

北京城市道路地表径流及相关介质中多环芳烃的源解析

张巍, 张树才, 万超, 岳大攀, 叶友斌, 胡俊栋, 王开颜, 高艳, 王学军*

(北京大学环境学院地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要:将道路地表径流及降雨、路面积尘和行道树树冠穿透水作为整体系统, 对其中多环芳烃(PAHs)的来源进行分析. 选择北京市 3 种主要类型城市道路(主干路机动车道、主干路自行车道、支路), 于 2006 年雨季对上述 4 类介质进行采样分析. 结果显示, 5~6 月各介质中 PAHs 的平均浓度明显高于 7~8 月. 应用因子分析和多元回归方法解析各介质中 PAHs 的来源. 因子分析结果表明, 径流中的 PAHs 更多体现路面积尘的来源特征, 但在自行车道和支路, 雨水和树冠水的影响也分别得到体现. 多元回归结果表明, 路面积尘和地表径流中 PAHs 的来源, 在支路和主干路机动车道以机动车排放源为主, 在自行车道, 机动车源和燃煤源的贡献相近. 雨水中的 PAHs 以燃煤/燃油源为主, 行道树树冠水中机动车源的贡献较大.

关键词:多环芳烃; 道路地表径流; 路面积尘; 树冠穿透水; 降雨; 源解析

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)06-1478-06

PAH Sources in Road Runoff System in Beijing

ZHANG Wei, ZHANG Shu-cai, WAN Chao, YUE Da-pan, YE You-bin, HU Jun-dong, WANG Kai-yan, GAO Yan, WANG Xue-jun

(Ministry of Education Laboratory of Earth Surface Processes, College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In this study, road runoff, rainwater, ground sediment and roadside tree water samples were collected from three types of roads in Beijing in 2006. The samples were analyzed for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). The average PAH concentrations in each media in May-June were generally higher than those in July-August. Factor analysis indicated that PAHs in road runoff were mainly from ground sediment, and rainwater and roadside tree water also had certain influence to road runoff. Multiple regression analysis indicated that PAHs in ground sediment and road runoff mainly come from vehicular emission at the vehicle way and branch road, and at the bicycle way, the contributions of vehicular emission and coal combustion were equal. PAHs in rain were mainly from coal/oil combustion, and PAHs in roadside tree water were dominated by vehicular emission source.

Key words: PAHs; urban road runoff; ground sediment; tree water; rain; source study

随着城市化进程加快和机动车保有量增加, 城市道路地表径流已成为城市地表水体的一个主要污染源^[1~3]. 研究表明, 道路地表径流中含有重金属、多环芳烃(PAHs)、卤代酚、营养盐等污染物, 其中 PAHs 因其高浓度水平和毒性而得到广泛关注^[4,5]. 城市道路环境中的 PAHs 主要有汽车尾气排放、燃油/机油泄漏、轮胎磨擦和路面磨损等来源^[6,7]. 国内学者近年来在一些城市开展了路面径流水质的监测分析^[8~12], 但鲜见对道路地表径流中有毒有机污染物的研究. 国外对地表径流中 PAHs 来源的研究开展也不多, 主要问题在于地表径流中的污染物来自于路面积尘、雨水、行道树树冠穿透水等多种输入源, 各输入源反映的污染物来源信息在地表径流中重叠. 因此, 地表径流中 PAHs 的源解析结果应与路面积尘、雨水和树冠穿透水等相关介质中 PAHs 的源解析结果进行综合比较, 才能获得相对准确的源信息. 本研究以北京市中关村地区 3 种主要

类型道路的地表径流为对象, 同时采集雨水、行道树冠穿透水和雨前路面积尘样品, 在对这 4 种介质中 PAHs 含量定量分析的基础上, 利用因子分析和多元回归分析方法, 对各介质中 PAHs 的来源进行解析, 并对各介质中 PAHs 的源解析结果进行比较研究.

