

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期
Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力	李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策	王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单	高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析	陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)
基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM _{2.5} 浓度估算	吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪 (5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析	孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素	曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)
天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析	王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性	杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)
典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析	葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估	张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)
基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征: 以郑州市高新区为例	任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)
我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响	高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小栓 (5698)
VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析	王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)
山东省 O ₃ 时空分布及影响因素分析	张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)
2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性	钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建	郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析	张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)
长江流域总氮排放量预测	丁肇慰, 郑华 (5768)
1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征	姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布	韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源	邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征	张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异	李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制	王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)
武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估	张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系	徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素	李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除	赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响	孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮	魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响	南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径	周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势	曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应	高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	李强, 曹莹, 何连生, 王耀峰, 龚成, 何书涵 (5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价	王耀峰, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险	王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探	管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价	强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应	周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)
铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划	朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响	黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除	王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郇建, 叶新新 (6006)
稻田灌溉河流 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及影响因素	吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N ₂ O 的排放特征及微生物特性	王楷, 史雷, 马龙, 王书婷, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响	孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响	杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响	向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量	王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录	(6091)
《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)	

我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价

王耀锋^{1,2}, 何连生^{1*}, 姜登岭², 曹莹¹, 李强¹, 宫健¹

(1. 中国环境科学研究院环境检测与实验中心, 北京 100012; 2. 华北理工大学建筑工程学院, 唐山 063210)

摘要: 焦化是我国的重工行业, 其生产过程中对生态环境造成的严重影响不容忽视。通过收集我国各个地区焦化行业场地的最新污染数据, 试图从全国范围展开分析, 反映我国焦化行业场地土壤的污染状况。运用质量基准法和毒性当量法对焦化土壤 16 种多环芳烃的生态风险进行了评价分析, 运用地累积指数法和潜在生态风险评价法对 8 种重金属进行评价分析。结果表明, 质量基准法计算我国各地区焦化场地土壤的 M-ERM-Q 值都大于 1.51, 为高生态风险, 其中北方地区风险等级最高。根据荷兰土壤质量标准, 毒性当量法表明, 10 种多环芳烃的总毒性当量均大于荷兰标准, 其土壤呈现污染状态, 且北方地区 $\sum_{10} \text{TEQ}$ 远大于荷兰标准, 这与质量标准法的评估结果一致; 地累积指数法得出 Cd 和 Hg 为焦化场地主要污染物, 其余元素危害相对较小。潜在生态风险评价表明, 各地区焦化场地污染较为严重, 山西和河北地区焦化场地的重金属危害程度最为严重, 达到重度污染水平。

关键词: 焦化场地; 土壤; 重金属; 多环芳烃 (PAHs); 生态风险

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5938-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105239

Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China

WANG Yao-feng^{1,2}, HE Lian-sheng^{1*}, JIANG Deng-ling², CAO Ying¹, LI Qiang¹, GONG Jian¹

(1. Environmental Analysis and Testing Laboratory, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Civil and Architectural Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: Coking is a heavy industry in China, and its serious impact on the ecological environment in the production process cannot be ignored. This study collected the latest pollution data of the coking industry sites in various regions throughout China, reflecting the soil pollution status of the coking industry sites in the country as a whole. The ecological risks of the 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coke soils were evaluated and analyzed using the quality benchmark method and the toxicity equivalent method. The "Background Value of Soil Elements in China" was used as the reference standard, and the geo-accumulation index method and the potential ecological risk assessment method were used to evaluate the ecological risks. The ecological risks of various heavy metals were evaluated and analyzed. The results show that the M-ERM-Q value calculated by the quality benchmark method for coking site soils in all regions of the country was greater than 1.51, which indicates a high ecological risk, and the northern region had the highest risk level. According to the Dutch soil quality standard, the toxicity equivalent method revealed that the total toxicity equivalent concentration of 10 PAHs was greater than the Dutch standard, and thus the soil is in a polluted state. The $\sum_{10} \text{TEQ}$ in the northern region was much larger than the Dutch standard, which is consistent with the evaluation result of the quality standard method, which showed that Cd and Hg were the main pollutants in the coking site, and the other elements were relatively less harmful. The evaluation of potential ecological risks showed that the pollution of coking sites in northern regions is relatively serious, especially in the Shanxi and Hebei areas where the soil heavy metal damage was the most serious, reaching a strong level.

Key words: coking site; soil; heavy metals; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); ecological risks

焦化行业是我国重要的工业排放源^[1], 其生产工艺复杂, 污染物排放规模大, 造成周边场地污染严重, 对生态环境造成极大的威胁, 因此成为国内外土壤污染调查及修复的重点关注对象^[2]。多环芳烃 (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 和重金属是焦化行业最为典型的特征污染物。PAHs 主要来源于煤的不完全燃烧以及焦油煤气和其他化学产品的回收和加工; 重金属主要来源于选煤废水下渗、堆煤受雨水淋洗和焦化废气沉降^[3]。

国内外科研工作者对于焦化场地的污染调查和研究主要着重于部分场地、部分地区和部分污染物。孟祥帅等^[4]在焦化厂内不同区域采集样品, 分析各类污染源作用下场地 PAHs 污染程度、分布、影响

途径和组成特征等; 商执峰等^[5]则对某焦化厂周边土壤重金属进行生态风险评价。Duan 等^[6]针对山西典型焦化厂, 提出高温热源是造成土壤 PAHs 严重污染的主要原因, García 等^[7]的研究对某废弃焦化厂不同区域的表层土进行分析, 发现随着距焦炉距离的增加, 土壤中的多环芳烃含量降低。全面分析焦化场地土壤污染特征的研究还未见报道, 本文重点探讨了我国整体焦化场地 16 种优控多环芳烃 (PAHs) 和北方地区焦化场地 8 种重金属污染分布

收稿日期: 2021-05-24; 修订日期: 2021-07-26

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1803401)

作者简介: 王耀锋 (1994 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染物筛选, E-mail: feng952021@163.com

