

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响	胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019~2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析	王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	郑镇森, 姜建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020 年中国城市 $PM_{2.5}$ - O_3 复合污染时空演变特征	牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021 年京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 和臭氧复合污染时空特征分析	宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020 年中国典型经济区 $PM_{2.5}$ 时空变化及其与植被景观格局的关系	徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析	赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征	刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 $PM_{2.5}$ 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势	罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征	王红磊, 刘思略, 孙杰娟, 刘煥武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 $PM_{2.5}$ 组分特征及来源解析	谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高分辨率网格的郑州市城镇居民 $PM_{2.5}$ 暴露浓度与健康风险变化评估	李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单	刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析	陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势	张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析	贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O_3 生成特征	俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应	李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估	俞珊, 张双, 张增杰, 翟艳芝, 刘桐坤 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO_2 排放模拟	马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析	卓海华, 姜保峰, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价	李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析	吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子	谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估	李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价	张静, 胡愈圻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用	纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素	张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑烟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响	何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
亳清河水体细菌群落的结构和分布特征	王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (<i>Sinularia microclavata</i>) 共生细菌群落结构和功能的影响	刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价	严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性	刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布	刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估	辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别	张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析	马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估	黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量	马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估	赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险	邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测	戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析	王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析	刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征	刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响	江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应	杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔箭筈锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响	王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
菌渣与化肥肥施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响	耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响	胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 魏利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响	储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价	付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征	薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展	胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望	李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910)	《环境科学》征稿简则(1984)
信息	(2167, 2191, 2324)

基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量

马赛炎^{1,2}, 魏海英^{1*}, 马瑾^{2*}, 刘奇缘², 吴颐杭², 屈雅静², 田雨欣², 赵文浩²

(1. 山西大学环境与资源学院, 太原 030006; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要: 随着我国城市化进程的迅速发展, 城市中加油站数量越来越多, 加油站油品的成分含量复杂多样, 在石油逸散过程中会生成一系列污染物。加油站产生的多环芳烃(PAHs)会污染其附近土壤, 同时对人体健康产生影响。收集了北京市 117 个加油站附近的土壤样品(0~20 cm), 分析了 7 种 PAHs 的含量, 基于 BP 神经网络模型, 预测了 2025 年和 2030 年北京市加油站土壤 PAHs 含量。结果表明, 7 种 ω (PAHs) 范围在 0.01~3.53 mg·kg⁻¹ 之间, 与《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018)中土壤污染风险筛选值比较, PAHs 含量低于该指标, 同时上述 7 种 PAHs 的毒性当量(TEQ)均低于世界卫生组织(WHO)的标准值(1 mg·kg⁻¹), 表明它们对人体健康有较低风险。预测结果显示, 快速发展的城市化与土壤 PAHs 含量的增加具有正相关的关系, 至 2030 年, 北京市加油站土壤 PAHs 的含量将持续增长。2025 年和 2030 年北京市加油站土壤中 ω (PAHs) 的范围分别为 0.085~4.077 mg·kg⁻¹ 和 0.132~4.412 mg·kg⁻¹, 7 种 PAHs 的含量均低于(GB 36600-2018)土壤污染风险筛选值, 但是 PAHs 的含量会随着时间呈现上升的趋势, 其中朝阳、丰台和海淀 PAHs 含量较高, 需重点关注。

关键词: 土壤; 加油站; 多环芳烃(PAHs); BP 神经网络; 预测

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-2215-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205234

Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network

MA Sai-yan^{1,2}, WEI Hai-ying^{1*}, MA Jin^{2*}, LIU Qi-yuan², WU Yi-hang², QU Ya-jing², TIAN Yu-xin², ZHAO Wen-hao²

(1. College of Environmental and Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: With the rapid development of urbanization in China, the number of gas stations in cities is increasing. The composition of oil products in gas stations is complex and diverse, and a series of pollutants will be generated in the process of oil diffusion. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) produced by gas stations can pollute the nearby soil and affect human health. In this study, soil samples (0-20 cm) near 117 gas stations in Beijing were collected, and the contents of seven PAHs were analyzed. Based on the BP neural network model, the contents of PAHs in soil of Beijing gas stations in 2025 and 2030 were predicted. The results showed that the total concentrations of the seven PAHs were 0.01-3.53 mg·kg⁻¹. The concentrations of PAHs were lower than the soil environmental quality risk control standard for soil contamination of development land (Trial) GB 36600-2018. At the same time, the toxic equivalent concentrations (TEQ) of the above seven PAHs were lower than the standard value (1 mg·kg⁻¹) of the World Health Organization (WHO), which they indicate a lower risk to human health. The prediction results showed that the rapid development of urbanization had a positive correlation with the increase in soil PAHs content. By 2030, the content of PAHs in Beijing gas station soil will continue to grow. The predicted concentrations of PAHs in the soil of Beijing gas stations in 2025 and 2030 were 0.085-4.077 mg·kg⁻¹ and 0.132-4.412 mg·kg⁻¹, respectively. The contents of seven PAHs were lower than the soil pollution risk screening value of GB 36600-2018; however, the concentration of PAHs increased over time. The contents of PAHs in Chaoyang, Fengtai, and Haidian were relatively higher, which requires further attention.