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据北京市道路分类, 选择成府路和海淀路分别代表城市主干路和支路 2 种道路类型, 共设置 3 个采样点, 分别位于海淀路、成府路的机动车道和成府路的自行车道, 采样点均设在道路雨水井的入口处. 采用便携式自动采样器(CRASP BC-9600, 配超声

收稿日期: 2007-06-27; 修订日期: 2007-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40525003, 40371105); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2003CB415004)

作者简介: 张巍(1977~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为区域环境科学, E-mail: wzhang@pku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: xjwang@urban.pku.edu.cn

波流量计)采集径流水样并同步记录径流量。每场径流采集5~6个样品,样品收集在棕色试剂瓶中。同步采集雨水和树冠穿透水样品,雨水用铝制容器收集,及时转移到棕色瓶中;树冠穿透水在海淀路的行道树下采集,用铝制漏斗收集在棕色瓶中。降雨前在3个采样点附近用真空吸尘器采集路面积尘样品。

2006年雨季共采集6场地表径流和同期雨水样品,各次降雨特征见文献[13]。记录采样期间径流量、降雨强度、降雨量、车流量等辅助参数。

1.2 样品前处理及分析方法

径流、雨水和树冠水样品采集后立即送实验室分析。用预先称重的玻璃纤维滤膜(450℃, 4 h),在蠕动泵过滤装置(Millipore)中进行过滤。滤出液用棕色玻璃瓶收集后进行固相萃取;滤膜用铝箔包裹好放入冷冻干燥仪干燥72 h,在干燥器中恒重后称重;路面积尘样品去除树叶等杂物后称重。

固相萃取柱(Supelco)用10 mL二氯甲烷净化后以6 mL甲醇活化,然后用少量超纯水淋洗。滤出液萃取后,用6 mL二氯甲烷洗脱萃取柱,洗脱液经无水硫酸钠脱水;冷干后的滤膜与无水硫酸钠及少量铜粉一起进行索氏提取(二氯甲烷, 50℃, 16 h)。提取液经旋蒸浓缩后用硅胶/氧化铝复合层析柱净化;积尘样品称重后加入无水硫酸钠进行索氏提取[二氯甲烷:丙酮=1:1(体积比), 72℃, 20 h],提取液经旋蒸浓缩后用硅胶层析柱净化。以上3种样品的收集液经旋蒸浓缩至1 mL左右,转移至GC样品瓶中待测定。

用GC-MS(Agilent GC 6890/5973N MSD)测定1979年美国环保局公布的优先监测污染物中的16种多环芳烃,即萘(NAP)、二氢苊(ACE)、苊(ACY)、芴(FLO)、菲(PHE)、蒽(ANT)、荧蒽(FLA)、芘(PYR)、苯并[a]蒽(BaA)、蒽(CHR)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、茚并(1,2,3-cd)芘(IcdP)、二苯并(ah)蒽(DahA)以及苯并[g,h,i]芘(BghiP)。

在样品前处理前加入氘代多环芳烃:萘-D₈、二氢苊-D₁₀、菲-D₁₀、蒽-D₁₂和芘-D₁₂作为回收率指示物。地表径流、雨水和树冠水样品中溶解相PAHs的回收率在65.76%~94.91%之间,颗粒相PAHs的回收率在55.92%~96.63%之间,道路尘中PAHs的回收率在53.52%~111.91%之间。样品上GC-MS测试前定量加入2-氟联苯和氘代三联苯,用内标法分析样品中PAHs浓度。

2 结果与讨论

2.1 PAHs 浓度特征

对地表径流、雨水、树冠水和路面积尘中16种PAHs浓度数据进行正态分布检验,结果表明实验数据均服从对数正态分布,上述数据的几何均值列在表1中。对各介质中的PAHs浓度进行方差分析,结果显示,5~6月采集的各介质样品中PAHs的浓度与7~8月有显著差异。计算5~6月各介质样品中PAHs平均浓度与7~8月平均浓度的比值(表2),该比值普遍大于1,即5~6月各介质中PAHs的平均浓度明显高于7~8月。采样同期记录的气象参数显示,5~6月的气象条件相对为温度低(18.8℃),露点低(17.6℃),小风(1.6 m/s)。而7~8月的气象条件则相对而言具有温度高(23.3℃),露点高(21.5℃)和小风(1.6 m/s)的特征。7~8月的气象条件更有利于PAHs的扩散和降解,故该期间内各介质样品中PAHs的含量相对较低。