* 通信作者, E-mail: heliansheng08@126.com

特征及生态风险评估,以期为我国焦化行业污染防控和管理提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文数据来源于 50 余篇国内外发表的中文核心期刊及 SCI 文献,以中国知网和 Web of science 为文献检索来源。共收集全国共 56 个焦化厂污染物数据,其中西北地区共 14 个,北方地区共 24 个,南方地区共 11 个。筛选原则为:①调查范围涉及我国多个省份和地区焦化场地及周边环境;②检测数据均为全量,单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;③数据多数来源于近 5 年时间范围内焦化场地污染物暴露含量数据;④污染物的分析检测为国家标准方法或美国环保署标准方法。

考虑南北方重工业发展差异,刘振坤等^[8]的研究指出,我国焦化行业的生产场地总体上呈现北多南少的分布情况,其中北方地区以山西省和河北省的焦化企业最多,西北地区的焦化企业主要分布于内蒙古自治区,而南方地区的焦化企业则主要分布在云南省和江苏省。本文所收集的各地区焦化场地污染数据整体分布情况与该研究比较接近,以中国四大地理区域为划分依据,即青藏地区、西北地区、北方地区和南方地区(由于青藏地区焦化厂数量极少,不予考虑),故主要分析其他三大地理区域焦化场地的 PAHs 分布情况,焦化行业场地重金属主要以我国华北地区和黑龙江地区污染较为严重,故分析这两个地区的重金属污染状况。

1.2 污染评价方法

本文对土壤中多环芳烃进行风险评价,采用质量基准法和毒性当量法^[9,10];对重金属进行风险评价,采用地积累指数法和潜在生态风险评价法^[11,12]。综合考虑焦化场地分布、土地利用类型等因素,从全国范围尺度对土壤污染状况比较分析,选择文献^[13,14]中第一类用地的筛选值为参比标准。

1.2.1 质量基准法

计算公式如下:

$$\text{M-ERM-Q} = (1/n) \cdot \sum (c_i/\text{ERM}_i)$$

式中,M-ERM-Q 为平均效应区间中值商, c_i 为土壤 PAHs 的含量, ERM_i 为 PAHs 效应区间中值, n 为多种 PAHs 的数量,此处 n 为 15。16 种 PAHs 的效应

区间中值参考表 1,质量基准法风险程度评价方法参考表 2^[15,16]。

表 1 土壤中 PAHs 的 ERM 及 TEF 参考值¹⁾

Table 1 Various reference values of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil

项目	土壤 ERM ^[10] / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	TEF ^[17,18]
萘(Nap)*	2.1	0.001
苊烯(Acy)	0.64	0.001
苊(Ace)	0.5	0.001
芴(Flu)	0.54	0.001
菲(Phe)*	1.5	0.001
蒽(Ant)*	1.1	0.01
荧蒽(Fla)*	5.1	0.001
䓛(Pyr)	2.6	0.001
苯并(a)蒽(BaA)*	1.6	0.1
䓞(Chry)*	2.8	0.001
苯并(b)荧蒽(BbF)*	1.88	0.1
苯并(k)荧蒽(BkF)*	1.62	0.1
苯并(a)䓛(BaP)	1.6	1
二苯并(a,h)蒽(DahA)*	0.26	0.1
苯并(g,h,i)䓞(BghiP)*	1.6	1
茚并(1,2,3-cd)䓛(InP)	NA	0.1

1)* 表示文献^[10,17]中环境优控 PAHs

表 2 土壤平均效应区间商值 M-ERM-Q 风险等级划分

Table 2 Soil average effect interval quotient M-ERM-Q risk classification

M-ERM-Q	生态风险等级
≤ 0.1	无
$>0.1, \leq 0.5$	低
$>0.51, \leq 1.5$	中等
>1.51	高

1.2.2 毒性当量法

以 BaP 为标准参考物,从而得出 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 的总 BaP 毒性当量水平,计算公式为:

$$\text{TEQ}_{\text{BaP}} = \sum (c_i \times \text{TEF}_i)$$

式中, TEQ_{BaP} 为基于 BaP 的毒性当量, TEF_i 为第 i 种多环芳烃的毒性当量因子, c_i 为第 i 种多环芳烃的含量。目前国内外尚无土壤 PAHs 污染评价的统一标准,因此本文选择荷兰土壤质量标准^[10,17]中的 10 种多环芳烃来计算 TEQ 值评估土壤风险程度,各 TEF 值见表 1。

1.2.3 地累积指数法

$$I_{\text{geo}} = \log_2 (C_i/kB_i)$$

式中, I_{geo} 为地累积指数, C_i 为实测重金属 i 的含量, k 是常数,取值 1.5, B_i 代表重金属的背景值。地累积指数 I_{geo} 污染程度划分见表 3。

表 3 重金属污染等级划分

Table 3 Classification of heavy metal pollution levels

项目	污染程度					
	无污染	轻度污染	中度污染	中度-重度污染	重度污染	重度-极度污染
参数	$I_{\text{geo}} \leq 0$	$0 < I_{\text{geo}} < 1$	$1 < I_{\text{geo}} < 2$	$2 < I_{\text{geo}} < 3$	$3 < I_{\text{geo}} < 4$	$4 < I_{\text{geo}} < 5$
						$I_{\text{geo}} \geq 5$

1.2.4 潜在生态风险指数法

综合反映各重金属对焦化场地土壤环境危害,划分潜在污染风险等级. 计算公式为:

$$C_r^i = C_{\text{实测}}^i / C_n^i$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

式中, C_r^i 为重金属污染指数, C_n^i 为重金属 i 的背景值, $C_{\text{实测}}^i$ 为实测重金属 i 的含量; E_r^i 为重金属 i 的潜在生态风险系数, T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数; RI 为多种重金属的总潜在生态风险指数. Cd、As、Cr、Hg、Cu、Zn、Pb 和 Ni 毒性响应系数分别为 30、10、2、40、5、1、5 和 5^[19], 总潜在生态风险指数 RI 污染程度划分可见表 4.

