

## 北运河流域（北京段）表层土壤多环芳烃空间分布特征及来源解析

黄丹, 黄勇, 安永龙, 冯辉, 孙朝, 李欢

### Spatial distribution and sources of PAHs in topsoil in the Beiyun River Basin (Beijing section)

HUANG Dan, HUANG Yong, AN Yonglong, FENG Hui, SUN Zhao, and LI Huan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112022>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 雄安新区土壤重金属和砷元素空间分布特征及源解析

Sources and spatial distribution of heavy metals and arsenic in soils from Xiongan New Area, China

董燕, 孙璐, 李海涛, 张作辰, 张源, 李刚, 郭小彪 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 172-181

#### 格尔木河流域山前平原区蒸散量的分布特征

Distribution characteristics of evapotranspiration in the valley piedmont plain of the Golmud River Basin

朱晓倩, 金晓媚, 张绪财, 张京 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 55-64

#### 承德市土壤重金属空间结构与分布特征

Spatial structure and distribution characteristics of heavy metals in the soil in Chengde

安永龙, 万利勤, 李霞, 殷志强, 卫晓峰, 何泽新, 贾凤超 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 119-131

#### 塔城盆地地下水“三氮”污染特征及成因

Distribution and source of nitrogen pollution in groundwater in the Tacheng Basin

吕晓立, 刘景涛, 周冰, 朱亮 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 42-42

#### 湘西峒河流域水化学特征及无机碳通量计算

Hydrochemical characteristics and estimation of the dissolved inorganic carbon flux in the Donghe River Basin of western Hunan

霍俊伊, 于, 张清华, 李亮 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 64-72

#### 北京西山岩溶水中硝酸盐来源及迁移特征

Sources and migration of nitrate in groundwater in the Xishan karst aquifer in Beijing

李露, 秦大军, 郭艺, 孙杰 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 73-80



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112022

黄丹, 黄勇, 安永龙, 等. 北运河流域(北京段)表层土壤多环芳烃空间分布特征及来源解析 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 159-171.

HUANG Dan, HUANG Yong, AN Yonglong, *et al.* Spatial distribution and sources of PAHs in topsoil in the Beiyun River Basin (Beijing section)[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 159-171.

## 北运河流域(北京段)表层土壤多环芳烃 空间分布特征及来源解析

黄丹, 黄勇, 安永龙, 冯辉, 孙朝, 李欢  
(北京市生态地质研究所, 北京 102218)

**摘要:** 土壤中的多环芳烃(PAHs)会威胁人类健康和生态环境安全。为掌握北运河流域(北京段)土壤中 PAHs 的分布特征及其形成机制, 采用克里格插值、主成分分析-多元线性回归等多元统计方法, 结合同分异构体比值法对该区域表层土壤中 16 种优控 PAHs 的质量分数、分布趋势、空间分布特征及其污染来源进行了研究。结果表明: (1) 研究区 216 件土壤样品中 16 种 PAHs 均被检出, 且主要为高环 PAHs(4~6 环), 总 PAHs 的质量分数范围在 10.5~19 466.5  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 受污染土壤样品占 29.63%; (2) 表层土壤中的 PAHs 在东西及南北方向上均呈现出中部高、两端低的趋势, 在空间分布上总体表现为北部区域及中部城区含量较高、其他地区相对较低的特征, 且由于人为活动影响导致个别点位 PAHs 富集, 存在点源污染或局部污染; (3) PAHs 同分异构体比值法及主成分分析法研究表明, 研究区内 PAHs 的来源为以煤/生物质燃烧及交通燃烧为主、石油泄漏等石油化工源为辅的混合源, 多元线性回归方法分析后得到 2 者的贡献率分别为 89% 和 11%。研究结果可为研究区的污染防治、土地质量评价和国土空间规划等工作提供有力支撑。

**关键词:** 北运河流域; 表层土壤; PAHs; 空间分布; 污染来源

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)03-0159-13

## Spatial distribution and sources of PAHs in topsoil in the Beiyun River Basin (Beijing section)

HUANG Dan, HUANG Yong, AN Yonglong, FENG Hui, SUN Zhao, LI Huan  
(Beijing Institute of Ecological Geology, Beijing 102218, China)

**Abstract:** Organic pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in topsoil has threatened human health and ecological environment. In order to understand the distribution and pollution characteristics of PAHs in topsoil in the Beiyun River Basin in Beijing, an investigation is carried out to examine the contents, distribution trends, spatial distribution and pollution sources of 16 optimal PAHs in topsoil of the study area by means of multivariate statistical methods including the Kriging interpolation, principal component analysis-multiple linear regression and the concentration ratio among certain components. The results are as follows (1) all 16 PAHs are detected, and most of them are high loop PAHs (4-6 rings). The total contents of PAHs in topsoil range from 10.5 to 19 466.5  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , about 29.63% of the samples are polluted in the study area. (2) The PAHs contents in topsoil show

收稿日期: 2021-12-10; 修订日期: 2022-03-02

投稿网址: [www.swdzcgdz.com](http://www.swdzcgdz.com)

基金项目: 北京市政府公益性项目(11000022T000000439575)

第一作者: 黄丹(1989-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事环境地球化学和生态地球化学研究工作。E-mail: [huangdan21001@gmail.com](mailto:huangdan21001@gmail.com)

a trend of higher in the middle and lower at ends in both east-west and south-north direction. In terms of spatial distribution, the PAHs contents in topsoil are higher in the northern region and the central urban area, while the PAHs contents are lower in other areas. Due to the accumulation of PAHs caused by human activities at some points, point source pollution or local pollution exist. (3)The ratio of specific PAHs components and principal component analysis indicate that the sources of 16 PAHs in the study area are mainly coal, biomass combustion and traffic combustion. Multiple linear regression shows that the contribution rates of the two are 89% and 11% respectively. The research results can provide strong support for pollution prevention and control, land quality evaluation and territorial space planning in the study area.

**Keywords:** Beiyun River Basin; topsoil; PAHs; spatial distribution; pollution sources

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是指分子中含有 2 个或者 2 个以上苯环的芳香烃, 是一种广泛分布于大气、水和土壤中的持久性有机污染物, 具有理化性质稳定、分子难降解、易迁移积累等特点, 且因其具有强致癌、致畸和致突变的特点<sup>[1-2]</sup>, 对人类健康和生态环境安全都存在极大威胁。作为最重要的环境介质之一, 土壤不可避免地成为 PAHs 污染物转化、迁移、积累的中转站<sup>[3]</sup>。近年来众多学者也针对土壤中的 PAHs 污染进行了大量研究。刘增俊等<sup>[4]</sup>分别在长江三角洲地区的苏州市和嘉兴市采集了农田土壤样品, 采用比值法和主成分分析法探析了研究区土壤中 PAHs 的含量及来源, 结果表明嘉兴市农田土壤中的 PAHs 质量分数远低于苏州市, 且两个地区土壤中 PAHs 的来源均以生物质和煤的燃烧为主、石油源为辅。黄勇等<sup>[5]</sup>针对北京市工业区、农业种植区、水源保护区及居民区等不同功能区进行了分区采样, 使用主成分分析-多元线性回归法探析了不同功能区土壤中 PAHs 的含量及来源, 结果表明主城区土壤中 PAHs 的主要来源为尾气排放及石油储存运输过程中的泄漏; 工业区土壤中 PAHs 的主要来源为煤炭燃烧及尾气排放; 居民区 PAHs 的主要来源为尾气排放及天然气的燃烧。张秀秀等<sup>[6]</sup>以南京市江宁区周岗镇为例, 研究了 15 种优控 PAHs 的分布特征和污染来源, 结果表明研究区的主要污染源为煤及生物质燃烧; 其次为汽油及柴油的燃烧, 并对 2 种污染来源的贡献率进行了估算。