2.2 因子分析

因子分析结合多元线性回归分析的方法在源解析领域得到普遍的应用^[14],由于这种方法不依赖于源成分谱信息,且可以定量计算源贡献率,因此相对便捷准确。由于NAP具有很强的挥发性,且波动性较大,在因子分析过程中,其高浓度可能掩盖其他组分的特征,因此本研究利用其他15种PAHs的浓度进行源解析。对径流、雨水和树冠水样品用颗粒相和溶解相的总PAHs浓度,以消除PAHs在液-固两相间分配的影响。采用主成分分析结合方差极大正交旋转法,提取特征根大于0.5且因子载荷大于3%的主因子。

结果表明,地表径流样品可提取2个主因子,因子载荷列在表3中。支路和主干路机动车道主因子1上高环组分(BkF、BaP、IcdP、BghiP)有较高的载荷,主因子2上低环组分(ACY、FLO、PHE、ANT、FLA和PYR)有较高的载荷。BghiP是机动车排放源的特征组分^[7],BkF和IcdP指示柴油发动机排放^[15,16],而低环组分如FLO、PHE、ANT、FLA和PYR等指示燃煤源^[7,17,18],因此支路和主干路机动车道的主因子1代表机动车排放源,主因子2代表燃煤源。主干路自行车道的径流样品中,主因子1与低环组分关系密切,指示燃煤源,主因子2指示机动车排放源。

路面积尘、雨水和树冠水的主因子载荷列在表4中。路面积尘可以提取3个主因子,主干路机动车道和自行车道样品的主因子1上IcdP和BghiP的载

荷较高,指示机动车排放源;主因子 2 与 FLO、PHE、ANT、FLA 和 CHR 的关系密切,代表燃煤源;主因子 3 上只有 DahA 具有较高载荷,该组分并没有明确的源指示意义.支路积尘样品的主因子 1 上 IcdP 和

BghiP 的比重较大,指示机动车排放源;主因子 2 上 BaA、BkF、BbF 和 BaP 的载荷较高,代表燃油源^[7,16];主因子 3 上 ACY、ACE 和 PYR 有较高载荷,体现燃煤源特征^[17].

表 1 道路地表径流、雨水、树冠水和路面积尘中 PAHs 的几何平均浓度

PAHs	地表径流/ng•L ⁻¹		雨水/ng•L ⁻¹		树冠水/ng•L ⁻¹		路面积尘 /ng•g ⁻¹
	溶解相	颗粒相	溶解相	颗粒相	溶解相	颗粒相	
NAP	38.5	74.8	16.2	13.1	26.6	26.6	116.4
ACY	10.2	15.9	4.4	2.1	1.7	2.5	12.3
ACE	4.5	6.5	2.0	1.3	1.8	1.5	13.0
FLO	25.8	45.0	10.3	6.4	10.6	9.1	56.9
PHE	112.7	460.6	36.3	36.5	18.9	53.0	472.1
ANT	24.3	50.5	3.1	3.6	3.6	4.0	46.4
FLA	136.9	1 013.8	41.6	56.1	47.5	70.3	862.1
PYR	86.2	708.1	27.5	39.6	32.4	51.8	534.0
BaA	12.5	187.3	2.2	4.3	2.7	7.8	120.5
CHR	29.6	494.8	9.9	23.1	9.3	24.1	298.9
BbF	15.1	226.9	3.5	9.5	4.7	12.5	180.9
BkF	10.0	160.8	2.3	7.6	3.8	12.4	145.3
BaP	4.5	195.0	未检出	8.4	1.2	11.1	114.2
IcdP	2.0	51.5	未检出	18.3	0.7	14.4	44.8
DahA	0.2	8.2	未检出	1.1	未检出	1.1	14.4
BghiP	1.7	93.9	未检出	5.7	未检出	5.8	43.2
∑16 PAH	548.2	4 341.1	172.9	274.6	135.3	317.9	3 322.8