表 4 生态危害程度划分

Table 4 Classification of ecological hazards

项目	危害程度				
	1 级(轻度)	2 级(中度)	3 级(重度)	4 级(强烈)	5 级(极强)
E_r^i	<40	40~80	80~160	160~320	>320
RI	<150	150~300	300~600	600~1 200	≥1 200

2 结果与讨论

2.1 数据统计

通过对参考资料进行数据整理,我国三大地理区域焦化场地 PAHs 含量统计结果见表 5,北方地区焦化场地重金属含量统计数据见表 6.

2.2 焦化场地土壤 PAHs 污染特征

土壤 PAHs 含量及污染水平. 从我国焦化场地 16 种 PAHs 土壤含量统计数据来看(表 5),不同地区焦化场地土壤中 $\omega(\sum \text{PAHs})$ 在 1.16~556.18 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 20.38 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 我国目前针对 16 种 PAHs 整体污染水平并没有相应的明确规定,根据文献[62]建立的 PAHs 土壤含量分类标准:未污染($<0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、轻微污染($0.2\sim0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、中度污染($0.6\sim1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和重度污染($>1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),北方地区在山西省和河北省两地达到重度污染水平,平均 $\omega(\text{PAHs})$ 为 35.38 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;南方地区 $\omega(\text{PAHs})$ 为 20.41 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,同样是重度污染水平,江苏省和重庆市部分地区为中度污染水平, $\omega(\text{PAHs})$ 为 0.82 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;西北地区虽然 $\omega(\text{PAHs})$ 相对较低,为 5.35 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,但也超过重度污染标准. 根据 GB 36600-2018 中针对第一类建设用地土壤所列的 8 种 PAHs 筛选值,各个地区的 BaP 和 DahA 均有超标,其中北方地区 BaP 超标较多,最大超标倍数为 60.29. 总体来看,北方地区焦化厂数量多、分布广,土壤多环芳烃含量普遍超标,主要以山西省和河北省为主.

土壤中 PAHs 组成特征. 如图 1 所示,焦化场地土壤 PAHs 组成中, Nap、Phe、Fla、Pyr 和 Chry 含量占比较高,而且变化幅度也比较大, Acy、DahA、BghiP 和 InP 变化幅度较低. 这与文献[63]的研究结果比较相似. 西北地区和北方地区多环芳烃组成

与南方差异较大,这可能因为:①南方地区全年气温高且湿度较大,降雨量也远大于其他地区,部分 PAHs 容易通过空气挥发或者经雨水冲刷在土壤环境中自然迁移;②张俊叶等^[64]的研究发现石油储量越多的地方,土壤 PAHs 含量也越多,我国西北地区和北方地区储油量明显比南方地区大,故可能造成西北地区、北方地区和南方地区焦化场地土壤中 PAHs 含量较大的差异性;③目前已有众多研究表明,土壤 PAHs 的一个重要来源是矿物燃料(煤、石油、天然气)、木材和各类含碳化合物的燃烧,我国西北地区和北方地区石油开采与煤炭燃烧现象明显多于南方地区,这也容易造成焦化场地 PAHs 组成不同.

西北、北方和南方地区焦化场地土壤低环(2~3 环)PAHs 所占质量分数分别为 31.44%、36.34% 和 11.53%,中环(4 环)PAHs 为 10.46%、39.14% 和 58.79%,高环(5~6 环)PAHs 为 58.08%、26.30% 和 29.67%. 虽然各地区土壤中 PAHs 组分存在差异,但总体都表现出以中、高环 PAHs 为主的规律. 西北地区焦化场地土壤低环 PAHs 所占质量分数为 30% 左右,可能是焦化厂周边涉及城区商业区、工业区及交通道路等环境,周边交通污染及化石燃料燃烧造成一定影响. 而南方地区焦化场地土壤低环 PAHs 占比为 10% 左右,主要源于其焦化厂分布在郊区农田周边,受周边环境的影响较小. 此外,7 种致癌物在各地区 $\omega(\sum_7 \text{PAHs})$ 分别为 46.96、207.68 和 176.94 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别占 PAHs 总量的 54.85%、37.34% 和 54.17%,严重威胁生态环境和人体健康.

对于 GB 36600-2018 规定的 8 种 PAHs,三大地理区域焦化场地土壤含量远高于标准值. 与国内其他相关区域土壤中 PAHs 含量相比,焦化场地土壤

表 5 我国三大地理区域焦化场地土壤 PAHs 含量统计¹⁾/mg·kg⁻¹
Table 5 Statistics of soil PAHs content in coking sites in three geographical regions of China/mg·kg⁻¹