北运河流域 (北京段) 人口约 1 300 万, 占北京市人口的 70% 以上, 经济总量占全市 80% 以上<sup>[7]</sup>, 是北京市人口最集中、产业最密集的地区。同时, 作为北京市最重要的排水河道, 北运河承担着城区 90% 的雨洪及废污水排泄任务<sup>[7-8]</sup>, 是北京市最易受污染的流域之一。目前, 针对北运河流域污染的相关研究多集中在对重金属污染的探讨<sup>[9-10]</sup>, 以及少量关于河流、

不同含水层地下水及沉积物中 PAHs 的污染研究<sup>[11-13]</sup>, 针对北运河流域土壤中 PAHs 污染物的研究较少。因此, 本文以北运河流域 (北京段) 为研究区, 采集 216 件表层土壤样品, 对土壤中 16 种优控 PAHs 的质量分数及空间分布特征进行研究, 并进一步探析污染来源, 从而为北运河流域 (北京段) PAHs 污染的精准防控提供科学依据和技术支持。

## 1 研究区概况

北运河发源于北京市海淀区、昌平一带的山前地区, 主河道长 143 km, 流域总面积 6 166 km<sup>2</sup>。市界内有通惠河及凉水河汇入, 流经东城、西城、海淀、朝阳、顺义、通州等 11 个区<sup>[13-14]</sup>, 市界外在香河境内有港沟河汇入, 流经河北省、天津市汇入海河。

研究区所在的北运河流域 (北京段) 主河道长 89.4 km, 流域面积 4 293 km<sup>2</sup>, 占全市总面积的 27%。其中, 上游的温榆河主河道长 47.5 km, 流域面积 2 478 km<sup>2</sup>, 下游的北运河主河道长 41.9 km, 流域面积 1 815 km<sup>2</sup><sup>[13-14]</sup>。

北运河流域属温带大陆性季风气候, 冬夏两季气候差异大。冬季寒冷干燥, 平均气温为 -3 °C; 夏季炎热多雨, 平均气温为 24.8 °C。北运河流域地处北京山前平原, 年平均降水量约 600 mm<sup>[13-14]</sup>。流域西北部地势较高, 东南部地势平坦而低洼。流域内沿河土壤类型以砂壤土为主, 由西北至东南土质由粗变细, 砂壤土、轻壤土呈带状分布, 与地形坡向一致。流域中部的土壤结构以潮土类二合土为主, 西部多为黄潮土, 南部有少量硝盐土, 土壤熟化程度较高, 土质肥沃, 适宜植物和农作物生长<sup>[15]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与预处理

2020 年 5—8 月于北运河流域 (北京段) 采集 216 件表层土壤样品 (图 1)。采样点布设以网格化为基

基础,结合水系流域、成土母质、地貌成因、土地利用等数字化图件,平原区按照2~4个点/16 km<sup>2</sup>的密度进行布设,丘陵区 and 山区按照1~2个点/16 km<sup>2</sup>的密度进行布设。选择在地形平坦、各种影响因素相对稳定、自然植被良好、具有代表性的地块(1~2 hm<sup>2</sup>)内采集样品。采样点远离铁路、公路、住宅、垃圾填埋场、沟渠、粪坑等人为干扰明显而缺乏代表性的地点,避开水土流失严重、表土破坏以及坡脚、洼地等具有从属景观特征的地点。

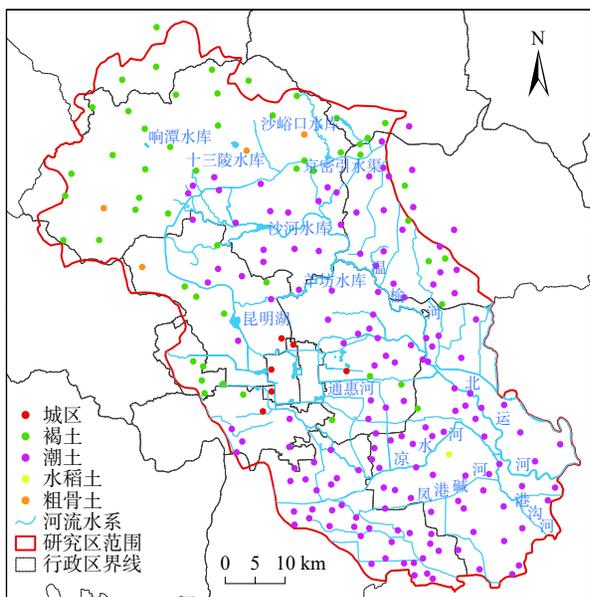


图1 研究区及采样点分布图

Fig. 1 Location of the study area and distribution of the sampling points

土壤样品的采样深度为0~20 cm,每个点位采集柱状土壤样品并上下均匀混合为1份。土壤样品采集时使用干净的不锈钢铲,清除混入土壤中的杂草、砾石等残留物,取大约1 kg土样装入棕色玻璃瓶中送至实验室。将土壤样品经冷冻干燥后过60目筛,并置于-5℃的冰箱中避光保存。采样时使用GPS记录每个采样点的经纬度,详细记录采样点的地理位置、土壤类型、土地利用类型、植被类型、污染源等信息。

称量5 g土壤样品至预先装好硅藻土的萃取池中,样品中加入已知浓度的替代物,经加速溶剂萃取仪提取目标化合物,使用多通道浓缩仪浓缩提取液,然后根据样品的基体干扰情况选择是否使用弗罗里硅土柱对浓缩液进行净化(若浓缩液颜色较深,则需用铜粉脱硫),使用氮吹仪将净化后的液体浓缩至1 mL,然后转移至2 mL样品瓶中,加入10 μL合适浓度的内标溶液,保存于-5℃环境中待测。

## 2.2 样品测试和分析

样品分析测试由北京市一零一地质检测有限公司完成。采用Agilent公司的GC-MS(7890B GC/5977B MSD)气相色谱质谱联用仪器进行定量测定。

测定的16种优控PAHs分别为:萘(Nap)、蒽(Anth)、芘(Per)、菲(Phen)、苊(Flu)、芘(Chr)、苯并[a]蒽(BaA)、苯并[b]蒽(BbA)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、茚并[1,2,3-cd]芘(InP)、二苯并[a,h]蒽(DBA)及苯并[g,h,i]芘(BghiP)。

色谱条件:色谱柱使用HP-5MS弹性石英毛细管柱(内径30 m×0.25 mm,膜厚0.25 μm),载气使用纯度99.999%的氦气,载气流速为1.0 mL/min,进样口温度为280℃,样品以不分流方式进样。

升温程序:初始温度为40℃,保持4 min,然后以10℃/min的速率上升至300℃,保持4 min,直至样品完全流出色谱柱。

质谱条件:电子轰击电离源(EI)为70 eV,质量范围50~600 amu,倍增器电压为1 150 V,离子源温度为250℃,四极杆温度为150℃,传输线温度为280℃,扫描速度为4 000~6 000 amu/s。接口温度为260℃,定性分析采用扫描图像模式和全扫描模式,扫描范围为45~400 m/z。

为保证样品分析的准确性,试验过程中每5个样品设为1批,每批样品中设置1个未检出目标化合物的空白样。目标物的方法检出限设定为信噪比的5倍,即10 μg/kg,低于方法检出限的浓度即报告为未检出。所有的土壤样品均进行3次重复试验,重复分析结果的标准差需小于6%;样品经提取、净化后,回收率指示物的回收率在76%~101%,满足痕量有机化合物残留分析要求。

## 2.3 数据分析方法

采用SPSS19对各PAHs的质量分数进行描述性统计、主成分分析<sup>[16]</sup>、多元线性回归<sup>[17]</sup>,同时使用Shapiro-Wilk方法<sup>[18]</sup>检验样本数据的正态性,对非正态分布的数据进行转换,使其服从或基本服从正态分布;使用ArcGIS10.2软件的探索性空间数据分析(ESDA)功能分析各PAHs质量分数的空间变化趋势;使用GS+9.0软件构建各PAHs质量分数的半变异函数模型<sup>[19]</sup>,根据提供的最优理论模型参数,结合ArcGIS10.2软件,使用克里格插值法<sup>[20]</sup>,对各PAHs的质量分数进行空间插值,生成研究区表层土壤16种单体PAHs、低环PAHs(2~3环)、高环PAHs(4~6环)及PAHs总量的空