表 2 地表径流、路面积尘、雨水和树冠水中春季和夏季 PAH 浓度的比值

PAHs	地表径流						雨水		树冠水			路面积尘		
	支路		机动车道		自行车道		R _p	R _d	R _p	R _d		支路	机动车道	自行车道
	R _p ¹⁾	R _d ²⁾	R _p	R _d	R _p	R _d								
NAP	0.5	2.5	5.5	2.7	3.1	2.5	1.0	21.4	3.4	0.6		11.3	2.7	5.6
ACY	2.5	2.4	7.5	2.7	3.9	3.1	1.3	2.1	1.4	0.8		3.5	1.8	3.0
ACE	1.2	1.7	8.3	2.2	4.3	3.3	1.3	1.9	1.4	1.4		4.0	4.6	5.8
FLO	2.9	1.6	9.6	2.5	5.2	2.6	1.9	2.4	2.3	0.1		7.0	2.7	4.3
PHE	4.6	5.2	12.7	4.1	7.6	3.2	1.9	2.2	2.4	0.7		5.1	4.0	5.6
ANT	4.4	3.4	10.4	3.4	6.3	3.2	5.8	1.9	2.3	1.5		4.2	3.6	4.1
FLA	4.3	3.6	11.0	2.3	8.0	3.2	3.0	2.5	3.4	1.9		2.9	2.9	3.2
PYR	4.2	3.5	10.5	1.7	7.1	2.8	2.3	2.3	2.7	1.6		2.6	2.4	3.1
BaA	5.5	3.2	13.6	1.3	14.5	2.5	5.2	1.1	4.3	0.9		1.7	1.4	2.3
CHR	4.6	3.0	12.0	1.0	13.5	2.0	4.5	1.1	3.9	1.0		1.7	1.8	1.6
BbF	16.1	9.0	44.2	3.3	69.2	6.1	12.3	1.9	14.6	2.9		2.0	2.0	1.8
BkF	8.2	7.1	29.2	1.8	41.9	5.5	17.4	1.3	15.0	1.6		2.3	2.1	1.9
BaP	7.0	19.4	23.3	3.5	30.0	10.5	18.9	5.8	15.5	3.4		2.6	2.4	3.6
IcdP	28.6	27.0	88.4	4.8	272.3	13.3	4.4	6.8	8.7	10.9		9.8	6.8	11.2
DahA	39.1	47.9	104.8	8.7	136.9	29.7	5.7	5.1	17.2	2.4		1.0	1.0	0.9
BghiP	9.6	21.2	45.4	3.6	48.9	10.0	6.9	1.8	6.7	3.1		3.2	2.7	3.5

1)R_p = 颗粒相 PAHs 比值;2)R_d = 溶解相 PAHs 比值

路面积尘通常被认为是地表径流中污染物的主要来源,由因子分析的结果可见,地表径流与路面积尘中 PAHs 的源成分基本以机动车排放和燃煤排放为主.但在主干路自行车道和支路,地表径流和路面

积尘的主因子结构有所差异,这可能是由其他污染物输入源的贡献造成的,如雨水和树冠水,冲刷大气中的颗粒相和气相污染物,及行道树叶上的污染物,对地表径流中的 PAHs 也会产生一定贡献.

表3 地表径流样品方差极大旋转后的主因子载荷

Table 3 Rotated component matrix of total PAHs
(dissolved + particle) for road runoff

PAHs	主干路自行车道		主干路机动车道		支路	
	因子1		因子2		因子1	
	因子1	因子2	因子1	因子2	因子1	因子2
ACY	0.88	0.46	0.59	0.80	0.70	0.71
ACE	0.60	0.71	0.87	0.43	0.33	0.92
FLO	0.82	0.55	0.79	0.61	0.72	0.68
PHE	0.76	0.64	0.83	0.56	0.79	0.60
ANT	0.93	0.35	0.76	0.64	0.78	0.60
FLA	0.85	0.53	0.77	0.63	0.77	0.63
PYR	0.84	0.54	0.73	0.67	0.76	0.63
BaA	0.87	0.46	0.78	0.62	0.85	0.51
CHR	0.67	0.74	0.86	0.50	0.85	0.53
BbF	0.86	0.47	0.77	0.61	0.90	0.43
BkF	0.41	0.90	0.96	0.22	0.89	0.44
BaP	0.55	0.77	0.80	0.47	0.88	0.46
IcdP	0.36	0.92	0.73	0.55	0.91	0.40
DahA	0.47	0.86	0.24	0.96	0.91	0.41
BghiP	0.54	0.84	0.90	0.38	0.88	0.46
方差贡献率/%	51.5	45.3	60.1	36.1	65.1	33.4
累计方差贡献率/%	51.5	96.8	60.1	96.2	65.1	98.5

