

# 中国多环芳烃(PAHs)污染特征与风险评价研究进展

车宗太

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2026年2月5日; 录用日期: 2026年3月3日; 发布日期: 2026年3月12日

## 摘要

多环芳烃(PAHs)广泛存在于环境中, 主要是由于化石燃料和生物质的不完全燃烧、排放工业废气等形成。文章总结了我国大气、水体、沉积物、土壤中PAHs的分布、来源和风险评价的研究现状。由PAHs的分布特点来看, 北方大气采暖期PAHs污染浓度高于南方, 城市、工矿区的污染更严重于农村、郊区; 水体中PAHs沉淀物主要是中高环的PAHs, 与工业构成、城市化水平相关; 土壤中PAHs在工业区、交通区、老城区的含量高; 分布来源分析表明: 燃煤、生物质燃烧、机动车排放和工业燃烧是我国PAHs的主要来源。基于风险评价的结果, 大部分地区生态风险级别较低或较低, 局部高污染地区存在健康及致癌风险, 目前监测方法标准化、数据整合、多介质生态过程等方面还比较欠缺。未来的工作需要加强长期动态观测, 分析各种区域来源, 也要加强健康风险评估, 并最终为我国PAHs污染防控对策提供依据。

## 关键词

多环芳烃, 环境污染, 来源解析, 生态风险评价

## Research Progress on Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in China

Zongtai Che

School of Geographical Sciences, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

## Abstract

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) are widely present in the environment, primarily formed through the incomplete combustion of fossil fuels and biomass, as well as industrial emissions. This article summarizes the current research status on the distribution, sources, and risk assessment of PAHs in China's atmosphere, water bodies, sediments, and soils. Regarding the distribution characteristics, PAH concentrations in the atmosphere during the heating period are higher in northern China than in the south, and pollution levels in urban and industrial-mining areas are more severe than in rural and suburban regions. Sediments in water bodies are predominantly composed of medium- to high-ring PAHs, which correlate with industrial structure and urbanization levels. Soil PAH concentrations are elevated in industrial zones, transportation hubs, and old urban areas. Source analysis indicates that coal combustion, biomass burning, vehicle emissions, and industrial combustion are the primary contributors to PAHs in China. Risk assessment results show that ecological risks in most regions are low to moderate, while localized heavily polluted areas exhibit potential health and carcinogenic risks. Currently, there are shortcomings in the standardization of monitoring methods, data integration, and understanding of multi-media ecological processes. Future efforts should focus on enhancing long-term dynamic monitoring, conducting multi-scale source analysis, strengthening health risk assessments, and ultimately providing a scientific basis for PAH pollution prevention and control strategies in China.

## Keywords

PAHs, Environmental Pollution, Source Identification, Ecological Risk Assessment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

