

# Study on Diffusion Path, Distribution Mechanism and Biodegradation of PAHs in Coal Mine Area

Nan Lu<sup>1,2,3,4,5</sup>

<sup>1</sup>Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, The Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi

<sup>4</sup>Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>5</sup>Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an Shaanxi

Email: lunan8836@126.com

Received: Jul. 20<sup>th</sup>, 2020; accepted: Aug. 6<sup>th</sup>, 2020; published: Aug. 13<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were the first persistent environmental pollutants discovered and studied by human beings. PAHs were produced in the process of coal exploitation and utilization. Because of the genotoxicity and carcinogenic potential, PAHs pollution and its environmental effects have been paid more and more attention. In this paper, the sources, distribution, migration and transformation of PAHs in coal mine environment were analyzed by scholars at home and abroad. It provided an important basis for continuously exploring innovative research directions, controlling pollution sources, limiting communication channels and formulating environmental protection strategies.

## Keywords

Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, Diffusion Route, Distribution Mechanism, Source Apportionment

# 煤矿区多环芳烃扩散途径、分布机制研究进展

卢楠<sup>1,2,3,4,5</sup>

<sup>1</sup>陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

<sup>2</sup>自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

<sup>3</sup>陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

<sup>4</sup>陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

文章引用: 卢楠. 煤矿区多环芳烃扩散途径、分布机制研究进展[J]. 环境保护前沿, 2020, 10(4): 516-520.

DOI: 10.12677/aep.2020.104062

<sup>5</sup>陕西省土地整治重点实验室, 陕西 西安  
Email: lunan8836@126.com

收稿日期: 2020年7月20日; 录用日期: 2020年8月6日; 发布日期: 2020年8月13日

## 摘要

多环芳烃(PAHs)是最早被人类发现和研究的一类持久性环境污染物, 多数产生于煤炭资源开采及利用过程, 因其具有遗传毒性和致癌潜力, PAHs的污染问题及其环境效应逐渐被人们重视。本文对目前国内外学者对煤矿区环境中PAHs的来源、分布、迁移转化进行解析, 为持续深入发掘创新性研究方向, 控制污染源, 限制传播途径、制定环保策略提供重要依据。

## 关键词

多环芳烃, 扩散途径, 分布机制, 源解析

Copyright © 2020 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

富煤、贫油、少气是我国的能源禀赋和经济发展特点, 因而, 煤炭在我国能源生产和消费中占据主体地位[1]。煤炭资源的开采对地球表层造成剧烈扰动, 由此造成的土体结构破坏、土壤污染、退化、生物多样性减少等一系列地质生态环境问题, 已成为全世界研究热点。

土壤是煤矿区地质生态环境的重要组成部分, 也是煤炭开采直接破坏的环境要素之一。煤炭的超强度开采和对恢复治理的忽视等原因, 导致诸如矿区地表裂缝、地表塌陷等环境地质问题, 进而形成大面积采空区, 并引发地表沉陷、矿区地质灾害等一系列地质环境问题[2]。在煤炭资源开采及利用过程产生的污染物中, 微量有机污染物的排放已经成为一个前沿性的热点研究领域。多环芳烃(PAHs)是最早被人类发现和研究的一类持久性环境污染物, 主要来源于煤炭等化石燃料的燃烧、热解过程, 因其具有遗传毒性和致癌潜力, 在环境科学领域备受关注[3]。有研究表明, 煤炭资源的开采、储运及加工过程是 PAHs 的主要来源, 且煤质和煤化程度直接影响 PAHs 种类和含量。

## 2. 多环芳烃

PAHs 在环境中具有多个载体, 主要是大气、水体, 最终富集累积于矿区及周边土壤。剥离表土、挖损岩层、采煤、运煤和存储、煤矸石排放等生产过程产生大量不同粒径的煤炭粉尘悬浮于空气中, PAHs 随煤尘、粉尘等在风力作用下移动, 颗粒较大的微粒和粉尘在重力作用下降落于地表造成土壤污染, 降水淋溶等作用促使其渗透进入土壤, 还有一些随煤矿开采、加工和生产过程中产生的废水、废渣以及煤矸石等逸散。采空塌陷导致地裂缝进而引起自燃的 PAHs, 通常以气相形式存在, 作为气溶胶的吸附剂[4]。经过大气化学过程, PAHs 还可转化为毒性更强的其他衍生物[5], 通过沉降等过程污染土壤和水体。