雨水和树冠水样品中分别提取出3个主因子(表4)。雨水的主因子1代表燃油/燃煤源,主因子2指示机动车排放源,主因子3上仅有ANT的载荷较高,指示焦炉排放特征^[16]。雨水中PAHs的源成分与主干路自行车道径流的源成分相近,体现了雨水对该处径流中PAHs源组成的影响。树冠水中主因子1代表机动车排放源,主因子2指示燃煤源,主因子3代表燃油源,主因子1和2的源特征与支路地表径流的主因子相同。由于采样区域为文教、商业、居住混合区,雨季没有本地的燃煤/燃油/焦炉排放源,因此推测地表径流及其相关各介质中解析出的燃油/燃煤/焦炉源经由大气传输来自研究区外。

2.3 多元线性回归分析

以因子分析得到的标准化主因子得分变量为解释变量,标准化的15种PAHs总量为被解释变量,进行多元线性回归,由此获得方程的标准化回归系数可以反映各主成分因子,即各主要源的相对贡献,对径流、雨水、树冠水和路面积尘的回归方程列在表5中,各源的贡献率如表6所示。

表4 路面积尘、雨水和树冠水方差极大旋转后的主因子载荷

Table 4 Rotated component matrix of total PAHs (dissolved + particle) for ground sediment, rain and tree water

PAHs	路面积尘									雨水			树冠水		
	主干路自行车道			主干路机动车道			支路								
	因子1	因子2	因子3	因子1	因子2	因子3	因子1	因子2	因子3	因子1	因子2	因子3	因子1	因子2	因子3
ACY	0.42	0.75	-0.40	0.72	0.31	0.23	0.60	0.35	0.46	0.88	0.38	0.12	0.30	0.78	0.49
ACE	0.95	0.27	0.05	0.06	0.93	-0.02	0.05	-0.01	0.79	0.94	0.04	0.15	0.16	0.18	0.97
FLO	0.86	0.47	-0.06	0.33	0.88	0.16	0.84	0.17	0.46	0.94	0.03	0.16	0.23	0.61	0.73
PHE	0.79	0.56	-0.06	0.39	0.90	-0.08	0.93	0.22	0.20	0.97	0.02	0.12	0.63	0.70	0.33
ANT	0.90	0.40	-0.06	0.10	0.84	-0.05	0.95	0.12	0.20	0.36	0.09	0.91	0.65	0.68	0.26
FLA	0.48	0.82	0.05	0.64	0.67	-0.07	0.71	0.49	0.45	0.92	0.33	0.15	0.85	0.50	0.16
PYR	0.65	0.72	0.02	0.75	0.56	-0.05	0.60	0.53	0.53	0.85	0.48	0.11	0.88	0.43	0.18
BaA	0.55	0.64	-0.20	0.99	-0.02	0.11	0.19	0.92	0.32	-0.03	0.84	0.28	0.88	0.39	0.17
CHR	0.33	0.90	0.17	0.99	0.10	0.01	0.32	0.86	0.13	0.79	0.53	0.17	0.88	0.42	0.14
BbF	0.21	0.89	0.37	0.97	0.17	0.11	0.24	0.91	0.18	0.48	0.77	0.23	0.91	0.37	0.17
BkF	0.58	0.72	0.38	0.96	0.25	0.11	0.49	0.83	-0.01	0.26	0.93	0.09	0.96	0.13	0.23
BaP	0.73	0.58	-0.08	0.80	0.49	0.26	0.33	0.91	0.02	0.54	0.70	0.29	0.90	0.37	0.11
IcdP	0.95	0.28	-0.01	0.82	0.51	-0.06	0.89	0.20	-0.23	0.22	0.95	-0.03	0.87	0.44	0.17
DahA	-0.01	0.13	0.98	0.19	-0.06	0.97	-0.17	0.67	-0.36	-0.07	0.88	-0.24	0.79	0.54	0.17
BghiP	0.93	0.30	0.15	0.83	0.45	0.16	0.72	0.60	-0.23	0.43	0.88	0.05	0.95	0.06	0.26
方差贡献率/%	46.7	37.0	10.1	50.7	32.1	7.8	37.2	36.7	13.3	44.4	39.3	8.4	59.2	23.5	14.8
累计方差贡献率/%	46.7	83.7	93.7	50.7	82.8	90.6	37.2	74.0	87.2	44.4	83.6	92.0	59.2	82.6	97.4