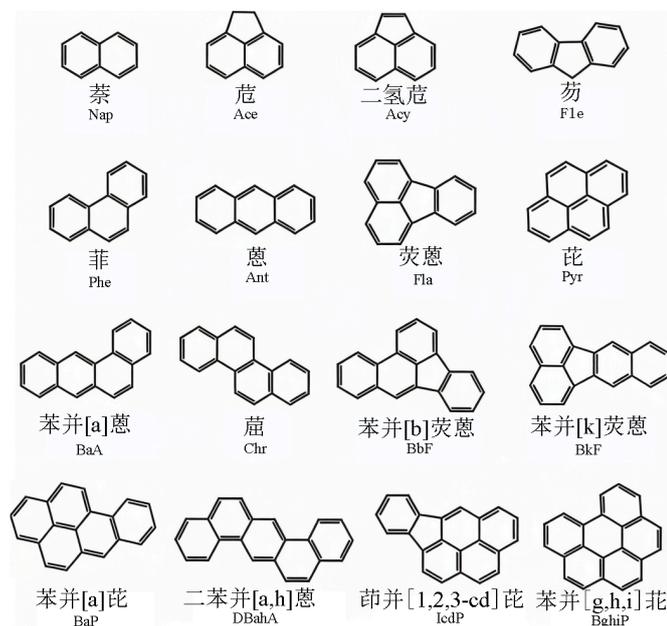


Open Access

## 1. 引言

多环芳烃(PAHs)是一类含有两个或两个以上稠环的芳香烃类化合物,主要由化石燃料和生物质的不完全燃烧产物产生[1]。由于其致癌、致畸和致突变等危害,美国环境保护署已将其列为“重点管控污染物”[2]主要有16种优先管控物(图1)。这类物质在环境介质中普遍存在,因其对生态系统和人类健康造成的毒性影响,长期以来一直备受人们的关注[3][4]。我国是全球能源消费和工业生产大国,受煤炭燃烧、机动车尾气排放、生物质焚烧以及石油相关活动等人为源显著,加之区域发展不平衡,使得PAHs污染呈现出明显的区域差异。因此,对我国PAHs的污染特征、来源及风险进行系统评价与梳理,对于深入了解其污染特征并制定针对性的防控策略具有重要意义。

本研究基于Web of Science Core Collection与CNKI数据库,以“polycyclic aromatic hydrocarbons(多环芳烃)”“PAHs”“China(中国)”等为关键词,系统检索2010~2025年间发表的相关文献,重点筛选发表于Environmental Science & Technology、Science of the Total Environment、Environmental Pollution和Ecological Indicators等主流期刊的研究成果。根据研究区域将文献划分为东北、华北、华东、华南、西北和西南六大区域,并按环境介质类型(大气、水体、沉积物和土壤)进行分类整理,为区域对比分析提供统一的数据基础。



**Figure 1.** Nomenclature and molecular structures of sixteen optimized Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)  
**图 1.** 十六种优控 PAHs 的命名和分子结构

## 2. 中国 PAHs 的污染特征

PAHs 在不同环境介质中的分布特征受排放源类型、理化性质、环境条件及人类活动强度等多种因素共同影响。根据所检索的文献，提取不同区域多环芳烃浓度，总结出中国不同区域多介质 PAHs 浓度统计特征(表 1)。总体而言，我国 PAHs 污染水平呈现出 PAH 总浓度依东北 > 北 > 东 > 南 > 西方向下降、城市高于农村、工业区和交通区高于受人类活动影响较少区域的空间分布格局[5] [6]。

表 1 系统统计了我国不同区域、不同介质的 PAHs 浓度数据，为更直观体现区域污染差异，将各区域统一介质的浓度均值进行可视化处理，绘制各区域 PAHs 浓度对比柱状图(图 2)，从图形维度进一步印证了我国 PAHs 污染北高南低、东高西低，城市、工业区高于农村、郊区的空间分布特征。

**Table 1.** Concentration of PAHs in different environmental media

**表 1.** 不同环境介质中多环芳烃的浓度

位置	采样点数	采样类型	范围( $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )	平均值( $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )	参考文献
东北	143	辽宁农业土壤	50~3309	388	(Cao <i>et al.</i> , 2013) [7]
	66	沈阳工业区土壤	290.9~8492.37	2988	(Sun <i>et al.</i> , 2013) [8]
	40	湖泊沉积物	590~638	614	(Lin <i>et al.</i> , 2012) [9]
华北	73	北京乡村土壤	37.5~1245.9	219.2	(Peng <i>et al.</i> , 2016) [10]
	233	北京城市土壤	93~13141	1228	(Peng <i>et al.</i> , 2011) [11]
	24	海河系统沉积物	259~11297	1692	(Liu <i>et al.</i> , 2013) [12]
	44~287	北方大气污染物	6.3~2180	239 ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )	(Ma <i>et al.</i> , 2018) [13]
华东	57	上海城市土壤	83.8~7270	1970	(Wang <i>et al.</i> , 2013) [14]
	33	上海农业土壤	24.92~1014.61	193	(吕金刚等., 2012) [15]
	32	太湖沉积物	1381~4682	3032	(Lang <i>et al.</i> , 2022) [16]