PAHs 的危害性不亚于粉尘污染, PAHs 含量虽然微量但分布广泛, 且在环境中长时间存在。有研究

证明, PAHs 能够经植物叶片或根系吸收进入植物体, 在植物体内迁移、代谢和积累, 进而通过食物链危及人类健康。PAHs 的高度脂溶性, 易被哺乳动物的胃肠道吸收, 并迅速分布于多种细胞组织中, 从而对生物体产生毒性和突变等病理影响[4] [6]。鉴于 PAHs 的致癌性强, 世界各国提出一些建议性的标准以控制其危害。例如, 1979 年美国环保局(EPA)就将 16 种未带分支的 PAHs, 确定为环境中的优先监测污染物, 我国国家环保局也将 7 种 PAHs 列入中国环境优先污染物黑名单。通过对两个年龄组(儿童和成人)进行健康风险评估发现 90%采样点的癌症风险均高于阈值[7], 凸显了煤矿区的环境污染和公共卫生问题。

煤炭开采过程中, PAHs 对生态环境的潜在危害具有隐蔽性, 大气、扬尘、水体、淋溶液、土壤等作为 PAHs 污染物的环境载体和最终受体, 环境要素及驱动因素的多样性不但导致 PAHs 分布和累积方式难以预测, 而且增加了对其进行生态修复和恢复治理的难度。因此, 针对煤矿区开展 PAHs 的污染分布、赋存特征, 掌握其定性和定量组成, 评估污染水平, 探索其与煤质和煤量等参数的相关性, 对于明晰土壤污染区域化特征、污染成因和扩散机制, 并开展针对性治理具有重要意义。

### 3. 煤矿区多环芳烃的研究现状

国内外科研工作者对 PAHs 开展了研究工作并取得一些进展, 主要集中在以下几个方面: 一是 PAHs 对生物病理学、毒理学方面的研究; 二是煤质等参数与 PAHs 生成及赋存规律的关系; 三是不同环境介质中 PAHs 的来源、分布及迁移转化规律等研究。

#### 3.1. PAHs 对生物病理学、毒理学方面的研究

PAHs 具有较强生物毒性, 不但影响动物早期发育, 而且对以滤食性和固着性的海洋贝类能够产生不同程度急性毒性效应, PAHs 分子结构等性质直接决定毒性差异[8]。菲、芘、荧蒹、苯并[a]芘、3-甲基菲、葱烯及 2-甲基蒽、苯并(a)芘(BaP)等均能对细菌、水生无脊椎动物、水生植物、藻类、哺乳动物等产生生物毒性影响[9] [10], 可导致包括胚胎发育畸形、神经发育损伤、免疫功能紊乱、代谢系统基因表达异常等严重后果[11]。

PAHs 还能对内分泌的干扰物和细胞毒素等的产生具有诱导作用, 进而引起机体突变。一些 PAHs 可参与酶系统和非酶系统的氧化还原循环, 使脂肪、蛋白质、DNA 等大分子物质发生氧化, 从而对细胞产生氧化损伤[12]。苯并(a)芘、苯并(b)荧蒹、茚并(1,2,3-cd)芘、苯并(a)蒽、荧蒹和环戊烯并(cd)芘这 6 种多环芳烃, 在光毒性和致癌性之间存在明显的平行关系。有文献指出, PAHs 除了破坏人类内分泌信号传导的能力外, 还会引起 DNA 损伤和生殖疾病[13]。

#### 3.2. 煤质等相关参数与 PAHs 生成及赋存规律的关系

PAHs 的分布规律与煤种、煤质等参数之间具有一定的相关性[14]。PAHs 的含量随煤阶变化, 赋存状态有所不同, 且一般与含碳质量分数、氢碳比、氧碳比、挥发分含量等均存在密切关系, 一般碳化程度越高, 多环芳烃含量越高[15]。煤中 PAHs 的含量和种类受到煤变质程度、煤岩组分及沉积环境的影响[16]。经研究发现, 随煤变质程度的增加, 低环 PAHs 含量增加, 高环 4~6 环 PAHs 含量减少[17]。随煤化程度提高, 高环 PAHs 含量增加趋势显著。烟煤和贫煤中多环芳烃种类较多而且含量也较大, 烟煤中 5 环和 6 环多环芳烃所占比例较大。