污染物	项目	西北地区	北方地区	南方地区	文献
萘(Nap)	范围	0.866~567.5	0.023~4 690	0.024~2 820	[4,20~44]
	AVG	15.1	48.79	22.13	
	SD	145.7	60.72	76.24	
	N	14	17	8	
萘烯(Acy)	范围	1.2~89.1	0.025~501	nd~122	[4,20~36,42~48]
	AVG	1.64	19.38	1.62	
	SD	50.13	45.6	9.71	
	N	8	18	7	
萘(Ace)	范围	1.1~71.7	0.39~3 450	nd~8.4	[4,20~36,42~48]
	AVG	4.13	35.84	1.73	
	SD	15.1	15.12	5.13	
	N	7	18	9	
芴(Flu)	范围	0.6~90.5	0.008~1 970	0.025~319	[4,20~36,38,40~44,47,48]
	AVG	2.6	22.47	5.3	
	SD	25.16	30.96	82.11	
	N	6	21	13	
菲(Phe)	范围	2.4~365.9	0.03~1 190	0.252~1 130	[4,20~38,40~51]
	AVG	3.13	66.95	6.30	
	SD	20.51	118.19	80.59	
	N	6	23	13	
蒽(Ant)	范围	0.4~128.1	0.01~222	nd~399	[4,20~40,41~47,49~51]
	AVG	2.71	28.72	2.4	
	SD	59.21	43.71	64.2	
	N	14	23	11	
荧蒽(Fla)	范围	0.7~116.9	0.04~1 242.05	0.15~776	[20~51]
	AVG	2.32	75.47	12.11	
	SD	19.75	250.11	79.4	
	N	8	23	14	
芘(Pyr)	范围	1.3~103.4	0.018~1 023.52	0.1~3 180	[4,20~40,41~51]
	AVG	5.3	64.64	16.8	
	SD	17.92	202.04	83.2	
	N	9	24	12	
苯并(a)蒽(BaA)	范围	13.7~178.9	0.01~492.99	0.04~1 490	[4,20~39,42~51]
	AVG	3.51	33.91	17.12	
	SD	47.61	97.33	222.3	
	N	14	24	11	
䟽(Chry)	范围	2.7~113.8	0.019~528.7	0.02~1 430	[4,20~37,45~48]
	AVG	5.03	43.69	32.07	
	SD	24.7	113.01	234.7	
	N	9	23	10	
苯并(b)荧蒽(BbF)	范围	3.3~91.7	0.023~452.27	0.03~1 550	[4,20~36,38,39,42~51]
	AVG	13.7	33.26	20.91	
	SD	20.7	66.03	262.7	
	N	14	24	11	
苯并(k)荧蒽(BkF)	范围	0.04~174.9	0.01~394	0.01~426	[4,20~39,42~47,49~51]
	AVG	13.12	29.73	17.11	
	SD	42.7	45.01	68.4	
	N	9	22	13	
苯并(a)芘(BaP)	范围	0.01~502.2	0.08~428.43	0.02~1 680	[4,20~40,42~43,45~51]
	AVG	15.2	33.16	18.12	
	SD	78.41	84.29	242.6	
	N	11	24	10	
二苯并(a,h)蒽(DahA)	范围	0.07~213.1	0.09~230.68	0.2~235	[4,20~38,41~45,48~51]
	AVG	12.1	15.39	16.31	
	SD	30.13	24.66	55.13	
	N	11	23	10	
苯并(g,h,i)芘(BghiP)	范围	1.7~109.6	0.08~285.06	0.01~10.44	[4,20~38,40~43,45,46,48~51]
	AVG	7.6	16.24	5.05	
	SD	17.16	57.76	0.07	
	N	14	23	11	
茚并(1,2,3-cd)芘(InP)	范围	1.5~89.6	0.01~243.05	0.01~1 050	[4,20~37,41~43,45~48,50,51]
	AVG	6.5	18.54	8.2	
	SD	28.73	43.39	58.02	
	N	14	24	11	

1) AVG 表示平均值,SD 表示数据标准差,N 表示焦化厂数量

表 6 我国北方地区焦化场地土壤重金属含量统计¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 6 Statistics of heavy metal contents in soils of coking sites in northern regions of China/mg·kg⁻¹

元素	项目	山西	北京	河北	黑龙江	文献
Cd	范围	0.06 ~ 8.23	0.07 ~ 0.53	0.09 ~ 0.77	0.04 ~ 0.88	[5,52 ~ 61]
	AVG	1.22	0.08	0.57	0.07	
	SD	0.09	18.5	0.32	8.7	
	N	7	5	7	2	
Cr	范围	4.89 ~ 280.3	3.40 ~ 745.0	36.94 ~ 116.4	8.76 ~ 20.8	[5,52 ~ 61]
	AVG	86.82	37.1	68.65	14.78	
	SD	16.92	92.77	1.24	9.4	
	N	7	5	7	2	
As	范围	2 ~ 433.37	0.5 ~ 17.9	0.55 ~ 9.14	1.82 ~ 5.5	[5,50 ~ 61]
	AVG	30.43	7.12	3.01	3.66	
	SD	21.11	2.79	0.08	—	
	N	7	4	7	2	
Hg	范围	0.019 ~ 1.6	0.3 ~ 21	0.02 ~ 6.85	—	[5,52 ~ 55,58,59]
	AVG	0.11	0.06	0.3	—	
	SD	0.09	7.17	0.18	—	
	N	5	2	3	—	
Pb	范围	4.06 ~ 40.5	0.25 ~ 722.0	19.87 ~ 71.59	6.22 ~ 9.56	[5,52 ~ 57,59 ~ 61]
	AVG	22.34	7.1	27.79	7.89	
	SD	9.95	83.14	1.16	—	
	N	5	3	7	2	
Cu	范围	18.99 ~ 98.49	1.50 ~ 25.90	17.76 ~ 78.3	4.7 ~ 8.44	[5,52 ~ 58,61]
	AVG	49.92	16.1	50.3	6.57	
	SD	23.66	19.41	20.26	—	
	N	7	4	7	2	
Zn	范围	39.41 ~ 303.4	50.33 ~ 178.21	35.78 ~ 205.53	28.14 ~ 38.66	[5,52 ~ 58,61]
	AVG	86.58	156.6	78.14	33.4	
	SD	36.43	55.89	3.61	—	
	N	7	5	5	1	
Ni	范围	20.03 ~ 41.8	1.10 ~ 84.70	26.29 ~ 56.59	—	[52 ~ 61]
	AVG	31.12	21.81	35.99	—	
	SD	0.51	16.1	0.92	—	
	N	6	2	5	—	