续表

华南	188	深圳城市土壤	2~6745	360	(Zhang <i>et al.</i> , 2016) [17]
	115	农业土壤	22.1~1256.9	318.2	(Hao <i>et al.</i> , 2007) [18]
	34	北江中上游沉积物	60~636	209	(昌盛等, 2022) [19]
	76	珠江三角洲大气	3.56~37.2	19.58 (ng/m <sup>3</sup> )	(Zhang <i>et al.</i> , 2018) [20]
西部	40	昆明城市土壤	101.64~6208.25	1133	(Lin <i>et al.</i> , 2013) [21]
	59	农业菜园土壤	16.68~1938.33	210	(Wang <i>et al.</i> , 2015) [22]
	18	洱海湖泊沉积物	940~2539	1635	(Huang <i>et al.</i> , 2023) [23]
青藏地区	44	草原土壤	0.43~26.66	9.21	(Yuan <i>et al.</i> , 2015) [24]

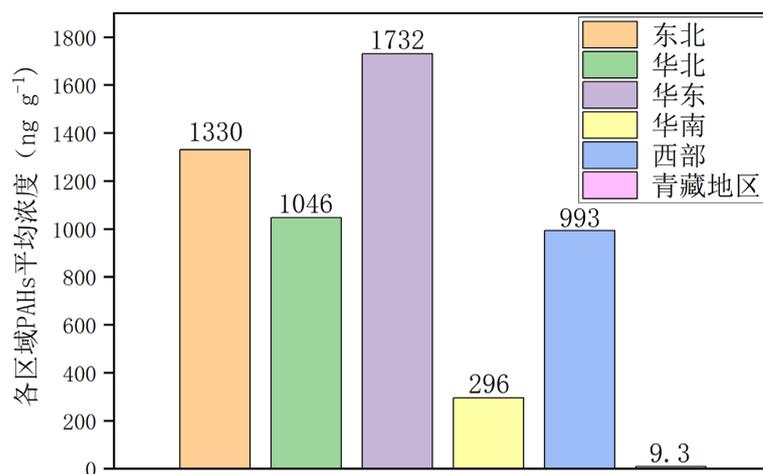


Figure 2. Column chart of PAHs concentration in each region  
图 2. 各区域 PAHs 浓度柱状图

## 2.1. 土壤环境中的 PAHs

土壤是多环芳烃(PAHs)重要的环境介质之一。PAHs 进入土壤可以从多种途径进行,例如大气沉降、污水灌溉、固体废物堆放以及农业活动(如施用污染化肥)等过程, PAHs 存在于土壤中。我国农地、建设用地、工业用地土壤中均不同程度地存在着 PAHs 污染。近年来的农田、建设用地、工业用地土壤中均发现不同程度的 PAHs 污染。研究发现:工业污染区、焦化厂周围、高速公路地区和老旧城区土壤中 PAHs 含量高于其他地区[25]-[27]。在区域尺度上,沈阳工业区土壤 PAHs 均值达 2988 ng·g<sup>-1</sup>, 远超《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600-2018)中建设用地筛选值(1500 ng·g<sup>-1</sup>), 而青藏地区草原土壤 PAHs 均值仅 9.21 ng·g<sup>-1</sup>, 处于背景值水平。农村农业土壤 PAHs 浓度普遍低于城市土壤, 如上海农业土壤 PAHs 均值(193 ng·g<sup>-1</sup>)仅为城市土壤(1970 ng·g<sup>-1</sup>)的 9.8%。