#### 3.3. PAHs 在不同环境介质中的来源、迁移转化及累积机制

针对典型污染区域的 PAHs 进行源解析, 可为控制污染源, 限制传播途径、制定环保策略提供重要依据。不同煤矿区由于所处的地理位置、煤种、煤质、煤层地质构造、区域环境承载力的不同导致环境 PAHs 污染状况差异较大。煤炭的开采、运输、燃烧类型、燃烧条件, 释放方式等对 PAHs 种类及相对含

量具有显著影响。王成龙等[18]采用正定矩阵分解法(PMF)对长江流域水体中 PAHs 的来源进行分析,煤炭和生物质燃烧混合源、焦炭源超过总来源的 60%。研究者发现煤烟尘、焦化尘、煤炭燃烧对典型煤炭资源型城市冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的贡献率达 50%以上[19]。经调研发现,渤海及邻近海域、长江口及浙江近岸海域表层沉积物中的 PAHs 主要为煤炭燃烧源,且 PAHs 的高环与低环的分布随海域的不同存在差异[20]。

作为富含 PAHs 或含有芳香族和脂肪族碳结构的原煤,很少被认为是一种污染源。在运输加工过程中,形成的煤屑粉尘会携带 PAHs,由于大多数 PAHs 都不易溶于水,所以 PAHs 一般依靠吸附于小颗粒物上进行扩散、转移,因此,对 PAHs 的扩散分布具有一定的影响,如在水体中的含量一般低于表层沉积物含量;在同一环境介质中,PAHs 浓度随污染源距离的增大呈下降趋势。此外,PAHs 也可随煤尘或大气颗粒物沉降于周边土壤和沉积物中,造成污染。PAHs 还可吸附于大气中颗粒较细的尘埃类脂质,进行长距离迁移,即大气、水体和土壤等环境介质均可受到 PAHs 的影响,但因煤矿区污染物来源较多,其造成的环境效应并未得到重视。

### 3.4. 小结

PAHs 的分布和累积方式很难预测,有一些研究表明,由于 PAHs 的脂溶性,大多数 PAHs 都累积于有机质含量较多的土层中,可通过调查土层有机质的分布情况判断 PAHs 的潜在累积[21]。矿区附近河流的地表沉积物样品中 PAHs 的含量表明,与煤矿距离决定了高分子量 PAHs 的分布及生态独立风险,且沉积物中总有机碳(TOC)含量与 PAHs 的累积相关[22]。但是,煤炭开采区地质环境条件的复杂性,导致了 PAHs 空间分布的差异性。

对煤矿区土壤和地表沉积物中 PAHs 进行源解析,是开展污染防治的重要基础和保障。同时,PAHs 的迁移转化行为是与其污染状况密切相关的。有学者就 PAHs 的浓度和分布在单一介质中随空间及时间的变化情况开展工作,并以此为基础,建立污染物的时空变化数学模型,但 PAHs 在大气、水体、土壤等多介质中的迁移转化规律仍是目前环境科学领域中备受关注的研究课题。

## 4. 创新性探索的方向

随着国家对水土环境修复工作相关标准的制订和完善,对典型区域污染水土管理和控制工作也逐渐开展。

对煤矿区的研究多数集中于土体结构的稳定性和水位变化造成的沙漠化等生态环境问题。对区域污染问题的相关研究主要集中于重金属,而对于有机污染问题,尤其是 PAHs 的污染问题及其环境效应未能给予足够重视。总体而言,国内外学者对煤矿区环境中 PAHs 的来源、分布、迁移转化、生理毒性有一定的研究,但是仍存在以下几方面需要进行创新性探索:煤矿开采导致 PAHs 随粉尘、煤尘等移动,隐蔽性强,缺乏对研究区 PAHs 在环境介质(如大气、水、土壤)中赋存状态、迁移转化和降解规律的认知,导致在复垦修复过程中,对 PAHs 污染修复周期长,修复效果不佳,增加了生态修复难度;煤矿区具有独特的区位和生态环境条件,特别是地质环境复杂,在矿区对 PAHs 污染物与煤矿区生产、开采之间的溯源关系进行深入研究,能够为修复规划提供理论支撑。

## 基金项目

陕西省土地工程建设集团内部科研项目(DJNY2019-16)(DJNY2019-18);陕西省土地整治重点实验室开放基金项目(2018-JC16, 2019-JC04, 2019-JC05)。

## 参考文献

- [1] 王小洋, 李先国. 能源革命背景下我国煤炭运输通道的发展趋势及对策[J]. 中国流通经济, 2019, 33(10): 67-75.