1) AVG 表示平均值,SD 表示数据标准差,N 表示焦化厂数量,“—”未进行相关项目分析

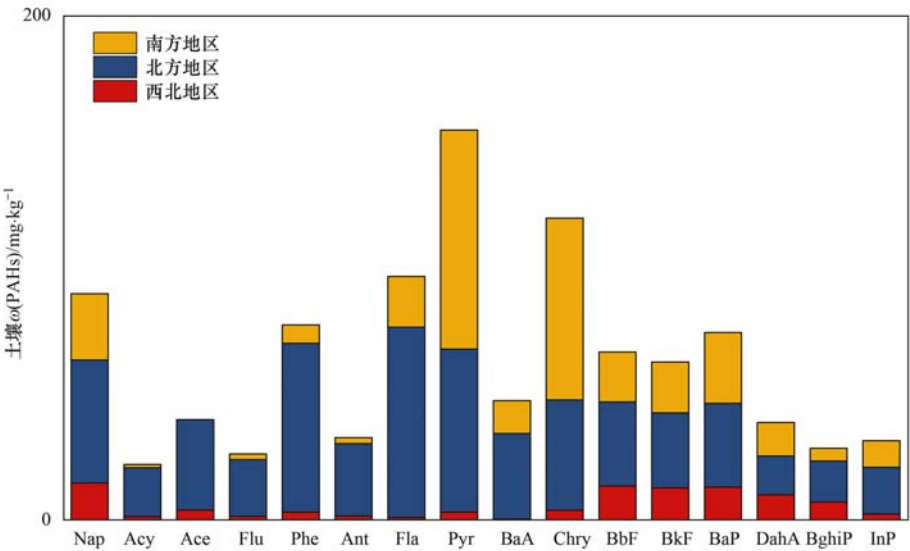


图 1 焦化土壤 PAHs 在不同地区组成特征

Fig. 1 Composition characteristics of PAHs in coking soils in different regions

PAHs 质量含量整体偏高,属于重污染水平. 且焦化 场地环境风险主要是由 BaP 和 BbF 等高环 PAHs 带

来的致癌性。

总体而言,我国各地区焦化厂的基本工艺环节主要分为备煤、炼焦、化产和净化回收等。以本文所有焦化场地 PAHs 含量数据及其相应厂区背景为基础,总体得出,焦化场地土壤 PAHs 污染在化产车间最为严重,炼焦车间次之,堆煤车间最轻。其中,在化产车间应该重点监管冷鼓、脱硫、蒸氨和脱苯这 4 个工段,该区域各种化学原料繁多且反应复杂,伴有无组织和无规则的烟气排放;同时存在各类油液和原料渗漏的现象;再有大量焦油、沥青的溢出和各类废渣的填埋。该结论与周若凡等^[3]的研究结果相符。因此,各焦化厂生产中应重点监管化产车间的生产过程,尽量减少直接排放,改善工艺技术;同时妥善处理备煤车间的原煤堆放,减少废渣的直接填埋。

2.3 焦化场地土壤重金属污染特征

土壤重金属平均值分布。从北方地区焦化场地 8 种重金属土壤含量统计数据来看(表 6),重金属含量最高的行政区分别为: $\omega(\text{Cd}) 1.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (山西省)、 $\omega(\text{Cr}) 86.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (山西省)、 $\omega(\text{As}) 30.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (山西省)、 $\omega(\text{Hg}) 0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (河北省)、 $\omega(\text{Pb}) 27.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (河北省)、 $\omega(\text{Cu}) 50.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (河北省)、 $\omega(\text{Zn}) 156.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (北京市)和 $\omega(\text{Ni}) 35.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (河北省)。其中山西和河北两地焦化场地重金属平均值总体较高。

以文献[14]为标准值,计算各地区焦化土壤 Cd、Cr、As、Hg、Pb、Cu、Zn 和 Ni 的平均值超土壤背景值的比例(平均倍数)分别为 3.68、0.86、0.98、5.53、0.62、1.46、1.19 和 1.10 倍;焦化土壤平均值超出标准值最多的行政区分别为:山西省(Hg, 10.92 倍)和河北省(Cd, 5.87 倍)。其中土壤 Pb 的超标率最低,平均超标倍数也都低于其他几种重金属;多数焦化场地 Cd 和 Hg 远高于标准值,表明焦化土壤中这两种元素存在明显富集。

土壤重金属空间分布。根据对北方地区焦化场地土壤重金属平均值统计(图 2),结果显示,山西省和河北省均有较大范围的 Cu 高值区,Cu 在华北各个地区均有超标,表明焦化场地明显存在 Cu 的污染源;As 和 Pb 在各个地区的含量均较低且分布较为平均,As 在山西省焦化地区略有超标,Pb 在河北省焦化地区略有超标,超标倍数均在 3 倍以下;北京市焦化地区 Cu 和 Zn 元素略有超标。山西省除 Pb 元素外,其余元素都超标,超标最多的元素分别为 Hg 和 Cd;河北省焦化地区除 As 元素外,其余各元素都出现较高值,都有超标且分布较为平均。

总体来看,我国北方地区焦化场地土壤重金属

污染特征表现为: Cd 在北方多数焦化地区有超标且超标情况比较严重,应当加以管控; As 仅在山西省焦化地区有所超标,对整体环境影响较小; Pb 在河北有所超标,其他地区都为正常,相对污染同样较轻。Cr、Hg、Cu、Zn 和 Ni 在山西和河北地区普遍存在污染,分布范围广泛且含量较为平均。

从生产及工艺流程分析,总体而言,北方地区各个焦化场地土壤重金属污染主要集中在备煤车间和化产车间。这主要因为:①在备煤车间,储存的原煤受到雨水冲刷;煤焦在筛选、运输和装卸过程中产生的颗粒沉降;选煤过程中产生的污水下渗;②在化产车间,焦炉内煤气燃烧及煤的高温干馏产生的废气在沉降作用下同样造成土壤污染。因此,要严格规范焦化厂内备煤车间的原煤堆放,减少化产车间的污染排放,从而控制焦化场地土壤重金属的污染。

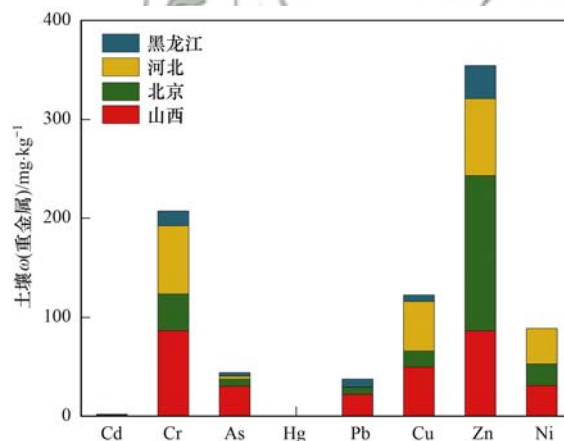


图2 焦化土壤重金属在不同地区组成特征

Fig. 2 Composition characteristics of heavy metals in coking soil in different regions