整体来看, 东、西部沿海及北方工业密集地区 PAHs 污染情况高于中部和西部地区。从 PAHs 污染的组成特征来看, 土壤中高环占比较高, 表明其污染主要来源于高温燃烧过程; 此类 PAHs 具有更强的环境持久性与潜在毒性。

## 2.2. 大气环境中的 PAHs

大气是 PAHs 迁移和扩散的重要载体, 在我国大气中 PAHs 存在形式主要是气态和颗粒态。已有研究发现, 低环 PAHs (2~3 环)比较易存在于大气的气态部分, 高环 PAHs (4~6 环)大都吸附在 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>

等颗粒物上[28]。时间上,我国北方地区采暖期因燃煤采暖活动加剧,大气 PAHs 浓度显著高于非采暖期,如北方大气 PAHs 均值达 239 ng/m<sup>3</sup>,是珠江三角洲大气 PAHs 均值(19.58 ng/m<sup>3</sup>)的 12.2 倍。我国北方地区在采暖季节由于燃煤等采暖活动加剧,大部分时间段大气中 PAHs 的浓度大于非采暖季节的浓度;南方地区主要是受机动车尾气排放和一些工业燃烧的影响[29][30]。空间上,城区、交通干道和工业区大气 PAHs 的浓度大于郊地区以及较少人类活动干扰区。长期暴露在高浓度的颗粒相 PAHs 会使呼吸系统疾病和致癌风险增加,大气 PAHs 一直是我国城市空气污染的热点问题。

### 2.3. 水体与沉积物中的 PAHs

水体中的 PAHs 可通过大气沉降、地表径流、污水排放等途径进入河流、湖泊和近海环境。由于 PAHs 疏水性强,其在水体中的溶解度较低,易被悬浮颗粒物吸附并最终沉积于底泥中,因此沉积物常被视为 PAHs 的“汇”[31]。我国多条典型河流域(如长江、黄河、珠江等)的研究结果表明,沉积物中 PAHs 以中高环组分为主,其污染水平与流域内工业结构、人口密度和城市化程度密切相关[32][33]。部分湖泊和河口区域沉积物中 PAHs 含量已达到中度甚至重度污染水平,可能对底栖生物群落结构和水生态系统稳定性产生不利影响。部分湖泊和河口区域 PAHs 含量已达到中度甚至重度污染水平,可能对底栖生物和水生态系统造成不利影响。

## 3. PAHs 的来源解析

来源解析是理解 PAHs 污染成因与迁移过程的重要手段。我国土壤中 PAHs 的主要来源可分为石油源与燃烧源两大类,其中燃烧源贡献居于主导地位。目前常用的来源解析方法主要包括特征比值法、主成分分析(PCA)及正定矩阵因子分解(PMF)模型等。已有研究普遍表明,煤炭与生物质燃烧、机动车尾气排放以及工业燃烧过程是我国 PAHs 的主要贡献源。具体而言,在城市地区,交通源贡献呈上升趋势;而在农村及以煤炭为主要能源结构的区域,燃煤与生物质燃烧仍为主导来源。

## 4. PAHs 的风险评价研究

### 4.1. 毒性当量因子法(TEQ)

毒性当量(TEQ)是一种普遍用于评估有害物质对生态环境潜在危害的生态风险评估方法。通过计算化学物质的相对毒性当量,该方法能够评估一系列污染物的毒性水平[34]。苯并[a]芘(BaP)是国际公认的致癌物,在医学领域通常被用作多环芳烃(PAHs)致癌物的代表[35]。通常以 BaP 作为参照物,通过将其他 PAH 单体浓度乘以其相对于 BaP 的毒性当量因子来计算各 PAH 单体的毒性当量(TEQ)。随后将所有 PAH 单体的毒性当量相加,即可得到总毒性当量(TEQ)。其计算公式如下:

$$TEQ_{BaP} = \sum C_i \times TEF_i$$

其中,TEF<sub>i</sub>是单个多环芳烃的毒性当量因子,C<sub>i</sub>是单个多环芳烃的含量,TEQ 是基于 BaP 的毒性当量总和。

### 4.2. 风险熵值法(RQ)

风险商数法(RQ)通常用于评估环境有机物污染的生态风险。参照卡尔夫等人 and 曹志国等人的研究方法[36][37],RQ 值被划分为两类:可忽略风险浓度(NCs)和最大容许浓度(MPCs),从而判定相应的生态风险等级。具体计算方法如下:

$$RQ_{(NCs)} = \frac{C_{PAHs}}{C_{QV(NCs)}}$$

$$RQ_{(MPCs)} = \frac{C_{PAHs}}{C_{QV(MPCs)}}$$

其中, RQ 为风险商数,  $C_{PAHs}$  为多环芳烃实测浓度;  $RQ_{(NCs)}$  为可忽略浓度商数,  $C_{QV(NCs)}$  为可忽略浓度标准值;  $RQ_{(MPCs)}$  为最大允许浓度商数,  $C_{QV(MPCs)}$  为最大允许浓度标准值。

### 4.3. 增量终生癌症风险(ILCR)

增量终生癌症风险(ILCR)目前被广泛用作衡量和评估特定致癌物对人体致癌风险的指标。土壤中的多环芳烃可通过误食、呼吸或皮肤接触进入人体, 构成致癌风险。不同暴露途径下, 不同年龄段人群(成人与儿童)的健康风险值存在显著差异。具体计算方法如下[38]:

$$ILCR_{Dermal} = \frac{C_S \times \left( CSF_{Dermal} \times \sqrt[3]{\frac{BW}{70}} \right) \times SA \times ABS \times AF \times EF \times ED}{BW \times AT \times 10^6}$$

$$ILCR_{Ingestion} = \frac{C_S \times \left( CSF_{Ingestion} \times \sqrt[3]{\frac{BW}{70}} \right) \times IR_{Soil} \times EF \times ED}{BW \times AT \times 10^6}$$

$$ILCR_{Inhalation} = \frac{C_S \times \left( CSF_{Inhalation} \times \sqrt[3]{\frac{BW}{70}} \right) \times IR_{Air} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF}$$

其中,  $C_S$  表示致癌污染物含量(单位: 纳克/克),  $CSF_{Dermal}$  为皮肤接触系数,  $CSF_{Ingestion}$  为摄入系数,  $CSF_{Inhalation}$  为吸入系数, BW 代表平均体重, AF 指土壤附着系数, SA 是暴露皮肤面积, ABS 为皮肤吸收系数,  $IR_{Soil}$  为土壤摄入率,  $IR_{Air}$  为吸入率, EF 为暴露频率, ED 为暴露持续时间, AT 为平均寿命, PEF 为颗粒物排放系数(单位:  $m^3$  千克<sup>-1</sup>)。

人体总致癌风险为各暴露途径 ILCR 值之和, 美国 EPA 规定, ILCR 值  $< 10^{-6}$  时, 致癌风险可忽略;  $10^{-6} \leq ILCR$  值  $< 10^{-4}$  时, 存在可接受的致癌风险; ILCR 值  $\geq 10^{-4}$  时, 存在显著的致癌风险。目前我国 PAHs 人体致癌风险评估多采用美国 EPA 默认参数, 而中国本土人群的暴露参数(如体重、土壤摄入率、暴露频率等)与欧美人群存在显著差异, 直接采用 EPA 参数可能会导致评估结果存在一定偏差。