表 5 $\sum$ 15 PAHs 总量与主因子得分变量多元线性回归结果

Table 5 Multiple linear regression of principle component scores against $\sum$ 15 PAHs

介质	采样点	标准化回归方程	参数检验相伴概率	样本可决系数
地表径流	支路	$Z = 0.829 F1 + 0.557 F2$	$p1 = 0.000, p2 = 0.000$	0.998
	机动车道	$Z = 0.821 F1 + 0.570 F2$	$p1 = 0.000, p2 = 0.000$	0.999
	自行车道	$Z = 0.707 F1 + 0.706 F2$	$p1 = 0.000, p2 = 0.000$	0.999
路面积尘	支路	$Z = 0.735 F1 + 0.578 F2 + 0.331 F3$	$p1 = 0.000, p2 = 0.000, p3 = 0.000$	0.985
	机动车道	$Z = 0.798 F1 + 0.587 F2 + 0.018 F3$	$p1 = 0.000, p2 = 0.000, p3 = 0.660$	0.982
	自行车道	$Z = 0.682 F1 + 0.717 F2 + 0.039 F3$	$p1 = 0.000, p2 = 0.000, p3 = 0.362$	0.980
雨水		$Z = 0.832 F1 + 0.520 F2 + 0.188 F3$	$p1 = 0.000, p2 = 0.000, p3 = 0.000$	0.997
树冠水		$Z = 0.859 F1 + 0.461 F2 + 0.223 F3$	$p1 = 0.000, p2 = 0.000, p3 = 0.000$	1.000

表 6 径流、路面积尘、降雨和树冠水中各 PAHs 来源的贡献率

Table 6 Contribution of PAH sources for road runoff, ground sediment, rain and tree water

介质	采样点	主因子 1		主因子 2		主因子 3	
		源	贡献率/%	源	贡献率/%	源	贡献率/%
地表径流	支路	机动车排放	60	燃煤	40	—	—
	机动车道	机动车排放	59	燃煤	41	—	—
	自行车道	燃煤	50	机动车排放	50	—	—
路面积尘	支路	机动车排放	45	燃油	35	燃煤	20
	机动车道	机动车排放	57	燃煤	42	无特定源	1
	自行车道	机动车排放	47	燃煤	50	无特定源	3
雨水		燃煤/燃油	54	机动车排放	34	炼焦	12
树冠水		机动车排放	56	燃煤	30	燃油	14

计算 2006 年每场径流中 PAHs 各来源的贡献量,如图 1 所示.5~6 月径流中 PAHs 各源的贡献量均大于 7~8 月.在支路,有几场径流中源的贡献量为负值,这在物理意义上是不合理的.Larsen 等^[16]在对 Baltimore 大气中的 PAHs 进行源解析时也报道了类似的现象,并认为这是主成分分析方法的一个缺陷.在本研究中,由于径流浓度有明显的季节差异,因此尝试分 5~6 月和 7~8 月 2 个时间段对地表径流分别进行主成分分析.在主干路机动车道,机动车源和燃煤源的贡献率 5~6 月分别是 59%和 41%,7~8 月分别是 26%和 74%;在主干路自行车道,机动车源和燃煤源的贡献率 5~6 月分别是 51%和 49%,7~8 月分别是 29%和 71%;在支路,机动车源和燃煤源的贡献率在 5~6 月分别是 61%和 39%,7~8 月分别是 8%和 92%.将各时段贡献量整合显示在图 2 中.比较图 1 和图 2 可见,按时间段分别计算的贡献量中,负值的情况得到了明显的纠正.