3 生态风险评价

3.1 焦化场地土壤多环芳烃风险评价

根据质量基准法,计算土壤 M-ERM-Q 的值,结果如表 7,各个焦化地区土壤的 M-ERM-Q 值都大于 1.51,代表高生态风险;北方地区土壤的 M-ERM-Q 高达 26.67,远远大于 1.51,为高生态风险。

由于我国目前没有统一评价土壤 PAHs 的环境质量标准,故本文选取荷兰土壤质量标准限值为评价依据^[17,18],结果如表 8 所示,各个地区焦化场地土壤 PAHs 均超过荷兰标准值规定的 10 种 PAHs 毒性当量限值 $0.033 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明焦化地区土壤已受到 PAHs 的污染,存在生态风险。各地区单体 BaP 的平均毒性当量分别为 14.1(西北)、33.16(北方)和 $5.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (南方),远远高于荷兰土壤质量标准;致癌性较强的单体 BkF,其平均毒性当量在西

北地区、北方地区和南方地区分别为 1.31、2.97 和 2.23 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,相比荷兰土壤质量标准要高;单体 BaA 的毒性当量范围为 0.058 ~ 3.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,相对于荷兰土壤质量标准同样较高,其不利影响值得关注;致癌风险较小的单体 BghiP 毒性当量范围为 0.04 ~ 0.16 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,略高于荷兰土壤质量标准;而单体 Nap、Phe 和 Ant 的平均毒性当量仅在北方

和南方部分地区有所超标.

表 7 焦化场地土壤 M-ERM-Q 评价结果

Table 7 Soil M-ERM-Q evaluation results of the coking site			
项目	西北地区	北方地区	南方地区
M-ERM-Q	7.31	26.67	13.76
污染程度	高生态风险	高生态风险	高生态风险

表 8 多环芳烃的毒性当量及标准¹⁾

Table 8 Toxicity equivalent concentration and standard of polycyclic aromatic hydrocarbons								
PAHs	环数	荷兰土壤标准 ^[17,18] / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	TEQ _{BaP} 毒性当量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$					
			西北地区		北方地区		南方地区	
			范围	AVG	范围	AVG	范围	AVG
萘 (Nap)	2	0.015	$0.86 \times 10^{-3} \sim 0.61$	0.016	$0.23 \times 10^{-4} \sim 4.8$	0.052	$0.24 \times 10^{-4} \sim 2.91$	0.029
苊烯 (Acy)	3	—	$0.46 \times 10^{-2} \sim 0.089$	0.001	$0.25 \times 10^{-4} \sim 0.53$	0.018	nd ~ 0.12	0.001
苊 (Ace)	3	—	$0.003 \sim 0.69 \times 10^{-5}$	0.004	$0.39 \times 10^{-3} \sim 3.47$	0.015	nd ~ 0.26×10^{-4}	0.2×10^{-4}
芴 (Flu)	3	—	0.007 ~ 0.091	0.001	$0.8 \times 10^{-5} \sim 1.97$	0.022	$0.25 \times 10^{-4} \sim 0.32$	0.002
菲 (Phe)	3	0.05	0.025 ~ 0.39	0.003	$0.3 \times 10^{-4} \sim 1.19$	0.067	$0.25 \times 10^{-3} \sim 1.193$	0.007
蒽 (Ant)	3	0.05	0.009 ~ 1.34	0.018	$0.1 \times 10^{-3} \sim 2.2$	0.28	nd ~ 3.9	0.024
荧蒽 (Fla)	4	0.015	0.011 ~ 0.116	0.001	$0.4 \times 10^{-4} \sim 1.24$	0.075	$0.15 \times 10^{-3} \sim 0.77$	0.02
芘 (Pyr)	4	—	0.009 ~ 0.103	0.003	$0.18 \times 10^{-4} \sim 1.023$	0.065	$0.1 \times 10^{-3} \sim 3.18$	0.087
苯并(a)蒽 (BaA)	4	0.02	0.037 ~ 17.9	0.058	0.001 ~ 49.2	3.39	0.004 ~ 149	1.302
䓛 (Chry)	4	0.02	0.02 ~ 1.13	0.04	$0.19 \times 10^{-3} \sim 5.28$	0.44	$0.2 \times 10^{-3} \sim 14.3$	0.72
苯并(b)荧蒽 (BbF)	5	0.025	1.3 ~ 9.17	1.37	$0.23 \times 10^{-2} \sim 45.2$	3.32	0.003 ~ 155	1.98
苯并(k)荧蒽 (BkF)	5	0.025	1.12 ~ 17.49	1.31	0.001 ~ 39.4	2.97	0.001 ~ 42.6	2.23
苯并(a)芘 (BaP)	5	—	0.01 ~ 502.2	14.1	0.08 ~ 428.43	33.16	0.02 ~ 1680	5.83
二苯并(a,h)蒽 (DahA)	5	—	0.07 ~ 213.1	10.1	0.09 ~ 230.68	15.39	0.2 ~ 235	13.31
苯并(g,h,i)芘 (BghiP)	6	0.02	0.18 ~ 1.09	0.04	$0.8 \times 10^{-3} \sim 2.85$	0.16	$0.1 \times 10^{-3} \sim 0.11$	0.06
茚并(1,2,3-cd)芘 (InP)	6	0.025	1.51 ~ 9.04	0.27	0.001 ~ 24.3	1.85	0.001 ~ 101	1.08
$\sum_{10} \text{TEQ}_{\text{BaP}}$	—	0.033	—	3.24	—	12.601	—	7.189
$\sum_{16} \text{TEQ}_{\text{BaP}}$	—	—	—	26.42	—	61.272	—	23.399

1) AVG 表示平均值,“—”表示未进行相关项目分析

因此,各地区焦化场地的 $\sum_{10} \text{TEQ}$ 均大于荷兰标准,土壤呈现污染状态,且北方地区 $\sum_{10} \text{TEQ}$ 远大于荷兰标准,超标倍数高达 380 多倍,焦化场地土壤多环芳烃呈现严重污染,应当引起相关部门重视,这也与质量标准法的评价结果一致.