Key words: soil; gas station; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); BP neural network; prediction

随着经济社会快速发展, 机动车逐渐走进人们的日常生活, 同时也带来了巨大的能源需求。从 20 世纪 50 年代开始, 世界各国陆续开始建设汽车加油站, 这使得全球的加油站数目猛增^[1]。根据欧美的经验, 大约 30% 的使用寿命超过 20 a 的加油站会出现漏油事故^[2]。加油站的地下储油罐和输油管线发生泄漏后, 不仅会污染附近土壤, 土壤中的石油污染还可在土壤淋溶和渗滤等作用下, 造成范围更广的土壤污染^[3]。

石油中含有大量有毒有害的有机物^[4], PAHs 是其中一种主要成分, 因其具有遗传毒性和“三致

效应”而受到广泛关注^[5]。土壤作为一种重要的环境介质, 由于自身疏松多孔的结构, 成为 PAHs 在自然环境中的贮存库和中转站^[6,7]。关于环境负荷的数据显示, 土壤中容纳的 PAHs 可以达到 90% 以上, 大部分的 PAHs 是经过土壤进入人体的, 远远高于通过大气和水体等其它途径进入的^[8,9]。PAHs 进入人体的方式主要包括 3 种类型: 呼吸吸入、皮肤接

收稿日期: 2022-05-20; 修订日期: 2022-07-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1804601); 国家自然科学基金项目(42177221)

作者简介: 马赛炎(1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境地球化学, E-mail: 1209924385@qq.com

* 通信作者, E-mail: weihaiying@sxu.edu.cn; majin@craes.org.cn

触暴露和食物摄入,长时间 PAHs 暴露会对人体健康造成一定程度的损害,甚至存在较高的致癌风险^[10].

北京作为我国首都,2020 年常住人口达到2 189 万人,居民的机动车保有量持续增长,加油站数量也随之上升.据统计^[11],截至 2021 年底,北京市市机动车保有量达 600.3 万辆,加油站数量为1 187座.

加油站作为典型的“点源”,在石油产品运输、罐装和加油等过程中均伴随 PAHs 等污染物挥发,对周边包括土壤在内的环境介质造成污染,进而可能对周边居民和加油站工作人员等产生潜在的健康风险^[12~14].因此,准确评估加油站周边土壤 PAHs 含量水平并对其未来发展趋势进行科学预测显得尤为重要^[15].目前关于土壤环境中污染来源的分析和风险评价已有研究^[16,17],而利用社会经济因素、加油站特征因素和加油站土壤中 PAHs 污染水平相关性进行系统性地研究来预测加油站土壤 PAHs 的研究鲜见报道.当前,以 BP 神经网络为代表的机器学习方法在环境科学研究领域得到了广泛应用,并在大数据处理和污染物模拟预测方面显示出独特的优势^[18,19].

本研究的主要目标:①基于 BP 神经网络模型确定社会经济因素、加油站特征因素与加油站土壤 PAHs 的相关性;②使用一种合理的预测方法,预测北京市加油站土壤 PAHs 含量;③评价 BP 神经网络预测效果,以期改善城市土壤环境质量提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

北京市位于华北平原西北部,北纬 39°54′,东经 116°23′,市区总面积约2 267 km²,常住人口2 189 万^[20].北京市属于典型的温带半湿润季风气候,春、

秋季节短,夏季漫长炎热,冬季则十分寒冷;同时其降雨季节分配不均匀,多在夏季^[21].2021 年工业总产值20 879.3 亿元,其中重工业产值17 933.8 亿元,石油及煤炭工业产值 455.9 亿元.本研究区域位于北京市六环路内,包括东城区、西城区、昌平区、朝阳区、海淀区、石景山区、丰台区、房山区、大兴区、顺义区和通州区.

1.2 样品采集和化学分析

采集研究区内 117 个加油站及其周边 (20 m) 表层土壤样品.采集土壤样品前,先铲除地表草根和落叶,采集表层土壤样品 500 g 左右.土壤样品在 25℃ 条件下风干,去除石块等杂物后研磨过 120 目 (<0.125 mm)筛,放入棕色玻璃瓶低温 (4℃) 避光保存^[22].采用美国 EPA 3550C、3630C 和 8270E 进行土壤样品 PAHs 提取、纯化和分析检测^[23].

1.3 指标选取

为对加油站周边土壤 PAHs 含量进行科学预测,本研究收集了 2012~2020 年在北京市城市化进程中影响土壤中 PAHs 累积的 9 个社会经济因素和 5 个加油站特征因素.社会经济因素包括 GDP (X_1)、常住人口 (X_2)、常住人口密度 (X_3)、能源消费 (X_4)、煤炭消费 (X_5)、天然气消费 (X_6)、液化石油气消费 (X_7)、汽油消费 (X_8) 和汽车拥有量 (X_9),见表 1.加油站特征因素包括:①加油站存续时间,即加油站建站时间;②距市中心距离,以天安门为市中心,求取天安门与各采样点的直线距离;③加油站所处的环位置,其地理位置以北京市制定的环形公路为参考;④道路长度,根据地图,确定加油站所在路段的长度;⑤道路分级,将道路分为 4 个等级,并将其与加油站最近的主要道路等级确定为其道路等级.其中,道路等级划分为:①一级或二级公路;②高速公路;③轨道;④小径或人行道.