路面积尘中 PAHs 的来源贡献,在主干路机动车道和支路以机动车排放源为主,在自行车道,机动车排放源和燃煤源各占约 50%.对雨水中的 PAHs,燃煤/燃油源的贡献率占 54%,表明雨水中 PAHs 的主要来自于大气传输.对于树冠水中的 PAHs,机动车排放源的贡献率占 56%,表明树冠水受道路交通

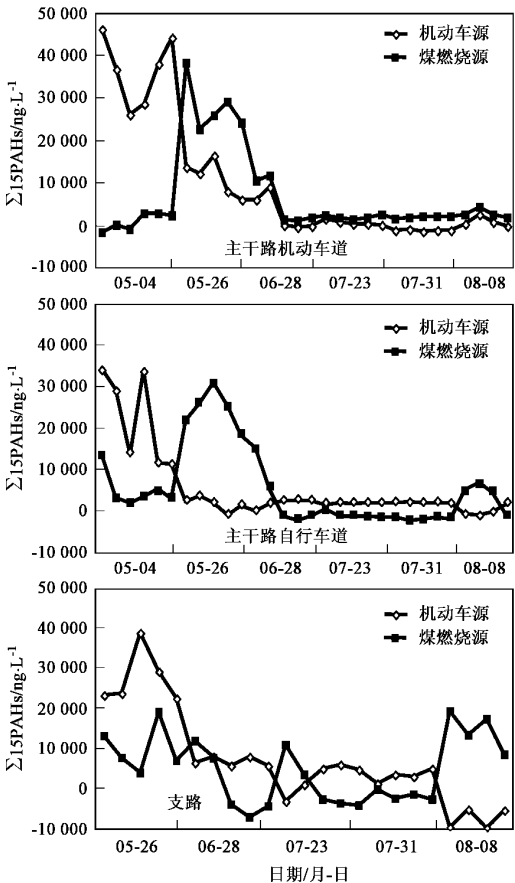


图 1 各场次地表径流中 PAHs 源的贡献量
Fig.1 Source contributions of PAHs in each runoff event

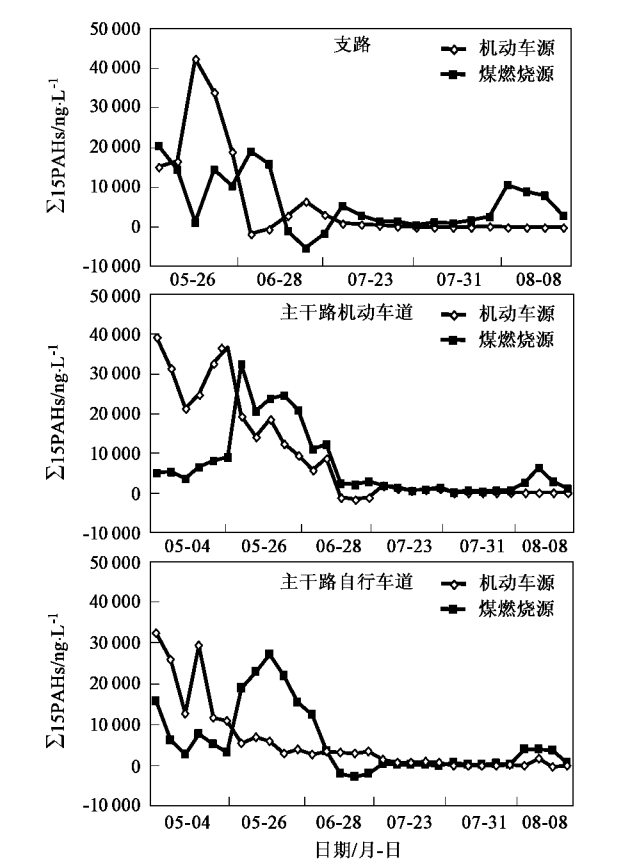


图2 分季节计算各场次地表径流中PAHs源的贡献量

Fig.2 Seasonal integrated source contributions of PAHs in each runoff event

的影响明显。

3 结论

(1)因子分析表明机动车排放源和燃煤源是研究区域地表径流和路面积尘中PAHs的主要来源。雨水中PAHs的主要来源包括燃油/燃煤源、机动车排放和炼焦源,树冠水中的PAHs则主要来自于机动车排放源、燃煤源和燃油源。地表径流中的PAHs更多体现路面积尘的来源特征,但在自行车道和支路,雨水和树冠水的影响也分别得到体现。

(2)多元线性回归表明,在支路和主干路机动车道,路面积尘和地表径流中机动车排放源的贡献较大,而在自行车道,由于受机动车的影响小,机动车源和燃煤源的贡献相近。雨水中的PAHs以燃煤/燃油源为主,贡献率为54%,树冠水中机动车源的贡献较大,为56%。

参考文献:

[1] Motelay-Massei A, Garban B, Tiphagne-larcher K, et al. Mass

balance for polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban watershed of Le Havre (France): Transport and fate of PAHs from the atmosphere to the outlet[J]. Water Research, 2006, 40: 1995-2006.

[2] Tsihrintzis V A, Hamid, R. Modeling and management of urban stormwater runoff quality: A review [J]. Water Resources Management, 1997, 11: 137-164.

[3] Chen B L, Xuan X D, Zhu L Z, et al. Distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface waters, sediments and soils of Hangzhou City, China[J]. Water Research, 2004, 38: 3558-3568.

[4] Brown J N, Peake B M. Sources of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban stormwater runoff[J]. Science of the Total Environment, 2006, 359: 145-155.

[5] Hoffman E J, Mills G L, Latimer J S, et al. Urban runoff as a source of polycyclic aromatic hydrocarbons to coastal waters[J]. Environmental Science and Technology, 1984, 18: 580-587.