## 5. 存在问题与研究展望

近年来, 我国 PAHs 污染特征、来源、风险评价方面的研究取得了很大进展, 但仍有很多问题需要进一步完善。首先, 由于不同的研究在采样点设定、分析方法、污染物选择上缺乏统一性, 许多研究结论难以比对, 导致研究体系难以整合; 其次, 目前的大部分研究比较单一环境介质中 PAHs 的研究, 对 PAHs 在众多环境介质间的迁移转化尚缺乏系统性认知。目前风险评价方面大部分研究都采用同样的参数进行风险对人体健康影响的估算, 并未考虑不同地域的人群之间的不同生活习惯、暴露行为方面存在差异从而进行参数修改。此外, 复合污染场所中不同污染物的复合多污染物风险在现有的风险评价里也未能得到充分反映。未来研究应加强各种监测数据的研究, 结合高分辨率来源解析模型与不确定性量化方法, 系统阐明 PAHs 的环境形成与积累过程以及风险评价方式。同时, 应着力推动科研成果向环境管理及政策制定的有效转化, 进而为我国 PAHs 污染防控与风险管控提供科学依据。

## 6. 结论

总体而言, 多环芳烃在我国不同环境介质中普遍存在, 在不同的环境介质与区域之中其污染水平与

风险特征都存在不同。我国 PAHs 主要来源于燃煤、生物质燃烧、机动车尾气及工业排放等燃烧过程。已有研究表明, 大部分地区 PAHs 的生态风险处于低至中等水平, 但仍存在部分受高等污染的区域, 其对于当地健康风险与致癌风险仍值得持续关注。通过系统开展当地 PAHs 的污染特征识别、来源解析与风险评估研究, 可为我国环境污染物防控与风险管理提供科学支撑。未来应进一步开展多介质、多过程的综合研究, 以推动我国 PAHs 污染从宏观监测向精细化管控的深化发展。

## 参考文献

- [1] Hrdina, A.I.H., Kohale, I.N., Kaushal, S., Kelly, J., Selin, N.E., Engelward, B.P., *et al.* (2022) The Parallel Transformations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Body and in the Atmosphere. *Environmental Health Perspectives*, **130**, Article ID: 025004. <https://doi.org/10.1289/ehp9984>
- [2] Ramírez, N., Cuadras, A., Rovira, E., Marcé, R.M. and Borull, F. (2011) Risk Assessment Related to Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Gas and Particle Phases near Industrial Sites. *Environmental Health Perspectives*, **119**, 1110-1116. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002855>
- [3] Yao, Z., Zhao, T., Su, W., You, S. and Wang, C. (2022) Towards Understanding Respiratory Particle Transport and Deposition in the Human Respiratory System: Effects of Physiological Conditions and Particle Properties. *Journal of Hazardous Materials*, **439**, Article ID: 129669. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129669>
- [4] Jesus, F., Pereira, J.L., Campos, I., Santos, M., Ré, A., Keizer, J., *et al.* (2022) A Review on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Distribution in Freshwater Ecosystems and Their Toxicity to Benthic Fauna. *Science of the Total Environment*, **820**, Article ID: 153282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153282>
- [5] Zhang, P. and Chen, Y. (2017) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contamination in Surface Soil of China: A Review. *Science of the Total Environment*, **605**, 1011-1020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.247>
- [6] Wang, Z., Chen, J., Qiao, X., Yang, P., Tian, F. and Huang, L. (2007) Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Urban to Rural Soils: A Case Study in Dalian, China. *Chemosphere*, **68**, 965-971. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.01.017>
- [7] Cao, X.F., Liu, M., Song, Y.F. and Ackland, M.L. (2012) Composition, Sources, and Potential Toxicology of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Agricultural Soils in Liaoning, People's Republic of China. *Environmental Monitoring and Assessment*, **185**, 2231-2241. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2704-z>
- [8] Sun, L., Geng, Y., Sarkis, J., Yang, M., Xi, F., Zhang, Y., *et al.* (2013) Measurement of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in a Chinese Brownfield Redevelopment Site: The Case of Shenyang. *Ecological Engineering*, **53**, 115-119. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.023>
- [9] Lin, T., Qin, Y., Zheng, B., Li, Y., Zhang, L. and Guo, Z. (2012) Sedimentary Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Reservoir in Northeast China. *Environmental Pollution*, **163**, 256-260. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.01.005>
- [10] Peng, C., Wang, M., Zhao, Y. and Chen, W. (2016) Distribution and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Suburban and Rural Soils of Beijing with Various Land Uses. *Environmental Monitoring and Assessment*, **188**, Article No. 162. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5156-z>
- [11] Peng, C., Chen, W., Liao, X., Wang, M., Ouyang, Z., Jiao, W., *et al.* (2011) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Soils of Beijing: Status, Sources, Distribution and Potential Risk. *Environmental Pollution*, **159**, 802-808. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.11.003>
- [12] Liu, F., Liu, J., Chen, Q., Wang, B. and Cao, Z. (2013) Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of the Southern Part of the Haihe River System in China. *Chinese Science Bulletin*, **58**, 3348-3356. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-5677-6>
- [13] Ma, W., Liu, L., Jia, H., Yang, M. and Li, Y. (2018) PAHs in Chinese Atmosphere Part I: Concentration, Source and Temperature Dependence. *Atmospheric Environment*, **173**, 330-337. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.029>
- [14] Wang, X., Miao, Y., Zhang, Y., Li, Y., Wu, M. and Yu, G. (2013) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Soils of the Megacity Shanghai: Occurrence, Source Apportionment and Potential Human Health Risk. *Science of the Total Environment*, **447**, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.086>
- [15] 吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 等. 上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(12): 4270-4275.
- [16] Lang, X., He, X., Wang, Y., Chen, X., Zhang, M., Zhao, Z., *et al.* (2022) Spatial Occurrence and Sources of PAHs in Sediments Drive the Ecological and Health Risk of Taihu Lake in China. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 3668. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07507-7>