表 1 2020 年北京市各行政区社会经济指标数据^[20]

Table 1 Socio-economic indicators of Beijing City in 2020

行政区	$X_1 \times 10^8$ /元	$X_2 \times 10^4$ /人	X_3 /人·km ⁻²	X_4 (以标煤计) $\times 10^4$ /t	X_5 /kg	X_6 /m ³	X_7 /kg	X_8 /L	X_9 /辆
东城	2 954.7	70.9	16 937	300.9	21.0	30 917.0	10 167.0	336 113.0	559 148
西城	5 065.1	110.6	21 888	363.0	0	53 763.0	140.5	1 197.2	483 235
朝阳	7 037.9	345.1	7 583	856.0	596 370.8	478 276.9	17 078.6	4 116.6	1 053 991
海淀	8 504.6	313.2	7 271	701.3	60 800	155 000.0	3 400.0	104 100.0	956 689
丰台	1 854.2	201.9	6 602	444.0	511.1	155 794.0	25.8	1 739.5	564 665
石景山	855.5	56.8	6 736	121.6	22.7	13 833.0	457.0	5 567.0	155 128
房山	759.9	131.3	660	825.4	209 992.4	37 187.5	99 212.4	2 609.7	278 643
通州	1 102.9	184.0	2 030	311.1	247 857.0	18 313.0	24 817.0	9 116.0	374 605
顺义	1 773.3	132.4	1 298	995.2	16.79	43 031.0	30 649.3	8 134.9	296 409
昌平	1 147.5	226.9	1 689	344.0	170 606.0	71 047.4	6 268.3	24 707.3	427 346
大兴	932.8	199.4	1 924	305.1	221 100	12 384.0	190.0	3 586.0	384 971

1.4 BP 神经网络的构建

要对加油站土壤 PAHs 含量进行预测,首先要

构建 BP 神经网络模型.依次排列 117 份样品,从每 3 份样品中随机抽取 1 份作为检验样本,剩余部分

为训练样品,共计 39 份检验样品,78 份训练样品. BP 神经网络是一种由输入层、隐含层和输出层组成的运算模型(图 1). 本研究选择 14 个因子作为 BP 神经网络的输入,输出因子为北京市加油站土壤 PAHs 含量,也就是 14 个输入层节点和 1 个输出层节点. 每个节点都是一种特定的输出函数,称为激活函数^[24];权重是指每两个节点间的连接所代表的对于通过该连接信号的加权值,每个层次的权值都可以被学习调节^[25]. 每个周期的权重变化根据学习率 0.05 确定. 输出层采用纯线性函数(purlin),在训练函数中引入梯度下降训练函数(trained),设置了 25 000 个重复的学习迭代数,并通过反复计算得到权重系数和阈值,直至学习训练过程结束,最后建立模型. 在此基础上,通过模型进行网络训练,比较验证预测值与样本实测值,并通过决定系数(R^2)来验证模型的拟合程度.

1.5 毒性当量

苯并[a]芘(BaP)用来评估 PAHs 的致癌能力,同时单体 PAHs 的致癌能力由 BaP 的毒性等效因子(TEF)表征^[26,27]. PAHs 的毒性当量(TEQ)的数值通过 PAHs 含量和其对应的 TEF 值相乘得到^[28]. 且 TEQ 与土壤 PAHs 的含量存在一定的相关性:

$$TEQ = \sum_{i=1}^n C_i \times TEF_i$$

式中, C_i 为土壤中 PAHs 的组分 i 含量; TEF_i 为对应组分 i 的毒性当量因子,其取值采用 Nisbet 等^[29]

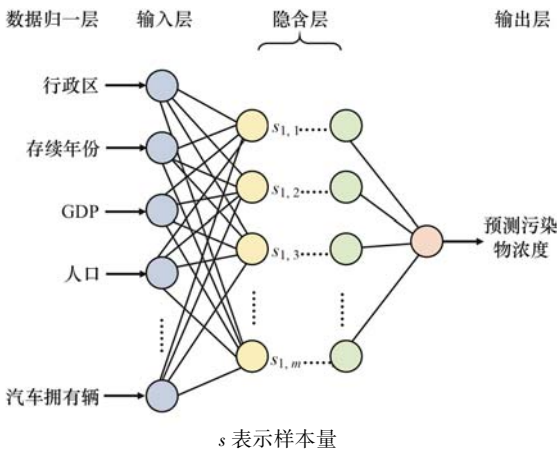


图1 BP神经网络拓扑结构
Fig. 1 BP neural network topology

确定的 TEFs 数值,BaP 的 TEF 值是 1,在全部 PAHs 中最高.

1.6 数据分析

采用 SPSS 24.0 对数据进行统计分析,采用 ArcGIS 10.8 软件绘制加油站土壤 PAHs 含量的空间分布图,采用 Matlab 软件构建 BP 神经网络模型,图片和表格采用 CorelDRAW X7 和 Origin 2021 软件处理.