[6] Walker W J, McNutt R P, Maslanka C A. The potential of urban runoff to surface sediments of the Passaic River: sources and chemical characteristics[J]. Chemosphere, 1999, 38: 363-377.

[7] Harrison R M, Smith D J T, Luhana L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, UK [J]. Environmental Science and Technology, 1996, 30: 825-832.

[8] 车伍, 欧岚, 汪慧贞, 等. 北京城区雨水径流水质及其主要影响因素[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(1): 33-37.

[9] 赵剑强, 孙奇清. 城市道路路面径流水质特性及排污规律[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2002, 22(2): 21-23.

[10] 甘华阳, 卓慕宁, 李定强, 等. 广州城市道路雨水径流的水质特征[J]. 生态环境, 2006, 15(5): 969-973.

[11] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门城市路面地表径流特征分析[J]. 中国环境科学, 2006, 26(4): 469-473.

[12] 杨德敏, 曹文志, 陈能汪, 等. 厦门城市降雨径流氮、磷污染特征[J]. 生态学杂志, 2006, 25(6): 625-628.

[13] 张巍, 张树才, 岳大攀, 等. 北京城市道路地表径流中PAHs的污染特征研究[J]. 环境科学学报, 2008, 28(1): 160-167.

[14] 张树才, 张巍, 王开颜, 等. 北京东南郊大气TSP中多环芳烃的源解析[J]. 环境科学学报, 2007, 27(3): 452-458.

[15] Venkataraman C, Lyons J M, Friedlander S K. Size distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons and elemental carbon. 1. Sampling, measurement methods, and source characterization [J]. Environmental Science and Technology, 1994, 28: 555-562.

[16] Larsen R K, Baker J E. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: a comparison of three methods [J]. Environmental Science and Technology, 2003, 37: 1873-1881.

[17] Simcik M F, Eisenreich S J, Liyo P J. Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33: 5071-5079.

[18] Masclet P, Mouvier G, Nikolaou K. Relative decay index and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Atmospheric Environment, 1986, 20: 439-446.