- [17] Zhang, D., Wang, J. and Zeng, H. (2016) Soil Polycyclic Aromatic Hydrocarbons across Urban Density Zones in Shenzhen, China: Occurrences, Source Apportionments, and Spatial Risk Assessment. *Pedosphere*, **26**, 676-686. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(15\)60076-5](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(15)60076-5)
- [18] Hao, R., Wan, H., Song, Y., Jiang, H. and Peng, S. (2007) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils of the Southern Subtropics, China. *Pedosphere*, **17**, 673-680. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(07\)60081-2](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(07)60081-2)
- [19] 昌盛, 白云松, 涂响, 等. 北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估[J]. 环境科学, 2022, 43(12): 5534-5546.
- [20] Zhang, J., Zhao, J., Cai, J., Gao, S., Li, J., Zeng, X., *et al.* (2018) Spatial Distribution and Source Apportionment of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Pearl River Delta, China. *Atmospheric Pollution Research*, **9**, 887-893. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.02.004>
- [21] Lin, C., Liu, J., Wang, R., Wang, Y., Huang, B. and Pan, X. (2013) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils of Kunming, China: Concentrations, Distribution, Sources, and Potential Risk. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, **22**, 753-766. <https://doi.org/10.1080/15320383.2013.768201>
- [22] Wang, C., Wu, S., Zhou, S., Wang, H., Li, B., Chen, H., *et al.* (2015) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Urban to Rural Areas in Nanjing: Concentration, Source, Spatial Distribution, and Potential Human Health Risk. *Science of the Total Environment*, **527**, 375-383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.025>
- [23] Huang, T., Zhou, J., Luo, D., Li, S., Yang, H., Huang, C., *et al.* (2023) Sediment Record in Pollution, Toxicity Risk, and Source Assignment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Erhai Lake, Southwest China. *Marine Pollution Bulletin*, **186**, Article ID: 114424. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114424>
- [24] Yuan, G., Wu, L., Sun, Y., Li, J., Li, J. and Wang, G. (2015) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of the Central Tibetan Plateau, China: Distribution, Sources, Transport and Contribution in Global Cycling. *Environmental Pollution*, **203**, 137-144. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.04.002>
- [25] 赵涵, 赵军, 徐晓晔, 等. 快速城市化地区土壤多环芳烃的空间分布及来源: 以深圳市为例[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(1): 38-45.
- [26] 张守文, 李咏梅, 王彩, 等. 焦化厂污染土壤中 18 种 PAHs 分布特征及健康风险评估[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(2): 266-275.
- [27] Xie, T., Wang, M., Jiang, R., Li, L., Chen, X., Sarvajayakesavalu, S., *et al.* (2024) Comparative Study on Anthropogenic Impacts on Soil PAHs: Accumulation and Source Apportionment in Tourist and Industrial Cities in Hebei Province, China. *Science of the Total Environment*, **912**, Article ID: 168435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168435>