2 结果与讨论

2.1 PAHs 含量及其空间分布

北京市加油站土壤 PAHs 含量及其空间分布如图 2 所示. 从中可知,北京市加油站土壤中 PAHs 变

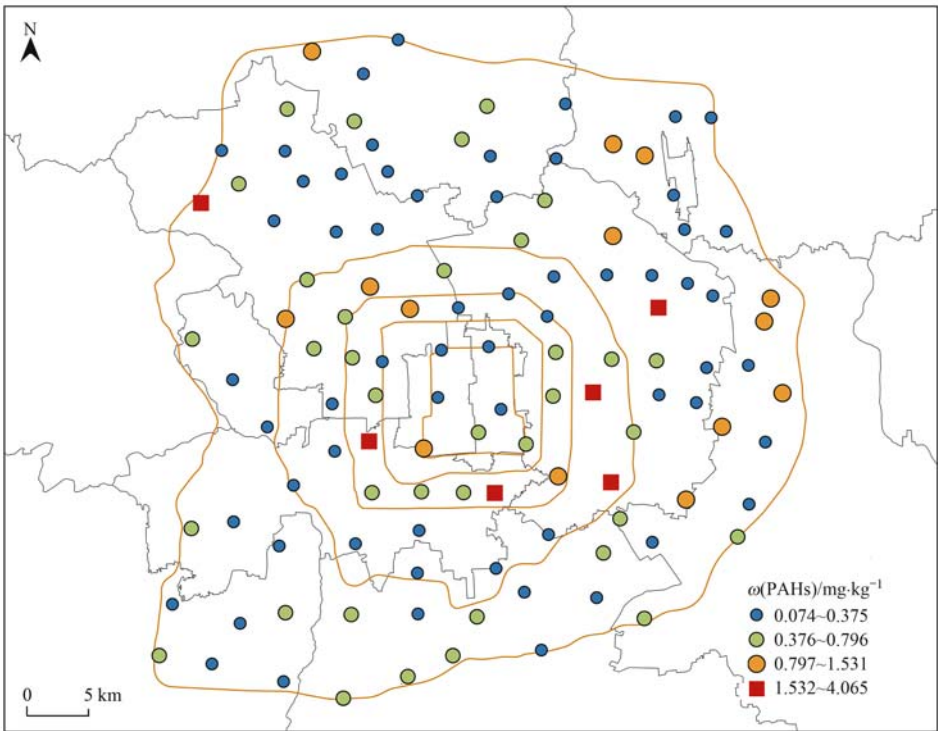


图2 北京市加油站周边土壤 PAHs 含量分布
Fig. 2 Distribution of PAHs content in soil around gas stations in Beijing

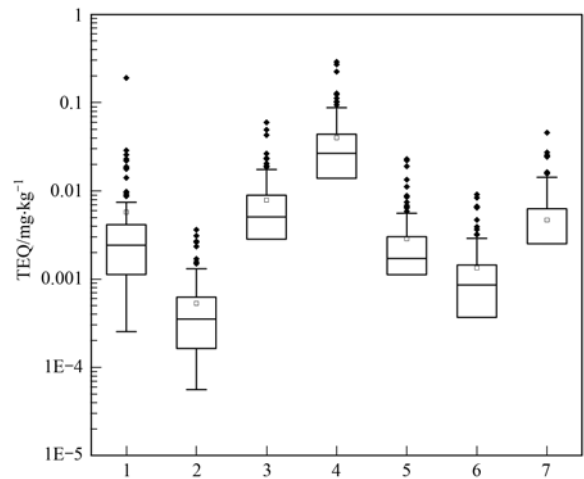
化较大,范围为 $0.01 \sim 4.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 $0.039 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,中位数为 $0.029 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.各单体 PAH 的含量均低于《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018)筛选值。

从空间分布特征可以看出,PAHs 含量最高的采样点分别位于海淀区、丰台区和朝阳区.北京城区总体上由内城向外发展,随着距市中心距离的增加呈现出城市化速度递减的趋势^[30].20 世纪 70 年代,北京市区缓慢扩张,局限在三环内.内城虽然历史最悠久,但也是北京最早限制煤炭使用的地区,并且在该地区采取了更多的环保措施,这在很大程度上导致了市中心的 PAHs 含量较低^[23].中国石化北安河加油站(红色方块)位于海淀区西六环附近,其附近有各种采摘园和国家电网(苏家坨西区),我国早期使用煤炭等发电时会产生大量有机污染物,可能是该加油站 PAHs 含量高的原因之一^[31].多环芳烃高度集中的另一个原因是海淀区有 10 多所大学,其中主要是大学冬季供暖和人为活动的影响^[22].丰台区位于北京市主城区南部,紧邻内城.有研究表明,北京老城区高分子量多环芳烃的高比例可能是这些地区城市化时间长的结果^[23],这使得多环芳烃在土壤中长期积累.因此,这可能是导致丰台区加油站 PAHs 含量较高的原因之一.此外,该地区距离中心城区较远,其土壤中的 PAHs 可能受到城市尺度大气沉降过程中 PAHs 输入的影响,在此期间低环 PAHs 从污染较严重的内陆地区迁移到外部区域^[32~34].位于朝阳区的北京焦化公司,曾经是中国最大的炼焦企业,也是最大的商品焦炭的供应和出口基地,每年焦炭产量可达 200 多万 t,是全国总生产量的 1.67%^[35].由于北京市长时间进行工业生产,尤其是在石化厂、焦化厂和炼钢厂的煤干馏和煤炭燃烧过程中,会产生大量的 PAHs 和携带有 POPs 的粉尘被释放到大气中,经过大气沉降等方式沉积在周边区域的土壤中,造成其附近土壤的污染^[36].