间分布特征图。使用 Excel 软件对 PAHs 质量分数进行特定比值分析, 探析研究区土壤 PAHs 污染物的来源。

### 3 结果

研究区表层土壤 PAHs 质量分数统计情况见表 1。可以看出, 研究区 16 种 PAHs 组分均有检出, 低环 PAHs 的检出率均较低, 其中 Flu 的检出率最低; 其次是 Ace 和 Acy; Phe 的检出率最高。样品中高环 PAHs 的检出率普遍高于低环 PAHs, 最高的为 BbF; 最低的为 DBA。研究区 16 种 PAHs 的中值范围为 19.4(Ace) ~ 34.0(Flu)  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 最大值范围为 83.7(Ace) ~ 2 770.4(BbF)  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 说明研究区内不同 PAHs 的质量分数差异较大。另外, 就不同环数 PAHs 的分布情况来看, 所有检出的 PAHs 中, 低环 PAHs 质量分数占 PAHs 总量的 25.6%, 高环 PAHs 质量分数占 PAHs 总量的 74.4%, 说明研究区土壤中的 PAHs 以高环 PAHs 为主, 推测原因是低环 PAHs 容易分解, 而高环 PAHs 更易被土壤中的有机质吸附<sup>[21]</sup>。

表 1 土壤 PAHs 质量分数统计  
Table 1 Statistic of soil PAHs

指标	环数	最小值/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	最大值/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	平均值/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	中值/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	检出 率/%
Nap	2	ND	213.0	36.6	24.2	12.90
Acy	3	ND	201.7	46.6	27.1	7.41
Ace	3	ND	83.7	28.6	19.4	5.09
Flu	3	ND	111.9	52.1	34.0	4.17
Phe	3	ND	1 034.6	60.1	24.4	69.44
Ant	3	ND	265.6	53.5	25.3	12.04
Fla	4	ND	2 087.5	85.9	22.5	66.20
Pyr	4	ND	1 899.1	87.6	23.4	54.17
BaA	4	ND	1 293.2	75.2	21.9	44.44
Chr	4	ND	2 533.2	80.0	21.6	61.11
BbF	5	ND	2 770.4	69.7	19.8	87.50
BkF	5	ND	2 031.1	92.7	25.6	37.96
BaP	5	ND	2 691.2	112.8	32.0	38.89
DBA	5	ND	153.2	43.6	33.4	10.65
InP	6	ND	857.5	70.0	27.1	34.26
BghiP	6	ND	1 538.8	73.9	23.3	48.15
低环 PAHs	2~3	ND	1 712.2	82.6	24.8	72.69
高环 PAHs	4~6	ND	17 754.3	424.4	72.0	92.13
PAHs 总量	—	10.5	19 466.5	451.0	83.5	100.00

注: ND表示未检出。

## 4 分析与讨论

### 4.1 土壤 PAHs 污染状况分析

2018 年发布的《土壤环境质量—建设用地土壤污

染风险管控标准》(GB 36600—2018)<sup>[22]</sup>中规定了部分 PAHs 的风险筛选值及管制值(表 2)。研究区有 2 件样品的 BaP 质量分数超出第一类用地的风险筛选值, 分别位于西郊某工业区附近(2 691.24  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )及研究区北部一处车流量及人流量均较大的林地内(852.57  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ), 推断与人为污染因素有关。

表 2 土壤 PAHs 污染标准  
Table 2 Pollution standard of soil PAHs

PAHs	筛选值/ ( $10^3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	管制值/ ( $10^3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	PAHs	筛选值/ ( $10^3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	管制值/ ( $10^3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
Nap	25	255	BkF	55	550
BaA	5.5	55	BaP	0.55	5.5
Chr	490	4 900	InP	5.5	55
BbF	5.5	55	DBA	0.55	5.5

学者 Edwards<sup>[23]</sup>曾提出土壤中内源性 PAHs 的质量分数为 1 ~ 10  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 本研究区土壤样品中总 PAHs 的质量分数为 10.5 ~ 19 466.5  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 中值为 83.5  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 均值为 451.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 远超过 1 ~ 10  $\mu\text{g}/\text{kg}$  这一范围, 因此可知本研究区内土壤样品中 PAHs 的主要来源为外界输入。目前, 国内尚无 PAHs 总量的相关污染标准, 国际上也尚未统一。荷兰学者 Maliszewska-Kordybach 等<sup>[24]</sup>曾针对土壤中 PAHs 总量提出将污染程度分为以下四个等级: 无污染(<200  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )、轻度污染(200 ~ 600  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )、中度污染(600 ~ 1 000  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )及严重污染(>1 000  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )。依据此标准对本研究区土壤中 PAHs 的污染状况进行评价, 有 152 件土壤样品为未污染, 占样品总数的 70.37%; 受到污染的样品个数为 64 件, 占总数的 29.63%。其中 35 件土壤样品为轻度污染, 8 件土壤样品为中度污染, 21 件土壤样品为严重污染。严重污染的样品主要分布于工业区附近, 推断与工业生产及城市活动等人为污染因素有关。

### 4.2 土壤 PAHs 质量分数趋势面分析

趋势面分析是针对大量空间离散数据, 从整体插值角度出发, 研究空间数据的分布特征及发展趋势的方法。趋势面分析能够在大范围内反映空间离散数据的变化趋势, 从而揭示区域内连续分布现象的空间变化规律<sup>[25]</sup>。图 2 中 X 轴代表正东方向, Y 轴代表正北方向, Z 轴代表土壤 PAHs 的质量分数, 单位为  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

由图 2 可知, 所有单体 PAHs 质量分数的空间趋势均表现为东西方向由东向西先增高再降低, 南北方向由南向北先增高再降低, 但不同 PAHs 单体的增幅不尽相同。其中, Nap、Acy、Ace、Flu 及 Ant 在各个方向上的变化趋势均不明显, 尤其是 Acy、Ace 及 Flu, 在

