema' and tropical tree species as biomonitors of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2012,79:139-147.

[18]ALFANI A,MAISTO G,VITTORIA PRATI M,et al.Leaves of quercus ilex L. as biomonitors of PAHs in the air of Naples (Italy)[J]. Atmospheric Environment,2001,35(21):3553-3559.

[19]阿芸,张金青,张海娟,等.植物吸附大气颗粒物的影响因素及响应机制的研究进展[J].应用生态学报,2024,35(7):2013-2024.

[20]田璐.上海市乔木叶片中多环芳烃的积累特征及空间源汇分析[D].上海:上海交通大学,2020.

[21]王晓丽.广州白云山风景区阔叶植物叶片中的多环芳烃[D].广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所),2007.

[22]TIAN L,YIN S,MA Y G,et al.Impact factor assessment of the uptake and accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons by plant leaves: morphological characteristics have the greatest impact[J].Science of the Total Environment,2019,652:1149-1155.

[23]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.

[24]ZHANG Y H,HUANG H J,XIONG G N,et al. Structural equation modeling of PAHs in surrounding environmental media and field yellow carrot in vegetable bases from Northern China: in comparison with field cabbage [J]. Science of the Total Environment,2020,717:137261.

[25]LUO M,JI Y Y,REN Y Q,et al.Characteristics and health risk assessment of PM2.5-bound PAHs during heavy air pollution episodes in winter in urban area of Beijing, China [J]. Atmosphere,2021,12(3):323.

[26]TOBISZEWSKI M,NAMIEŠNIK J.PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources [J]. Environmental Pollution,2012,162:110-119.

[27]王梓鑫,李昊天,朱理想,等.餐饮油烟中多环芳烃排放特征分析[J].当代化工,2023,52(4):830-833.

[28]刘玉,周璐璐.植物叶片吸收汽车尾气多环芳烃的研究[C]//清华大学持久性有机污染物研究中心,环境保护部斯德哥尔摩公约履约办公室,中国环境科学学会持久性有机污染物专业委员会,等.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.中山大学环境科学与工程学院,2008.

[29]朱利中,王静,江斌焕.厨房空气中 PAHs 污染特征及来源初探[J].中国环境科学,2002,22(2):47-50.

[30]HOU W,ZHANG L,LI Y,et al. Distribution and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil from a typical contaminated urban coking sites in Shenyang City[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology,2015,95(6):815-821.

[31]SHEN H Z,HUANG Y,WANG R,et al. Global atmospheric emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons from 1960 to 2008 and future predictions[J].Environmental Science & Technology,2013,47(12):6415-6424.

[32]HABER L T,PECQUET A M,VINCENT M J,et al. The long goodbye:finally moving on from the relative potency approach to a mixtures approach for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)[J]. International Journal Environment Research and Public Health,2022,19(15):9490.

[33]JAOUEN-MADOULET A,ABARNOU A,LE GUELLEC A M,et al. Validation of an analytical procedure for polychlorinated biphenyls, coplanar polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in environmental samples[J].Journal of Chromatography A,2000,886(1/2):153-173.

[34]CHEN B L,JOHNSON E J,CHEFETZ B,et al.Sorption of polar and nonpolar aromatic organic contaminants by plant cuticular materials: role of polarity and accessibility [J]. Environmental Science & Technology,2005,39(16):6138-6146.

[35]LAO J Y,WANG S Q,CHEN Y Q,et al. Dermal exposure to particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from barbecue fume as impacted by physicochemical conditions [J]. Environmental Pollution,2020,260:114080.

[36]MEZA-FIGUEROA D,DE LA O-VILLANUEVA M,DE LA PARRA M L.Heavy metal distribution in dust from elementary schools in Hermosillo, Sonora, México [J]. Atmospheric Environment,2007,41(2):276-288.

[37]GONZÁLEZ-PÉREZ J A,ALMENDROS G,DE LA ROSA J M,et al.Appraisal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in environmental matrices by analytical pyrolysis (Py-GC/MS)[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2014,109:1-8.

[38]袁琨,樊平方,桑量,等.北京篱垣型垂直绿化攀缘植物适宜性评价[J].中国城市林业,2023,21(4):171-177.

[39]阮培均.黔西北中草药[M].广州:中山大学出版社,2022.

[40]谢娇,肖娅萍,李秀华,等.三叶木通叶表面结构的环境扫描电镜观察[J].西北植物学报,2007,27(3):469-473.

[41]吴立明.天然药物学[M].北京:化学工业出版社:2017.