此外,加油站储油罐及管道的泄漏,加油站中汽油和柴油的逸散以及汽车加油过程中,汽油等的挥发会导致附近土壤中 PAHs 的积累^[37].同时,上述加油站(图 2 中红色方块)均位于北京市主干道附近,此处汽车流量大,会对道路产生较大的交通负荷^[38,39].有研究表明,在城市的公共交通及道路沿线附近,汽车尾气是土壤中 PAHs 的主要来源之一^[40,41],因此推测这些地区土壤 PAHs 含量增加的原因是汽车尾气的大量排放.同时这些加油站位于北京市住宅区附近,居民日常生活和冬天取暖所产生的 PAHs 及其他污染物会通过其他大气沉降等方

式进入土壤,使土壤中 PAHs 的含量升高^[42].有研究表明,城区土壤中 PAHs 含量与城市人口数量及活动强度呈正相关^[43].综上所述,北京市加油站土壤 PAHs 含量总体处于较低水平,但也有部分高含量点位分散在各个城区,这可能与燃煤、汽车尾气排放和加油站汽油柴油等挥发泄漏有关。

为进一步明确土壤中 PAHs 对人体健康的影响,利用毒性当量因子(TEFs)对加油站内 PAHs 的毒性当量(TEQ)进行了分析(图 3).结果表明,117 个加油站土壤中 PAHs 的 TEQ 均低于 WHO 标准值($1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),加油站土壤中 PAHs 的 TEQ 范围为 $0.0050 \sim 0.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 $0.063 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.因此,北京市加油站土壤中 PAHs 对人体健康的影响较小。



1. 苯并[a]蒽, 2. 䈷, 3. 苯并[b]荧蒽, 4. 苯并[k]荧蒽, 5. 苯并[a]芘, 6. 苊并[1,2,3-c,d]芘, 7. 二苯并[a,h]蒽

图 3 北京市加油站周边土壤中 PAHs 的毒性当量

Fig. 3 Toxic equivalent quantity of PAHs in soil around gas stations in Beijing

2.2 BP 神经网络模型建立

BP 神经网络模型构建是通过选择全部 1 638 个训练样本来完成的,拟合检验的结果如图 4 所示.结

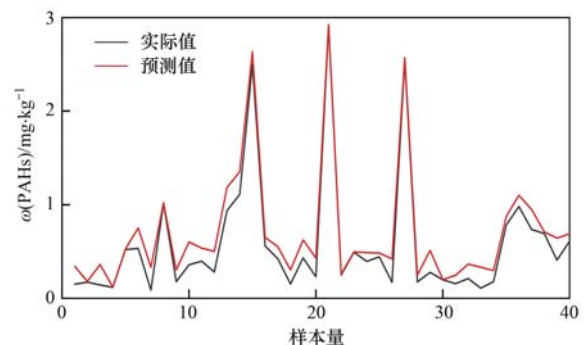


图 4 BP 神经网络预测数据与实测数据对比

Fig. 4 Comparison of BP neural network prediction data and measured data

果表明,模型训练次数为10 000次时,其训练会达到最佳效果,同时在训练样本 MSE 为 4.3×10^{-5} 时,训练收敛效果最好^[44];同时,模型的拟合值(R^2)为 0.922,最大拟合误差为 20%, R^2 接近于 1,且预测值曲线和实测值曲线也几乎重合,表明 PAHs 样本神经网络训练样本的相关性较好,与采用回归模型方法进行定量分析相比,BP 神经网络的预测准确率更高^[45].因此,使用 BP 神经网络模型能够较好地预

测北京市加油站土壤中 PAHs 含量。
2.3 基于 BP 神经网络中的影响因素对土壤中 PAHs 水平的预测

以社会经济的发展趋势作为先决条件,5 a 时间作为等差值,通过对 9 个社会经济因素数据的合理使用,建立基于 BP 神经网络的 9 个线性 and 多项式回归模型^[46],可得到 2025 年和 2030 年研究区域的各社会经济因素的数据随着时间的变化趋势,如表 2 所示。

表 2 北京市社会经济因素的 BP 神经网络拟合程度(R^2)

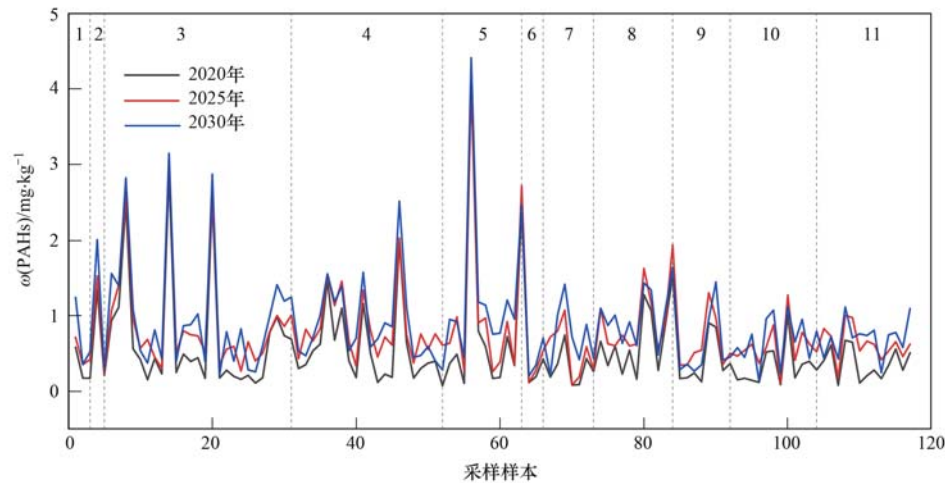
Table 2 Fitting degree of BP neural network of social and economic factors in Beijing									
行政区	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
东城	0.910	0.918	0.913	0.910	0.907	0.921	0.921	0.911	0.915
西城	0.921	0.911	0.911	0.913	0.911	0.911	0.918	0.914	0.918
朝阳	0.920	0.918	0.930	0.919	0.937	0.928	0.926	0.913	0.913
海淀	0.938	0.918	0.933	0.905	0.912	0.919	0.917	0.912	0.913
丰台	0.918	0.909	0.916	0.909	0.927	0.901	0.927	0.933	0.903
石景山	0.907	0.918	0.927	0.902	0.911	0.926	0.911	0.923	0.906
房山	0.927	0.904	0.927	0.909	0.922	0.905	0.927	0.901	0.901
通州	0.930	0.934	0.941	0.912	0.927	0.913	0.931	0.938	0.917
顺义	0.941	0.931	0.937	0.911	0.931	0.931	0.918	0.935	0.913
昌平	0.913	0.933	0.918	0.925	0.918	0.937	0.938	0.916	0.923
大兴	0.918	0.932	0.927	0.917	0.924	0.918	0.941	0.915	0.921