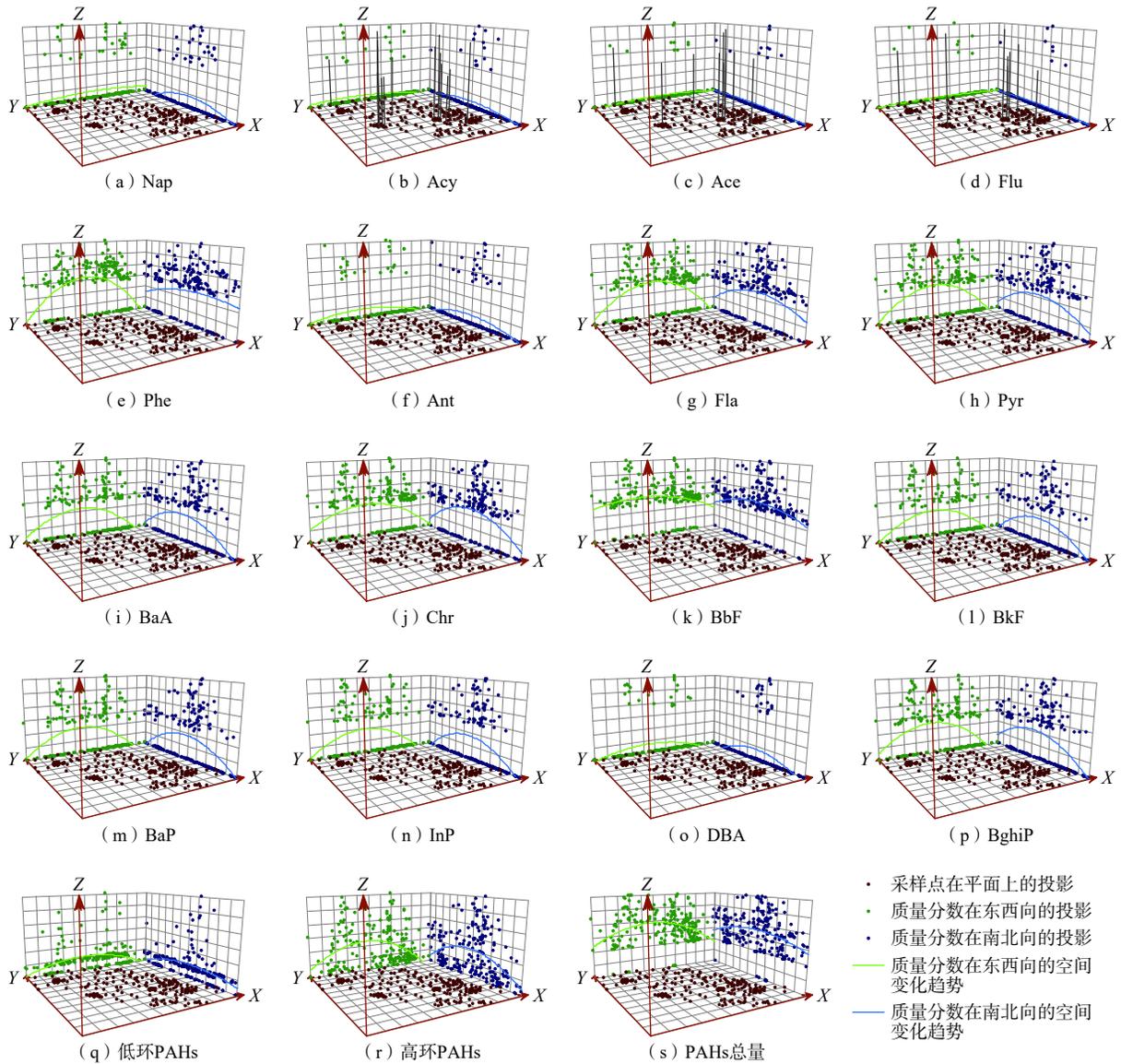


图 2 土壤 PAHs 质量分数趋势面分析图

Fig. 2 Diagrams of the soil PAHs spatial trend analysis

东西及南北方向上近似于一条直线。Phe 在东西方向上先急剧升高,再急剧降低,在南北方向上变化则较平缓,但均表现出中间高,两边低的趋势。Fla、Pyr、BaA、Chr、BkF、BaP、InP、BghiP、高环 PAHs、PAHs 总量在东西方向及南北方向上均表现为先急剧升高再急剧降低,趋势变化较明显。BbF、DBA、低环 PAHs 在东西方向及南北方向上均表现为先平缓上升再平缓下降。

可以看出,各 PAHs 组分在东西及南北两个方向上均呈现出相似的递增递减规律,但是低环 PAHs 的变化趋势明显较高环 PAHs 更为平缓,这应该是由 PAHs 自身的化学特性导致,低环 PAHs 具有分子量低,半衰期短的特点,因此更容易降解,而高环 PAHs

由于分子量大,更容易被土壤中的有机质吸附,从而在土壤中长时间停留。研究表明<sup>[26]</sup>,土壤环境中 PAHs 的吸附、降解、挥发、迁移等行为会受到多种外界因素的影响,如:湿度、温度、土壤性质及土壤中其他物质的质量分数等,从而导致 PAHs 在土壤中各异的分布特征及发展趋势。此外,人类活动和污染物排放对于土壤中 PAHs 的质量分数和分布趋势也有着不可忽视的影响。研究区中部为中心城区,人口集中,车流量巨大,土壤 PAHs 的分布趋势明显受到人为活动的影响,在东西及南北方向上均表现出中部高,两端低的趋势。

### 4.3 土壤 PAHs 质量分数空间分布特征

使用 Shapiro-Wilk 方法检验样本数据,对非正态

分布的数据进行转换,使之符合正态分布。以转换后的正态分布数据为样本,进行半变异函数的拟合,当决定系数( $R^2$ )越接近于 1,残差(RSS)越接近于 0 时,

拟合效果越好<sup>[27]</sup>。本研究中各 PAHs 质量分数的最优拟合模型及其对应的结构参数见表 3。

表 3 土壤 PAHs 质量分数半变异函数理论模型及参数  
Table 3 Theoretical model and parameters of the soil PAHs semivariogram

PAHs	理论模型	块金值	基台值	块金系数	变程/km	$R^2$	RSS
Nap	球状	0.037	0.079	0.462	9.75	0.197	0.005 5
Acy	线性	0.559	0.559	1.000	38.96	0.317	0.037 6
Ace	球状	0.029	0.336	0.086	15.25	0.248	0.704 0
Flu	高斯	0.096	0.450	0.213	29.22	0.141	0.084 3
Phe	线性	0.043	0.124	0.347	16.82	0.332	0.229 0
Ant	球状	0.094	0.489	0.192	7.21	0.119	0.437 0
Fla	线性	0.552	1.080	0.511	45.94	0.868	0.056 2
Pyr	指数	0.009	0.052	0.169	9.15	0.672	2.84E-04
BaA	线性	0.037	0.037	1.000	41.92	0.252	3.09E-05
Chr	线性	0.780	1.460	0.530	45.99	0.714	0.245 0
BbF	线性	0.489	1.210	0.404	48.31	0.838	0.132 0
BkF	高斯	0.034	0.068	0.499	10.48	0.255	0.003 1
BaP	指数	0.002	0.010	0.235	12.60	0.499	2.05E-05
DBA	球状	0.010	0.085	0.112	3.36	0.213	0.014 3
InP	线性	0.368	0.368	1.000	36.45	0.236	0.535 0
BghiP	线性	0.679	0.945	0.719	42.11	0.413	0.133 0
低环PAHs	球状	0.139	1.120	0.124	11.90	0.752	0.959 0
高环PAHs	高斯	1.521	3.043	0.500	48.67	0.773	0.989 0
PAHs总量	高斯	1.221	2.566	0.476	48.28	0.896	0.279 0

块金系数一般用于指示系统变量间空间相关性的强弱,值越小,表示变量的空间相关性越强,样本间的变异由结构性因素主导,当块金系数小于 0.250 时,表明区域变量具有较强的空间相关性。由表 3 可知,块金系数小于 0.250 的有 Ace、Flu、Ant、Pyr、BaP、DBA 及低环 PAHs,说明这些组分的空间相关性较强,空间变异更多地是由结构性因素导致,如土壤类型、地形地貌、土地利用类型等。块金系数大于 0.750 的有 Acy、BaA 及 InP,说明这些组分的空间相关性较弱,空间变异更多地是由随机性因素导致,如人为污染等,可能存在较明显的点源污染或局部污染。

利用 ArcGIS 的地统计功能及上述模型参数对各 PAHs 组分进行普通克里格插值,得出各 PAHs 组分质量分数( $w$ )的空间分布图(图 3),可知: Nap、Acy、Ace、Flu、Ant、DBA 这 6 种检出率较低的 PAHs 组分在多个位置均存在以点状污染为中心的岛状分布格局,其他区域无明显分布,推测因为研究区内存在点状人为污染,如西郊某工业区及东南郊某工厂区周边,均存在以工厂区为中心的岛状分布格局。Phe 在研究区西北及中西部有高值分布。Fla、Pyr、BaA、

Chr、BbF 及高环 PAHs 在研究区内均呈现出大范围的岛状分布趋势,其中 Fla、Chr、BbF 及高环 PAHs 图中分布有较大范围的深色图斑,尤其是高环 PAHs,90% 以上的面积为深色图斑。Pyr、BaA、BkF、BaP、InP 及 BghiP 的分布趋势相近,均表现为北部及中西部区域高值分布,南部及东南部低值分布,并且在人为干扰较大的城区及工厂区附近存在明显的岛状污染分布。低环 PAHs 的空间分布特征与 Phe 相似,推测原因为 Phe 在低环 PAHs 组分中的占比最高。由于 PAHs 总量中,低环 PAHs 占 25.6%,高环 PAHs 占 74.4%,因此导致 PAHs 总量与高环 PAHs 呈现出相似的空间分布特征。