- [2] 陶虹, 李成, 柴小兵, 等. 陕西神府煤田环境地质问题及成因[J]. 地质与资源, 2010, 19(3): 249-252.
- [3] Cerniglia, C.E. (1993) Biodegradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Current Opinion in Biotechnology*, **4**, 331-338. [https://doi.org/10.1016/0958-1669\(93\)90104-5](https://doi.org/10.1016/0958-1669(93)90104-5)
- [4] Abdel-Shafy, H.I. and Mansour, M.S. (2016) A Review on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Source, Environmental Impact, Effect on Human Health and Remediation. *Egyptian Journal of Petroleum*, **25**, 107-123. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.011>
- [5] Shen, G., Preston, W., Ebersviller, S.M., et al. (2017) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Fine Particulate Matter Emitted from Burning Kerosene, Liquid Petroleum Gas, and Wood Fuels in Household Cookstoves. *Energy & Fuels*, **31**, 3081-3090. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02641>
- [6] Wang, L., Zhang, S., Wang, L., et al. (2018) Concentration and Risk Evaluation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Soil in the Typical Semi-Arid City of Xi'an in Northwest China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **15**, 607. <https://doi.org/10.3390/ijerph15040607>
- [7] Tarafdar, A. and Sinha, A. (2019) Health Risk Assessment and Source Study of PAHs from Roadside Soil Dust of a Heavy Mining Area in India. *Archives of Environmental & Occupational Health*, **74**, 252-262. <https://doi.org/10.1080/19338244.2018.1444575>
- [8] 张翼飞, 曲梦杰, 丁家玮, 等. 多环芳烃对海洋贝类多生物水平毒性效应的研究进展[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(1): 18-29.
- [9] 吕晏锋, 赵晓祥, 王俊锋. 菲胁迫对鲤鱼的急性毒性和抗氧化酶响应[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2018, 44(2): 309-316.
- [10] 刘天璐, 杨洁, 王君, 等. 含油污泥及其污染水体中多环芳烃及其急性生物毒性测定[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 3051-3058.
- [11] Eom, I.C., Rast, C., Veber, A.M., et al. (2007) Ecotoxicity of a Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH)-Contaminated Soil. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, **67**, 190-205. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2006.12.020>
- [12] 邓棋霏, 郭欢, 张晓敏, 等. 多环芳烃的健康损害及其健康监护[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2014, 32(2): 149-153.
- [13] Bolden, A.L., Rochester, J.R., Schultz, K., et al. (2017) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Female Reproductive Health: A Scoping Review. *Reproductive Toxicology*, **73**, 61-74. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2017.07.012>
- [14] 刘淑琴, 王媛媛, 张尚军, 等. 四种低阶煤中多环芳烃的分布特征[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(11): 120-124.
- [15] Zhao, Z.B., Liu, K., Xie, W., et al. (2000) Soluble Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Raw Coals. *Journal of Hazardous Materials*, **73**, 77-85. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(99\)00178-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(99)00178-8)
- [16] 郭崇涛. 煤化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1992.
- [17] 张小凤, 文雪琴, 杨亚丽. 不同变质程度煤中夹矸中多环芳烃的分布特征[J]. 煤炭技术, 2016, 35(11): 180-182.
- [18] 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 等. 基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3789-3797.
- [19] 刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 等. 聊城市冬季 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃来源解析及健康风险评估[J]. 环境科学, 2019, 40(9): 3875-3885.
- [20] 母清林, 方杰, 邵君波, 等. 长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评估[J]. 环境科学, 2015(3): 839-846.
- [21] Yakovleva, E.V., Gabov, D.N., Beznosikov, V.A., Kondratenok, B.M. and Dubrovskiy, Y.A. (2017) Accumulation of PAHs in Tundra Plants and Soils under the Influence of Coal Mining. *Polycyclic Aromatic Compounds*, **37**, 203-218. <https://doi.org/10.1080/10406638.2016.1244089>
- [22] Ugwu, K.E. and Ukoha, P.O. (2018) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments near a Mining Site in Okobo-Enjema, Nigeria: Concentrations, Source Apportionment and Risk Assessment. *Environmental Geochemistry and Health*, **40**, 359-373. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9916-7>