对各影响因素的预测结果表明,截至到 2030 年,通州区、昌平区、顺义区和大兴区在各区域的回归趋势上均存在一定的差异,而其它区的回归趋势则基本一致.随着时间的推移,各研究区的 GDP、天然气和能源消费等指标都有明显的上升趋势;通州区、昌平区、顺义区和大兴区的常住人口和人口密度都将继续增加,但其余 7 个区的人口和密度却有明显的下降趋势.海淀区和房山区的煤耗也有逐年增加的趋势,其它区的煤消耗量有下降的趋势.除东城区和西城区外,其他地区的机动车数量和消费量也呈现出逐年上升的态势.通州区、海淀区和顺

义区的液化石油气(LPG)消费量逐年增加,其它区则呈现出下降的趋势.

由此可见,对于 2025 年和 2030 年北京社会经济因素的数据预测符合社会的发展趋势^[47].对北京市加油站特征因素,随着时间的推移,计算出加油站的存续时间^[48].因此,本研究所采用的 14 个影响因素可以用于预测北京市加油站土壤 PAHs 含量.

将 2025 年和 2030 年研究区域的社会经济因素和加油站特征因素用于构建 BP 神经网络模型,预测北京市加油站土壤 PAHs 含量,预测结果如图 5 所示.



1. 东城, 2. 西城, 3. 朝阳, 4. 海淀, 5. 丰台, 6. 石景山, 7. 房山, 8. 通州, 9. 顺义, 10. 昌平, 11. 大兴

图 5 BP 神经网络预测的北京市加油站土壤 PAHs 含量

Fig. 5 Content of PAHs in soil around gas stations in Beijing predicted by BP neural network

2025 年北京市加油站土壤中 $\omega(\text{PAHs})$ 范围为 $0.085 \sim 4.077 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.050 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 中位数为 $0.063 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 2030 年北京市加油站土壤中 $\omega(\text{PAHs})$ 范围为 $0.132 \sim 4.412 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.056 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 中位数为 $0.076 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 5)。结果显示, 2025 年北京市加油站土壤中 PAHs 含量平均值相差较小, 但中位数大于 2020 年的, 表明 2025 年北京市加油站土壤 PAHs 含量总体呈上升趋势, 需引起重视。

2025 年所有采样点 PAHs 含量变幅均较小, 所有行政区 PAHs 含量呈上升趋势, 朝阳区、海淀区和丰台区的加油站土壤中 PAHs 含量远远高于其他行政区, 而其它行政区 (昌平区、东城区、西城区、大兴区、石景山区、房山区、通州区和顺义区) $\omega(\text{PAHs})$ 不超过 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且单体 PAH 含量水平低于 (GB 36600-2018) 的土壤污染风险筛选值 (图 5)。2025 ~ 2030 年间, 北京市加油站土壤 PAHs 含量持续升高, 但其单体 PAH 含量水平仍低于 (GB 36600-2018) 土壤污染风险筛选值。综上, 目前北京市加油站土壤 PAHs 含量处于安全水平, 但呈上升趋势, 且部分城区土壤 PAHs 含量偏高且增长较快, 需要引起重视, 并采取切实有效的措施加以控制。

3 结论

(1) 当前, 北京市加油站土壤 PAHs 含量处于较低水平, 个别点位加油站土壤 PAHs 含量较高, 需要重点关注。加油站土壤中 PAHs 的 TEQ 低于 WHO 设定的标准值平均值, 其对人体健康的毒性风险较小。

(2) 北京市加油站土壤 PAHs 含量呈现持续增长的趋势, 其中朝阳区、丰台区和海淀区增速较快, 需要引起重视。预计至 2030 年, 北京市加油站土壤 PAHs 含量平均值低于土壤污染风险筛选值 (GB 36600-2018), 对人体健康的影响较小。

(3) BP 神经网络模型可以较好地模拟预测加油站土壤 PAHs 含量发展趋势, 为土壤环境管理提供科学依据。

参考文献:

- [1] Hilpert M, Breyse P N. Infiltration and evaporation of small hydrocarbon spills at gas stations [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2014, **170**: 39-52.
- [2] 夏凤英. 石油类场地典型挥发/半挥发性污染物分布及环境风险研究 [D]. 北京: 北京工商大学, 2010.
Xia F Y. Distribution analysis and environmental risk assessment of VOCs/SVOCs in petroleum oil contaminated sites [D]. Beijing: Beijing Technology and Business University, 2010.
- [3] Hilpert M, Mora B A, Ni J, *et al.* Hydrocarbon release during fuel storage and transfer at gas stations: environmental and health effects [J]. *Current Environmental Health Reports*, 2015, **2** (4): 412-422.
- [4] 李丽和. 石油烃污染场地风险评价及案例研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2007.
Li L H. Petroleum-contaminated sites risk assessment and case study [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2007.
- [5] 周燕, 卢新卫. 西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4800-4808.
Zhou Y, Lu X W. Assessment of pollution, sources, and risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil from Urban Parks in Xi'an City, China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4800-4808.
- [6] Shi M W, Zhang R Z, Wang Y X, *et al.* Health risk assessments of polycyclic aromatic hydrocarbons and chlorinated/brominated polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air particles in a haze frequent area in China [J]. *Emerging Contaminants*, 2020, **6**: 172-178.
- [7] Karaca G. Spatial distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) concentrations in soils from Bursa, Turkey [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2016, **70**(2): 406-417.
- [8] 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.
Wang C L, Zou X Q, Zhao Y F, *et al.* Source apportionment and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water from Yangtze River, China: based on PMF model [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3789-3797.
- [9] Kadiri J A, Eneji I S, Itodo A U, *et al.* Concentration and Risk Evaluation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from the vicinity of selected petrol stations in Kogi State-Nigeria [J]. *Open Access Library Journal*, 2021, **8**(7): 1-21.
- [10] 邹正禹, 唐海龙, 刘阳生. 北京市郊农业土壤中多环芳烃的污染分布和来源 [J]. *环境化学*, 2013, **32**(5): 874-880.
Zhou Z Y, Tang H L, Liu Y S. Source and distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Beijing suburbs [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32** (5): 874-880.
- [11] Kelly F J, Zhu T. Transport solutions for cleaner air [J]. *Science*, 2016, **352**(6288): 934-936.
- [12] Madrid L, Díaz-Barrientos E, Madrid F. Distribution of heavy metal contents of urban soils in parks of Seville [J]. *Chemosphere*, 2002, **49**(10): 1301-1308.
- [13] Peng C, Ouyang Z Y, Wang M E, *et al.* Assessing the combined risks of PAHs and metals in urban soils by urbanization indicators [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **178**: 426-432.
- [14] 屈雅静. 北京城区公园土壤多环芳烃污染特征、来源解析及含量预测 [D]. 太原: 山西大学, 2020.
Qu Y J. Characteristic, source analysis and content prediction of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil of urban parks in Beijing [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020.
- [15] Zhang L, Qin Y W, Zheng B H, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of Xiangjiang River in South-central China: occurrence and sources [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **69**(1): 119-125.
- [16] Gąsiorek M, Kowalska J, Mazurek R, *et al.* Comprehensive assessment of heavy metal pollution in topsoil of historical urban park on an example of the Planty Park in Krakow (Poland) [J]. *Chemosphere*, 2017, **179**: 148-158.
- [17] Wang M S, Han Q, Gui C L, *et al.* Differences in the risk