综合来看,研究区内土壤 PAHs 在中西部区域有明显富集。结合研究区的土地利用类型可知,中西部区域为中心城区,包括北京市五环内及周边城区,土地利用类型主要为建设用地。该区域人口高度密集,车流量大,冬季燃煤供暖、居民区天然气的燃烧及燃油车辆的尾气排放均会产生大量 PAHs,因此该区域人为活动所输入的 PAHs 也远高于其他区域。并且历史上很多工业区均分布在这片区域内,历史工业生产

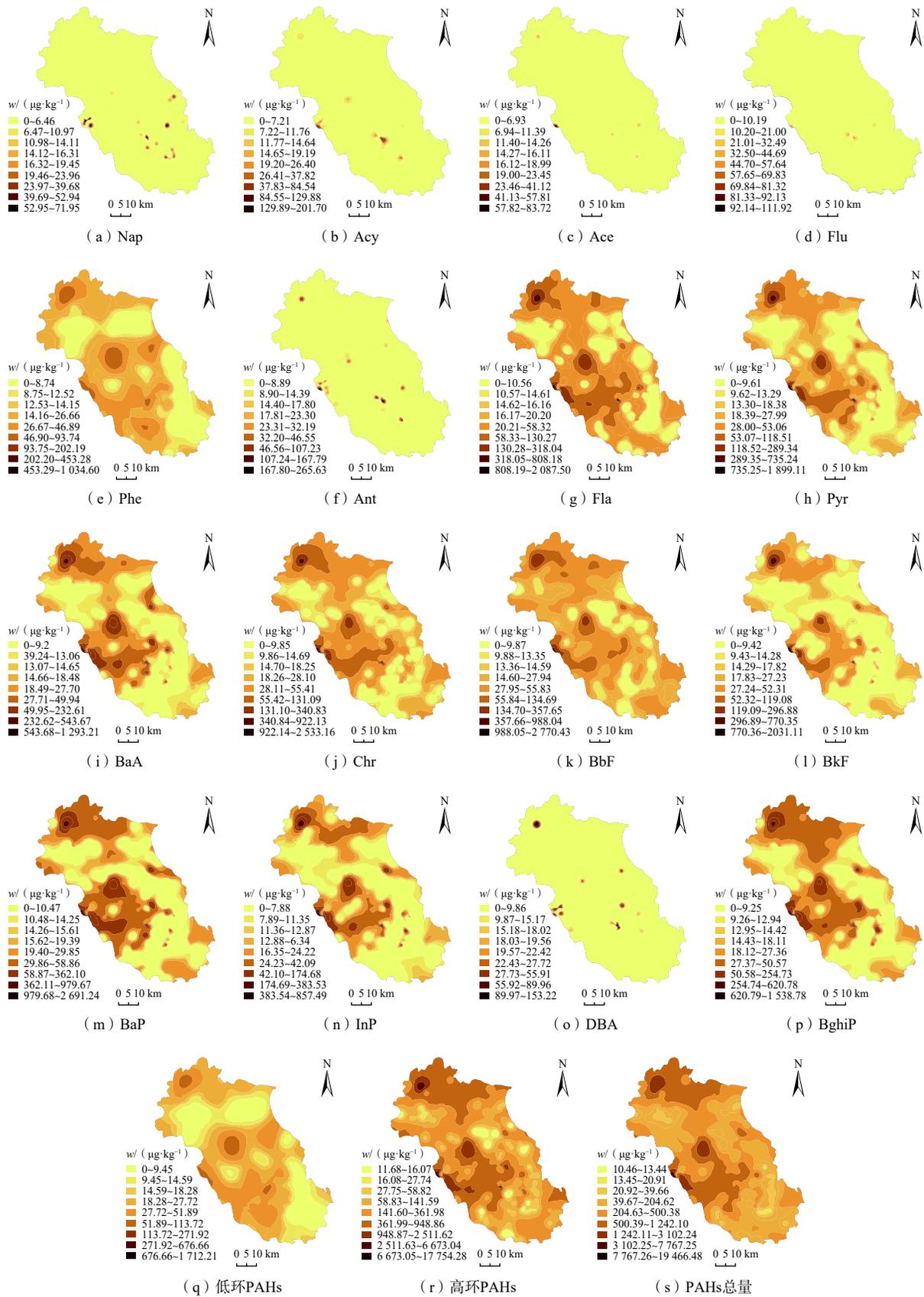


图3 土壤 PAHs 质量分数空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution map of soil PAHs mass fraction

活动导致大量裹挟着 PAHs 的粉尘被释放到周边环境并最终沉降到周边区域,造成了附近土壤不同程度的污染。此外,大多数高环 PAHs 在研究区的北部区域有明显富集,经查证此区域是北京市的重要铁路交通枢纽,推测这是导致研究区北部区域土壤中 PAHs 富集的重要影响因素。

研究区 216 件土壤样品按照土壤类型划分为城区土(6 件)、褐土(54 件)、水稻土(1 件)、潮土(151 件)、粗骨土(4 件),且可以明显看出北部及中西部 PAHs 质量分数高值分布区域的主要土壤类型为城区土及褐土,南部及东南部低值分布区域的主要土壤类型为潮土(图 1)。因此,推测不同的土壤类型对土壤中 PAHs 的分布存在一定程度的影响,主要表现为褐土中 PAHs 的质量分数高于潮土,这也与学者蔡婷<sup>[28]</sup>的研究成果相一致。已有相关研究证明,不同的土壤类型对土壤有机质的质量分数存在明显影响<sup>[29]</sup>,在自然植被下,褐土中有机质的质量分数为 1%~3%,潮土中有机质的质量分数通常在 1% 左右,而有机质在一定条件下能够吸附并固定土壤中的 PAHs<sup>[30]</sup>,从而影响着土壤中 PAHs 的质量分数、空间分布及归趋,这也是土壤类型能够影响土壤中 PAHs 分布的一个重要原因。

#### 4.4 土壤 PAHs 污染源分析

##### 4.4.1 同分异构体比值法判定污染源

确定土壤中 PAHs 的污染来源对于污染风险的评估和潜在污染的治理至关重要。不同来源的 PAHs,其产生的条件和机理均不同,相对质量分数、特定组

分之间的比值及各自呈现出的污染特征也存在差异,因此同分异构体比值法可用于分辨土壤中 PAHs 的来源,具体的 PAHs 质量分数比值及其来源判别依据<sup>[31-32]</sup>见表 4。

表 4 土壤 PAHs 质量分数比值及其来源

Table 4 Mass fraction ratio and sources of soil PAHs

比值	比值范围	来源
$w(\text{低环PAHs})/w(\text{高环PAHs})$	<1	燃烧源
	>1	石油源
$w(\text{Ant})/w(\text{Ant+Phe})$	<0.1	石油源
	>0.1	燃烧源
$w(\text{Fla})/w(\text{Fla+Pyr})$	<0.4	石油源
	0.4~0.5	液体化石燃料燃烧源
	>0.5	煤/生物质燃烧源
$w(\text{BaA})/w(\text{BaA+Chr})$	<0.2	石油源
	0.2~0.35	混合源
	>0.35	燃烧源
$w(\text{Pyr})/w(\text{BaP})$	<2	煤/生物质燃烧源
	2~6	液体化石燃料燃烧源