3.2 焦化场地土壤重金属风险评价

以文献[14]为标准,各地区焦化土壤 8 种重金属的地累积指数如图 3, Cd 在整体上呈现较大范围污染,其中以河北、黑龙江两地较严重,为中度污染,山西地区为轻度污染; Hg 和 Cu 呈现中等范围污染, Hg 在山西地区为中-重度污染,在河北为中度污染, Cu 仅在山西和河北呈现轻度污染; As 和 Zn 在各地区整体污染程度较小, As 只在山西呈现轻度污染, Zn 仅在北京呈现轻度污染; Cr、Pb、Ni 在各地区焦化场地整体影响程度最小,这 3 种元素在各个地区焦化场地的平均值均呈现无污染状态. 整体而言,焦化场地重金属以 Cd 和 Hg 为主.

重金属单一元素和多种元素的潜在生态风险程度计算结果见表 9. 结果表明,焦化场地土壤中 Cd 具有很强的潜在生态风险,在河北及黑龙江焦化场地危害程度可达到强烈水平, Hg 同样具有相当的潜在生态风险,在河北焦化地区 E_i^p 达到 184.62,对环境有强烈的危害程度. 二者生态风险因子 E_i^p 加合可占生态风险评价指数 RI 的 91%,其余重金属的潜在生态危害程度均为轻微. As 作为第三危害物,具有轻微的潜在生态风险,其生态风险因子 E_i^p 仅占除 Cd 和 Hg 外剩余污染物 E_i^p 总和的 33.6%,因此,可基本确定 Cd 和 Hg 为焦化场地土壤重金属中的主要污染物.

用 ArcGIS10.2 绘制华北地区及黑龙江地区重金属元素的 RI 等级化分布,如图 4. 可以看出,北方地区潜在生态风险评价指数整体比较大,山西省、河北省焦化场地潜在生态风险等级 (RI 值分别为 557.4 和 390.05) 属于重度,北京整体环境较好 (RI 值仅为 78.63).

表 9 各元素潜在生态风险评价的风险因子

Table 9 Risk factors for potential ecological risk assessment of each element

地区	E_r^i								RI
	Cd	Cr	As	Hg	Pb	Cu	Zn	Ni	
山西	68.04	2.97	27.16	67.69	4.29	11.04	1.16	5.78	188.17
北京	24.74	1.21	2.49	36.92	1.36	5.73	2.11	4.05	78.63
河北	176.28	2.25	2.69	184.62	5.34	11.13	1.05	6.69	390.05
黑龙江	173.19	0.48	3.27	—	1.52	1.45	0.45	—	180.36

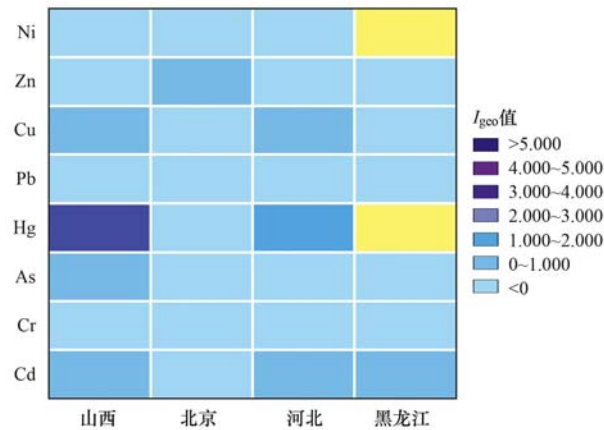


图 3 北方地区焦化场地土壤重金属的地累积指数评价

Fig. 3 Evaluation of geo-accumulation index of soil heavy metals in the northern coking site.

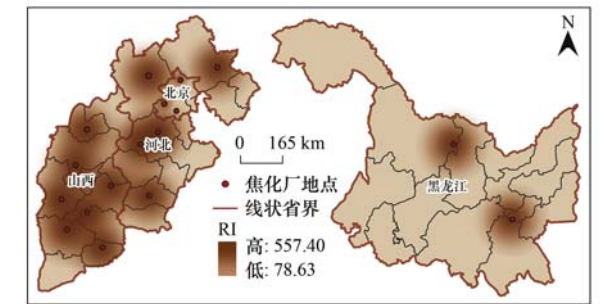


图 4 北方地区焦化场地土壤重金属的潜在生态风险指数

Fig. 4 Potential ecological risk index of heavy metals in the soil of coking sites in northern China

4 结论

(1)质量基准法评价结果表明,我国北方地区焦化场地土壤多环芳烃为高生态风险。

(2)根据荷兰土壤质量标准,毒性当量法评价结果表明, $\sum_{10} \text{TEQ}$ 远高于荷兰标准,高达 380 多倍,北方地区焦化场地土壤多环芳烃呈现严重污染。

(3)地累积指数评价结果表明,焦化地区土壤 Cd、Hg 超过标准值比较严重;其余重金属元素污染程度相对较轻。

(4)潜在生态风险评价结果表明,焦化场地土壤中 Cd 具有很强的潜在生态风险。多种重金属元素的总生态风险评价指数在北方各地区分别为 557.40(山西)、78.63(北京)、390.05(河北)和

180.37(黑龙江),山西省焦化场地 RI 值最高,危害程度为重度。

参考文献:

[1] 楼春, 钟茜. 焦化厂场地土壤污染分布特征分析[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(4): 177-179.

Lou C, Zhong X. Analysis on distribution characteristics of soil pollution in coking plant site [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(4): 177-179.

[2] 谢剑, 李发生. 中国污染场地修复与再开发[J]. 环境保护, 2012, (S1): 15-24.

[3] 周若凡, 吴艳辉. 典型焦化场地污染特征研究进展[J]. 山东化工, 2020, 49(14): 51-52, 56.

Zhou R F, Wu Y H. Research progress on pollution characteristics of typical coking sites [J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(14): 51-52, 56.