- assessment of soil heavy metals between newly built and original parks in Jiaozuo, Henan Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **676**: 1-10.
- [18] 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, **527-528**: 375-383.
- [19] 任加国, 龚克, 马福俊, 等. 基于 BP 神经网络的污染场地土壤重金属和 PAHs 含量预测 [J]. *环境科学研究*, 2021, **34** (9): 2237-2247.
- Ren J G, Gong K, Ma F J, *et al.* Prediction of heavy metal and PAHs content in polluted soil based on BP neural network [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34** (9): 2237-2247.
- [20] 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, 2021.
- [21] Wu Y H, Liu Q Y, Ma J, *et al.* Antimony, beryllium, cobalt, and vanadium in urban park soils in Beijing: machine learning-based source identification and health risk-based soil environmental criteria [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **293**, doi:10.1016/j.envpol.2021.118554.
- [22] Zhai Y Z, Yin Z H, Zhao X B, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the environment of Beijing, China: levels, distribution, trends and sources [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2018, **24** (1): 137-157.
- [23] Liu S D, Xia X H, Yang L Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of different land uses in Beijing, China: distribution, sources and their correlation with the city's urbanization history [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **177** (1-3): 1085-1092.
- [24] 师波. 基于 PXI 总线的三维多频电阻抗成像系统研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2017.
- Shi B. Research of PXI-based Three-dimensional multi-frequency electrical impedance tomography system [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017.
- [25] 秦夕淳, 袁琦, 周宝宜. 基于神经网络的土壤重金属预测模型研究 [J]. *现代农业科技*, 2016, (19): 178-180.
- Qin X C, Yuan Q, Zhou B X. Study on prediction model of soil heavy metal based on artificial neural network [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2016, (19): 178-180.
- [26] Zhu Y H, Yang L X, Yuan Q, *et al.* Airborne particulate polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) pollution in a background site in the North China Plain: concentration, size distribution, toxicity and sources [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **466-467**: 357-368.
- [27] Lin Y C, Lee W J, Chen S J, *et al.* Characterization of PAHs exposure in workplace atmospheres of a sinter plant and health-risk assessment for sintering workers [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **158** (2-3): 636-643.
- [28] Sun Z, Zhu Y, Zhuo S J, *et al.* Occurrence of nitro-and oxy-PAHs in agricultural soils in eastern China and excess lifetime cancer risks from human exposure through soil ingestion [J]. *Environment International*, 2017, **108**: 261-270.
- [29] Nisbet I C T, LaGoy P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1992, **16** (3): 290-300.
- [30] Liu Q Y, Wu Y H, Zhou Y Z, *et al.* A novel method to analyze the spatial distribution and potential sources of pollutant combinations in the soil of Beijing urban parks [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **284**, doi:10.1016/j.envpol.2021.117191.
- [31] Wang H, Yang Y T, Walker T R, *et al.* Characterization, source apportionment, and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils from 23 cities in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, doi:10.1007/s11356-022-21025-z.
- [32] Wang Z, Chen J W, Qiao X L, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons from urban to rural soils: a case study in Dalian, China [J]. *Chemosphere*, 2007, **68** (5): 965-971.
- [33] Glaser B, Dreyer A, Bock M, *et al.* Source apportionment of organic pollutants of a highway-traffic-influenced urban area in Bayreuth (Germany) using biomarker and stable carbon isotope signatures [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39** (11): 3911-3917.
- [34] 张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 等. 大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例 [J]. *环境科学*, 2022, **43** (6): 2906-2916.
- Zhang X L, Liu S J, Han M L, *et al.* Comparison of regional transportation and transformation models of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons and research on key influencing factors: take the Beijing-Tianjin-Hebei region as example [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (6): 2906-2916.
- [35] 北京市规划委员会详细规划处. 北京焦化厂: 留住工业记忆 [J]. *北京规划建设*, 2009, (1): 134-135.
- [36] Li Q Q, Dai L W, Wang M J, *et al.* Distribution, influence factors, and biotoxicity of environmentally persistent free radical in soil at a typical coking plant [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **835**, doi:10.1016/j.scitotenv.2022.155493.
- [37] Rosales R M, Martínez-Pagán P, Faz A, *et al.* Study of subsoil in former petrol stations in SE of Spain: physicochemical characterization and hydrocarbon contamination assessment [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **147**: 306-320.
- [38] Panchal R, Panagi M, May H R, *et al.* Personal air pollution exposure during morning commute car and active transport journeys [J]. *Journal of Transport & Health*, 2022, doi:10.1016/j.jth.2022.101365.
- [39] Lin S Y, Liu Y, Chen H B, *et al.* Impact of change in traffic flow on vehicle non-exhaust PM_{2.5} and PM₁₀ emissions: a case study of the M25 motorway, UK [J]. *Chemosphere*, 2022, **303**, doi:10.1016/j.chemosphere.2022.135069.
- [40] 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 H J. 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.
- [41] Yang S Y N, Connell D W, Hawker D W, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in air, soil and vegetation in the vicinity of an urban roadway [J]. *Science of the Total Environment*, 1991, **102**: 229-240.
- [42] Bai X R, Wei J, Ren Y Q, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons and nitrated polycyclic aromatic hydrocarbons during heating season in Beijing [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, doi:10.1016/j.jes.2022.02.047.
- [43] Zhang A P, Ye X T, Yang X D, *et al.* Elevated urbanization-driven plant accumulation and human intake risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in crops of peri-urban farmlands [J].

- Environmental Science and Pollution Research, 2022, doi:10.1007/s11356-022-20623-1.
- [44] Sabour M R, Besharati M, Dezvareh G A, *et al.* Application of artificial neural network with the back-propagation algorithm for estimating the amount of polycyclic aromatic hydrocarbons in Tehran Oil Refinery, Iran[J]. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 2022, **18**, doi:10.1016/j.enmm.2022.100677.
- [45] Shukla V, Upreti D K. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) accumulation in lichen, *Phaeophyscia hispidula* of DehraDun City, Garhwal Himalayas [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **149**(1-4): 1-7.
- [46] 屈雅静, 魏海英, 马瑾. 基于 BP 神经网络的北京城区公园土壤 PAHs 含量预测[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(12): 2864-2871.
- Qu Y J, Wei H Y, Ma J. Prediction of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) content in soil of Urban Parks in Beijing based on BP neural network [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(12): 2864-2871.
- [47] 北京市规划和国土资源管理委员会. 北京市规划和国土资源管理委员会关于发布《建设项目规划使用性质正面和负面清单》的通知[J]. 北京市人民政府公报, 2018, (16): 30-35.
- [48] Yin G C, Chen X L, Zhu H H, *et al.* A novel interpolation method to predict soil heavy metals based on a genetic algorithm and neural network model[J]. Science of the Total Environment, 2022, **825**, doi:10.1016/j.scitotenv.2022.153948.

环境科学

CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i> (1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qí, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i> (1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-píng, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i> (1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i> (1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling (1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i> (1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i> (1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i> (1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, <i>et al.</i> (1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i> (1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i> (1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i> (1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i> (1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi (1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i> (1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i> (2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i> (2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i> (2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i> (2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i> (2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i> (2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	JI Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i> (2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i> (2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen (2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i> (2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi (2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i> (2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i> (2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu (2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i> (2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i> (2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i> (2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i> (2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i> (2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i> (2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i> (2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i> (2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i> (2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i> (2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i> (2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i> (2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i> (2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i> (2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i> (2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i> (2395)