研究区土壤中低环 PAHs 占比 25.6%,高环 PAHs 占比 74.4%,低环 PAHs 与高环 PAHs 的比值为 0.34,表明燃烧源是研究区表层土壤中 PAHs 的主要来源,但主要由低环 PAHs 构成的石油源占比达 1/4,同样不可忽略。以  $w(\text{Fla})/w(\text{Fla+Pyr})$  为 X 轴,  $w(\text{Ant})/w(\text{Ant+Phe})$  为 Y 轴绘制散点图,对研究区表层土壤中 PAHs 的来源进行分析;再以  $w(\text{Pyr})/w(\text{BaP})$  为 X 轴,  $w(\text{BaA})/w(\text{BaA+Chr})$  为 Y 轴绘制散点图加以验证(图 4)。

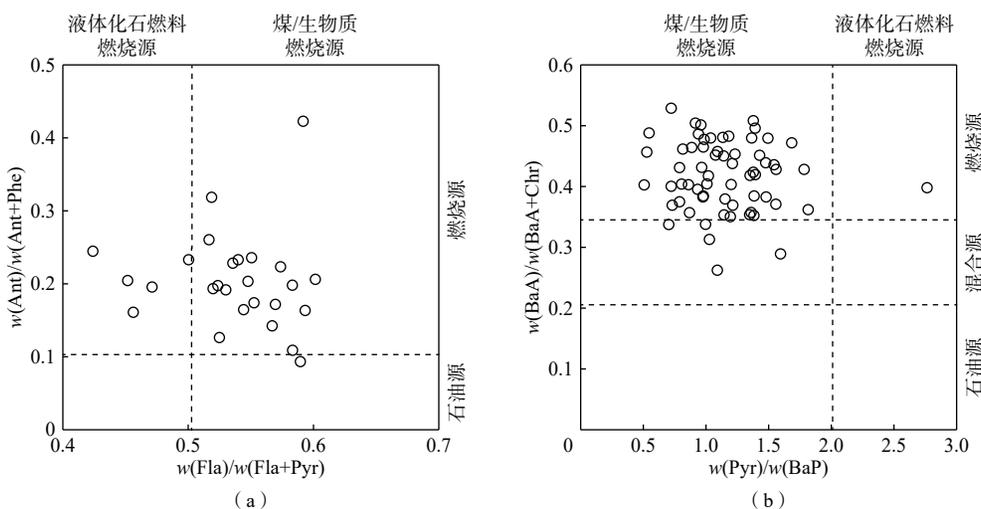


图 4 土壤 PAHs 质量分数比值  
Fig. 4 Mass fraction ratio of soil PAHs

如图 4 所示,研究区土壤样品中  $w(\text{Fla})/w(\text{Fla+Pyr})$  介于 0.38~0.60,有 93.97% 的样点比值大于 0.5;  $w(\text{Ant})/$

$w(\text{Ant+Phe})$  介于 0.09~0.42,有 96.15% 的样点比值大于 0.1;  $w(\text{Pyr})/w(\text{BaP})$  介于 0.51~2.76,有 96.43% 的样

点比值小于 2;  $w(\text{BaA})/w(\text{BaA}+\text{Chr})$  介于 0.26 ~ 0.53, 有 92.06% 的样点比值大于 0.35。

综合分析可知, 研究区表层土壤中 PAHs 的来源以煤/生物质燃烧源为主, 液体化石燃料燃烧源为辅。由于研究区冬季大多为燃煤取暖, 因此煤/生物质的燃烧是研究区表层土壤中 PAHs 的重要来源, 汽车尾气的排放则为研究区表层土壤中 PAHs 的另一来源。

#### 4.4.2 主成分分析-多元线性回归法判定污染源

采用主成分分析-多元线性回归法探析研究区土壤中 PAHs 污染物的可能来源, 结果见表 5。根据累积贡献率确定主成分分析的因子个数, 为确保原始变量的大部分信息被表达, 累积贡献率一般需大于 85%。

表 5 土壤 PAHs 主成分因子旋转载荷矩阵

Table 5 Rotation load matrix of the principal component factors of soil PAHs

PAHs	主成分1	主成分2
Nap	0.850	-0.026
Acy	0.744	0.562
Ace	0.716	0.563
Flu	0.761	0.406
Phe	0.900	0.339
Ant	0.903	0.019
Fla	0.990	-0.047
Pyr	0.985	0.042
BaA	0.973	-0.168
Chr	0.960	-0.250
BbF	0.955	-0.277
BkF	0.954	-0.278
BaP	0.960	-0.232
DBA	0.965	-0.180
InP	0.885	0.059
BghiP	0.958	-0.231
方差贡献率	82.42%	8.16%
累计方差贡献率	82.42%	90.58%

通过分析可知, 16 个 PAHs 单体包含的信息可以通过 2 个主成分因子来表达, 累计方差贡献率达 90.58%, 其中, 主成分 1 的方差贡献率为 82.42%, 主成分 2 的方差贡献率为 8.16%, 因此主成分 1 包含了原始数据的大部分信息, 对研究区土壤中 PAHs 的污染起主导作用。从表 5 可知, 16 种 PAHs 在主成分 1 上载荷均较高, 主成分 2 上除了 Acy、Ace、Flu 外, 其余 PAHs 的载荷均较低。根据学者 Mccready 等<sup>[33]</sup>的研究可知, 高环 PAHs 组分的主要来源为燃烧源、低环 PAHs 组分的主要来源为石油源。主成分 1 中载荷较高的既有低环组分, 也有高环组分, 主成分 2 中载荷较高的均为低环组分, 说明研究区土壤中 PAHs 的污染源

为混合源。

主成分 1 中 Fla、Pry、BaA、DBA、Chr、BaP、BghiP、BbF、BkF、Ant、Phe 的载荷系数均高达 0.9 以上, 其次为 Inp、Nap、Flu、Acy、Ace, 载荷系数均在 0.7 以上。多位学者的研究表明<sup>[34-38]</sup>, Fla、Pry、BaA、BaP、Ant、Phe、Flu 都是煤炭燃烧的特征排放物, 其中 Phe 及 Flu 主要产生于炼焦活动中; DBA、BbF、BkF、BghiP、InP 代表交通燃料的燃烧, 如柴油和汽油的燃烧; Ace 是焦炉排放的产物, 属于石油化工源; Nap、Acy 则都来源于石油泄漏。有研究表明<sup>[39]</sup>, 秸秆和木材的燃烧也会产生 Nap、Ant、Phe 等物质。因此主成分 1 主要代表了煤/生物质燃烧及交通燃烧的燃烧源。主成分 2 中只有 Ace、Acy、Flu 这 3 种 PAHs 组分的载荷系数超过 0.4。其中 Ace 属于石油化工源; Acy 来源于石油泄漏, 推测主成分 2 主要指示了石油源。

我国能源以燃煤为主, 北运河流域有着长久的冬季烧煤取暖的历史, 燃烧煤炭会导致大量 PAHs 以气体的形式被排放到周边的环境介质中, 因此这种大范围的、历史悠久的烧煤取暖现象是土壤中 PAHs 的重要来源。此外, 研究区内居民的日常生活, 如: 燃烧天然气及厨房油烟也会造成 PAHs 的累积<sup>[40]</sup>。

北运河流域位于京津唐工业基地, 是我国北方最大的综合性工业基地。工厂的工业活动需要消耗大量的煤炭及石油等化石燃料, 燃烧所产生的 PAHs 以气体的形式进入大气、土壤、水体等周边环境介质中, 严重影响了周边的生态环境。尤其位于研究区内的西郊某工业区和东南郊某工厂区旧址, 由于早年粗放的工业生产模式, 这些搬迁遗留工业场地内的土壤和地下水已经存在着不同程度的污染<sup>[40]</sup>, 因此, 研究区内个别点位呈现的岛状污染可能与此有关。

持续排放的汽车尾气是北运河流域土壤中 PAHs 的另一重要来源。查询《北京市统计年鉴》<sup>[41]</sup>可知, 2021 年末北京市机动车保有量为 685 万辆, 较 2020 年末净增加 28 万辆。北运河流域作为北京市人口最集中、产业最密集、城市化水平最高的流域, 路网密集, 车流量庞大, 不断排放的汽车尾气导致周边大气及土壤环境中 PAHs 的持续累积<sup>[42]</sup>, 因此汽车尾气的持续排放对研究区土壤中 PAHs 的作用也不容忽视。