- [28] Chimjarn, S., Delhomme, O. and Millet, M. (2021) Temporal Distribution and Gas/Particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Atmosphere of Strasbourg, France. *Atmosphere*, **12**, Article 337. <https://doi.org/10.3390/atmos12030337>
- [29] Ma, W., Li, Y., Qi, H., Sun, D., Liu, L. and Wang, D. (2010) Seasonal Variations of Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) to a Northeastern Urban City, China. *Chemosphere*, **79**, 441-447. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.01.048>
- [30] Liu, J., Man, R., Ma, S., Li, J., Wu, Q. and Peng, J. (2015) Atmospheric Levels and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Bound to PM<sub>2.5</sub> in Guangzhou, China. *Marine Pollution Bulletin*, **100**, 134-143. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.014>
- [31] Zhang, X., Yao, Z., Yang, W., Zhang, W., Liu, Y., Wang, Z., *et al.* (2024) Distribution, Sources, Partition Behavior and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Waters and Sediments of Lake Ulansuhai, China. *Marine Pollution Bulletin*, **200**, Article ID: 116072. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116072>
- [32] Hui, Y., Zheng, M., Liu, Z. and Gao, L. (2009) Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sediments from Yellow River Estuary and Yangtze River Estuary, China. *Journal of Environmental Sciences*, **21**, 1625-1631. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(08\)62465-1](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(08)62465-1)
- [33] 吉冰静, 刘艺, 吴杨, 高淑涛, 曾祥英, 于志强. 长江口及邻近东海沉积物中多环芳烃和含氧多环芳烃的分布特征、来源及生态风险[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1400-1408.
- [34] Sarria-Villa, R., Ocampo-Duque, W., Páez, M. and Schuhmacher, M. (2016) Presence of PAHs in Water and Sediments of the Colombian Cauca River during Heavy Rain Episodes, and Implications for Risk Assessment. *Science of The Total Environment*, **540**, 455-465. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.020>
- [35] Li, G., Lang, Y., Yang, W., Peng, P. and Wang, X. (2014) Source Contributions of PAHs and Toxicity in Reed Wetland Soils of Liaohe Estuary Using a CMB-TEQ Method. *Science of the Total Environment*, **490**, 199-204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.001>
- [36] Kalf, D.F., Crommentuijn, T. and van de Plassche, E.J. (1997) Environmental Quality Objectives for 10 Polycyclic

---

Aromatic Hydrocarbons (PAHs). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **36**, 89-97.  
<https://doi.org/10.1006/eesa.1996.1495>

- [37] Cao, Z., Liu, J., Luan, Y., Li, Y., Ma, M., Xu, J., *et al.* (2010) Distribution and Ecosystem Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Luan River, China. *Ecotoxicology*, **19**, 827-837.  
<https://doi.org/10.1007/s10646-010-0464-5>
- [38] Wang, X., Chen, L., Wang, X., Lei, B., Sun, Y., Zhou, J., *et al.* (2015) Occurrence, Sources and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban (Pudong) and Suburban Soils from Shanghai in China. *Chemosphere*, **119**, 1224-1232. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.10.019>