根据主成分分析的结果, 以 2 个主成分因子为自变量 ( $X_1$ 、 $X_2$ ), PAHs 总量为因变量 ( $Y$ ) 进行多元线性回归, 建立回归模型:  $Y=450.972+1580.012X_1+192.179X_2$  (决定系数  $R^2=0.996$ ,  $P<0.05$ ), 标准化回归系数分别为  $P_{X_1}=0.991$ ,  $P_{X_2}=0.121$ 。由此可知, 煤/生物质的燃烧及

交通燃烧对研究区土壤中 PAHs 总量的贡献率为 89%，石油泄漏等石油化工源的贡献率为 11%。

## 5 结论

(1) 研究区 216 件土壤样品中 16 种 PAHs 均有检出，以高环 PAHs 组分为主，高环 PAHs 组分占 PAHs 总量的 74.4%，低环 PAHs 组分占 PAHs 总量的 25.6%。PAHs 总量范围为 10.5 ~ 19 466.5  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，中值为 83.5  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，受到污染的土壤样品占比约 29.63%。

(2) 16 种 PAHs 质量分数的空间趋势表现为：Nap、Acy、Ace、Flu 及 Ant 在各个方向上变化趋势不明显；Phe 在东西方向上先急剧升高，再急剧降低，在南北方向上变化平缓；Fla、Pyr、BaA、Chr、BkF、BaP、InP、BghiP、高环 PAHs、PAHs 总量在东西方向及南北方向均表现为先急剧升高再急剧降低，变化趋势明显。BbF、DBA、低环 PAHs 在东西方向及南北方向均表现为先平缓上升再平缓下降。

(3) 从空间分布特征来看，研究区土壤中 16 种 PAHs 的质量分数相差较大，总体表现为西北部和中西部地区 PAHs 质量分数相对较高，而中偏北部地区及东南部地区土壤相对较清洁。研究区内存在大范围的面源污染，个别点位 PAHs 富集，存在局部点源污染。

(4) 统计低环 PAHs 质量分数与高环 PAHs 质量分数的比值，初步判断研究区内土壤 PAHs 来源以燃烧源为主。运用同分异构体比值法绘制散点图，推断研究区土壤中 PAHs 的来源以煤/生物质的燃烧源为主、液体化石燃料的燃烧源为辅。主成分分析及多元线性回归的结果显示，研究区土壤中 PAHs 的来源主要为煤/生物质燃烧及交通燃烧的燃烧源，其次为石油化工泄漏的石油源，两者的贡献率分别为 89% 和 11%。

## 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 安永龙, 黄勇, 孙朝, 等. 北京通州某改造区土壤中 PAHs 的来源分析及风险评价[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(5): 112 - 120. [ AN Yonglong, HUANG Yong, SUN Zhao, et al. Source apportionment and risk assessment of PAHs in soil from a renewal area in the Tongzhou District of Beijing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5): 112 - 120. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 郭娜, 王金生, 翟远征, 等. 北京市平原区土壤中 PAHs 分布特征与来源分析[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(6): 110 - 115. [ GUO Na, WANG Jinsheng, ZHAI Yuanzheng, et al. Distribution and source analysis

of PAHs in the surface soil in the Beijing Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(6): 110 - 115. (in Chinese with English abstract) ]

- [ 3 ] 卢晓丽, 康翔, 魏宇宸, 等. 城乡结合带农田土壤多环芳烃空间分布特征及来源解析——以南京市周岗镇为例[J]. 土壤通报, 2021, 52(2): 286 - 296. [ LU Xiaoli, KANG Xiang, WEI Yuchen, et al. Spatial distribution and sources of PAHs in farmland soil of peri-urban areas: A case study of Zhougang, Nanjing[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(2): 286 - 296. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 刘增俊, 滕应, 黄标, 等. 长江三角洲典型地区农田土壤多环芳烃分布特征与源解析[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1110 - 1117. [ LIU Zengjun, TENG Ying, HUANG Biao, et al. Distribution and sources analysis of pahs in farmland soils in areas typical of the Yangtze River Delta, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(6): 1110 - 1117. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 黄勇, 王安婷, 袁国礼, 等. 北京市表层土壤中 PAHs 含量特征及来源分析[J]. 岩矿测试, 2022, 41(1): 54 - 65. [ HUANG Yong, WANG Anting, YUAN Guoli, et al. The content characteristics and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in topsoil of Beijing City[J]. Rock and Mineral Analysis, 2022, 41(1): 54 - 65. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 等. 城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评价[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5510 - 5518. [ ZHANG Xiuxiu, LU Xiaoli, WEI Yuchen, et al. Pollution characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in a suburban farmland soil[J]. Environmental Science, 2021, 42(11): 5510 - 5518. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 刘洋. “引温济潮”实现区域性水资源跨流域回补[J]. 北京规划建设, 2010(2): 71 - 74. [ LIU Yang. “Divert water from Wenyu River into Chaobai River” to realize regional water resources recharge across river basins [J]. Beijing Planning Review, 2010(2): 71 - 74. (in Chinese) ]
- [ 8 ] 荆红卫, 张志刚, 郭婧. 北京北运河水系水质污染特征及污染来源分析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(2): 319 - 327. [ JING Hongwei, ZHANG Zhigang, GUO Jing. Water pollution characteristics and pollution sources of Bei Canal River system in Beijing[J]. China Environmental Science, 2013, 33(2): 319 - 327. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 杨颖, 孙文, 刘吉宝, 等. 北运河流域沙河水库沉积物

- 重金属分布及生态风险评估[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1): 217 - 227. [ YANG Ying, SUN Wen, LIU Jibao, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Shahe Reservoir in Northern Canal Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(1): 217 - 227. (in Chinese with English abstract) ]
- [10] 陈永娟, 庞树江, 耿润哲, 等. 北运河水系主要污染物通量特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(7): 2167 - 2176. [ CHEN Yongjuan, PANG Shujiang, GENG Runzhe, et al. Fluxes of the main contaminant in Beiyun River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(7): 2167 - 2176. (in Chinese with English abstract) ]
- [11] 张家铭, 李炳华, 毕二平, 等. 北运河流域(北京段)沉积物中PAHs污染特征与风险评估[J]. 环境科学研究, 2019, 32(11): 1852 - 1860. [ ZHANG Jiaming, LI Binghua, BI Erping, et al. Pollutant characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediment of the North Canal Basin(Beijing section)[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(11): 1852 - 1860. (in Chinese with English abstract) ]
- [12] ZHANG Shiwei, LI Binghua, ZHANG Dasheng, et al. Distribution and risk assessment of PAHs in river water and groundwater in North Canal Basin of Beijing[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(1): 179 - 190.
- [13] 薛源. 北运河流域(北京段)多环芳烃的空间分布和逸度模拟[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015. [ XUE Yuan. Spatial distribution and multimedia fugacity environment behavior of PAHs in Beiyun River Basin of Beijing[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract) ]
- [14] 丁淮剑. 北运河流域沉积物重金属污染状况分析[D]. 北京: 首都师范大学, 2009. [ DING Huajian. Study of heavy meatal pollution of the sediment in Beiyunhe River in Beijing[D]. Beijing: Capital Normal University, 2009.(in Chinese with English abstract) ]
- [15] 孙久虎, 刘晓萌, 李佑钢, 等. 北运河地区植被覆盖的遥感估算及变化分析[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 97 - 99. [ SUN Jiuhu, LIU Xiaomeng, LI Yougang, et al. Estimation of vegetation fraction in Beiyunhe District by remote sensing[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(6): 97 - 99. (in Chinese with English abstract) ]
- [16] 田林锋, 罗桂林, 姜文娟, 等. 基于多元统计的宁夏典农河水水质演替特征探究[J]. 中国环境监测, 2023, 39(1): 128 - 136. [ TIAN Linfeng, LUO Guilin, JIANG Wenjuan, et al. Water quality succession of Diannong River in Ningxia based on multiple statistics[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2023, 39(1): 128 - 136. (in Chinese with English abstract) ]
- [17] 王昱, 卢世国, 冯起, 等. 黑河上中游水质时空分异特征及污染源解析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(10): 4194 - 4204. [ WANG Yu, LU Shiguo, FENG Qi, et al. Spatio-temporal characteristics and source identification of water pollutants in the upper and middle reachers of Heihe River[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(10): 4194 - 4204. (in Chinese with English abstract) ]
- [18] 宋旭, 高灯州, 曾从盛, 等. 基于GIS地统计学的海坛岛农田养分变异研究[J]. 实验室科学, 2017, 20(1): 25 - 28. [ SONG Xu, GAO Dengzhou, ZENG Congsheng, et al. Spatial variation of soil nutrient of the Haitan Island based on GIS and Geo-statistic[J]. *Laboratory Science*, 2017, 20(1): 25 - 28. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 安永龙, 万利勤, 李霞, 等. 承德市土壤重金属空间结构与分布特征[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 119 - 131. [ AN Yonglong, WAN Liqin, LI Xia, et al. Spatial structure and distribution characteristics of heavy metals in the soil in Chengde[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(6): 119 - 131. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] 安永龙, 杜子图, 黄勇, 等. 基于地统计学和GIS技术的北京市大兴区礼贤镇土壤养分空间变异性研究[J]. 现代地质, 2018, 32(6): 1311 - 1321. [ AN Yonglong, DU Zitu, HUANG Yong, et al. Spatial variation analysis of soil nutrients in Lixian Town of Daxing District in Beijing based on geostatistics and GIS[J]. *Geoscience*, 2018, 32(6): 1311 - 1321. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] 陈静, 王学军, 胡俊栋, 等. 多环芳烃(PAHs)在砂质土壤中的吸附行为[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1): 69 - 73. [ CHEN Jing, WANG Xuejun, HU Jundong, et al. Adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sand soils[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(1): 69 - 73. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量—建设用地土壤污染风险管控标准: GB36600—2018 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018. [ Ministry of Ecology and Environment, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of development land: GB36600—2018 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018. ]

- GB36600—2018[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018. (in Chinese) ]
- [23] EDWARDS N T. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the terrestrial environment : A review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1983, 12(4): 427 – 441.
- [24] MALISZEWSKA-KORDYBACH B, SMRECZAK B, KLIMKOWICZ-PAWLAS A, et al. Monitoring of the total content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in arable soils in Poland[J]. *Chemosphere*, 2008, 73(8): 1284 – 1291.
- [25] 陈卫锋, 倪进治, 杨红玉, 等. 闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(5): 1687 – 1692. [ CHEN Weifeng, NI Jinzhi, YANG Hongyu, et al. Spatial heterogeneity and autocorrelation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediment of Minjiang River in Fuzhou City[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(5): 1687 – 1692. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] 马瑾, 邱兴华, 周永章, 等. 东莞市农业土壤多环芳烃污染及其空间分布特征研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(1): 149 – 158. [ MA Jin, QIU Xinghua, ZHOU Yongzhang, et al. PAHs pollution and spatial distribution in agricultural soils of Dongguan[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(1): 149 – 158. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] 李秀梅, 周时学, 罗胜军, 等. 地统计学在生态学中的应用[J]. *现代农业科技*, 2014(13): 245. [ LI Xiumei, ZHOU Shixue, LUO Shengjun, et al. Application of geostatistics in ecology[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2014(13): 245. (in Chinese with English abstract) ]
- [28] 蔡婷. 土壤类型对多环芳烃吸附性能的影响[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017. [ CAI Ting. The influence of soil type on PAHs adsorption properties[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] 李随云, 杨飞, 杨载熙, 等. 京山市钱场—新市两镇表层土壤有机质含量分布及影响因素[J]. *资源环境与工程*, 2021, 35(2): 179 – 181. [ LI Suiyun, YANG Fei, YANG Zaixi, et al. Distribution of topsoil organic matter content in Qianchang – Xinshi Towns in Jingshan City and its influencing factors[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2021, 35(2): 179 – 181. (in Chinese with English abstract) ]
- [30] 孙军亚. 多环芳烃在藏东南森林土壤中的分布、迁移及其生态风险评价[D]. 天津: 天津理工大学, 2019. [ SUN Junya. Distribution and migration and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in forest soils in southeast Tibet[D]. Tianjin : Tianjin University of Technology, 2019.(in Chinese with English abstract) ]
- [31] 吴萌, 段永红, 何佳璘, 等. 北方地区表层土壤中PAHs的含量及来源分析[J]. *山西农业科学*, 2021, 49(3): 311 – 317. [ WU Meng, DUAN Yonghong, HE Jialin, et al. Content and source analysis of PAHs in surface soil of Northern China[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2021, 49(3): 311 – 317. (in Chinese with English abstract) ]
- [32] 赵振华, 全文熠, 田德海, 等. 多环芳烃的环境健康化学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993. [ ZHAO Zhenhua, QUAN Wenyi, TIAN Dehai, et al. Environmental health chemistry of PAHs[M]. Beijing: Science and technology of China press, 1993. (in Chinese) ]
- [33] MCCREADY S, SLEE D J, BIRCH G F, et al. The distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surficial sediments of Sydney Harbour, Australia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40(11): 999 – 1006.
- [34] SIMCIK M F, EISENREICH S J, LIOY P J. Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(30): 5071 – 5079.
- [35] LARSEN R K, BAKER J E. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: A comparison of three methods[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(9): 1873 – 1881.
- [36] JIANG Yufeng, WANG Xuetong, WANG Fei, et al. Levels, composition profiles and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soil of Shanghai, China[J]. *Chemosphere*, 2009, 75(8): 1112 – 1118.
- [37] MURAKAMI M, NAKAJIMA F, FURUMAI H. Size- and density-distributions and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road dust[J]. *Chemosphere*, 2005, 61(6): 783 – 791.
- [38] BOONYATUMANOND R, WATTAYAKORN G, TOGO A, et al. Distribution and origins of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in riverine, estuarine, and marine sediments in Thailand[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, 52(8): 942 – 956.
- [39] 江淼华, 徐素云, 许辰森, 等. 城市绿地表层土壤中PAHs的来源及风险评估——以福州市鼓楼区为例[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2015, 10(3): 11 – 16.

- [ JIANG Miaohua, XU Suyun, XU Chensen, et al. Sources and risk assessment of PAHs in surface soil from urban green lands: A case of Gulou District, Fuzhou, China[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2015, 10(3): 11 - 16. (in Chinese with English abstract) ]
- [40] 刘芬芬,孙小华,丁力,等.搬迁企业原址场地土壤挥发性有机物污染特征——以北京某搬迁化工厂为例[J].城市地质,2021,16(1):18-24. [ LIU Fenfen, SUN Xiaohua, DING Li, et al. Characteristics of soil volatile organic compound pollution in the original site of relocated enterprises: A case study of a relocated chemical plant in Beijing[J]. Urban Geology, 2021, 16(1): 18 - 24. (in Chinese with English abstract) ]
- [41] 北京市统计局,国家统计局北京调查总队.北京统计年鉴-2021[M].北京:中国统计出版社,2022. [ Beijing Municipal Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Beijing. Beijing statistical yearbook-2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022. (in Chinese) ]
- [42] 段海静.路域环境多介质PAHs污染与综合健康风险分析——以G310和G30郑开段为例[D].开封:河南大学,2016. [ DUAN Haijing. Pollution and comprehensive health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in roadside multiple medias: A case study of 310th national highway and 30th highway[D]. Kaifeng: Henan University, 2016. (in Chinese with English abstract) ]

编辑:宗爽