[4] 孟祥帅, 陈鸿汉, 郑从奇, 等. 焦化厂不同污染源作用下土壤 PAHs 污染特征[J]. 中国环境科学, 2020, 40(11): 4857-4864.

Meng X S, Chen H H, Zheng C Q, et al. Pollution characteristics of PAHs in soil at an abandoned coking plant affected by different sources [J]. China Environmental Science, 2020, 40(11): 4857-4864.

[5] 商执峰, 祝方, 刘涛, 等. 焦化厂周边土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6): 288-292.

Shang Z F, Zhu F, Liu T, et al. Distribution and ecological risk assessment of soil heavy metals around coking plant [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(6): 288-292.

[6] Duan Y H, Shen G F, Tao S, et al. Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils at a typical coke production base in Shanxi, China [J]. Chemosphere, 2015, 127: 64-69.

[7] García R, Díaz-Somoano M, Calvo M, et al. Impact of a semi-industrial coke processing plant in the surrounding surface soil. Part II: PAH content [J]. Fuel Processing Technology, 2012, 104: 245-252.

[8] 刘振坤, 吴华勇, 刘峰, 等. 中国焦化场地近 20 年时空演变特征及驱动因素[J]. 生态环境学报, 2021, 30(3): 604-613.

Liu Z K, Wu H Y, Liu F, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and its driving factors of national coking sites in the last 20 years [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(3): 604-613.

[9] 于国光, 张志恒, 叶雪珠, 等. 杭州市郊区表层土壤中的多环芳烃[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 925-928.

Yu G G, Zhang Z H, Ye X Z, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in topsoil of suburban Hangzhou [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 925-928.

[10] Ashayeri N Y, Keshavarzi B, Moore F, et al. Presence of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments and surface water

- from Shadegan wetland - Iran: a focus on source apportionment, human and ecological risk assessment and Sediment-Water Exchange[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **148**: 1054-1066.
- [11] 杜昊霖, 王莺, 王劲松, 等. 青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4422-4431.
- Du H L, Wang Y, Wang J S, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in typical watersheds of Qinghai-Tibet plateau[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4422-4431.
- [12] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2822-2833.
- Chen W X, Li Q, Wang Z, *et al.* Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2822-2833.
- [13] GB 36600-2018, 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [14] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [15] Li P, Cao J, Diao X P, *et al.* Spatial distribution, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface seawater from Yangpu Bay, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **93**(1-2): 53-60.
- [16] Long E R, MacDonald D D, Severn G G, *et al.* Classifying probabilities of acute toxicity in marine sediments with empirically derived sediment quality guidelines [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2000, **19**(10): 2598-2601.
- [17] 陈敏, 陈莉, 黄平. 乌鲁木齐土壤中多环芳烃的污染特征及生态风险评价[J]. *中国环境监测*, 2015, **31**(2): 84-91.
- Chen M, Chen L, Huang P. Concentration and ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soils of Urumqi area, China[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(2): 84-91.
- [18] 王学彤, 贾英, 孙阳昭, 等. 典型污染区农业土壤中PAHs的分布、来源及生态风险[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(11): 2433-2439.
- Wang X T, Jia Y, Sun Y Z, *et al.* Distribution, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils from a typical contaminated area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(11): 2433-2439.
- [19] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(2): 112-115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [20] 王忠旺, 韩玮, 陈雨龙, 等. 表面活性剂对焦化污染土壤中多环芳烃淋洗修复研究[J]. *环境污染与防治*, 2020, **42**(6): 690-695.
- Wang Z W, Han W, Chen Y L, *et al.* Remediation for coking contaminated soil with PAHs by surfactants[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2020, **42**(6): 690-695.
- [21] 郝丽虹, 张世晨, 武志花, 等. 低山丘陵区焦化厂土壤中PAHs空间分布特征[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(7): 2625-2631.
- Hao L H, Zhang S C, Wu Z H, *et al.* Spatial distribution characteristics of PAHs in soil at hilly areal coking plant[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(7): 2625-2631.
- [22] 王佩, 蒋鹏, 张华, 等. 焦化厂土壤和地下水中PAHs分布特征及其污染过程[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(5): 752-759.
- Wang P, Jiang P, Zhang H, *et al.* Distribution characteristics and polluting process of PAHs in soil and groundwater at a coking plant site[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(5): 752-759.
- [23] 贾晓洋, 姜林, 夏天翔, 等. 焦化厂土壤中PAHs的累积、垂向分布特征及来源分析[J]. *化工学报*, 2011, **62**(12): 3525-3531.
- Jia X Y, Jiang L, Xia T X, *et al.* Analysis on accumulation, distribution and origin of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils under a coking plant[J]. *CIESC Journal*, 2011, **62**(12): 3525-3531.
- [24] 阴丽琴, 曹巍, 王营营, 等. 某焦化厂改建用地土壤中PAHs污染及其风险评价[J]. *环境科学与技术*, 2019, **42**(8): 209-216.
- Yin L Q, Cao W, Wang Y Y, *et al.* Pollution and risk assessment of PAHs in soils from a reconstructed land of a coking plant[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(8): 209-216.
- [25] 刘庚, 毕如田, 王世杰, 等. 某焦化场地土壤多环芳烃污染数据的统计特征[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(6): 1722-1728.
- Liu G, Bi R T, Wang S J, *et al.* Statistical characteristic analysis of soil PAHs in a coking contaminated site of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(6): 1722-1728.
- [26] 刘庚, 郭观林, 南锋, 等. 某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4256-4262.
- Liu G, Guo G L, Nan F, *et al.* Heterogeneous characteristic of PAHs' spatial distribution in a large coking site of China[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4256-4262.
- [27] 崔阳, 郭利利, 张桂香, 等. 山西焦化污染区土壤和农产品中PAHs风险特征初步研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(1): 72-79.
- Cui Y, Guo L L, Zhang G X, *et al.* Human health risks of PAHs in soils and agricultural products in coking areas, Shanxi province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(1): 72-79.
- [28] Zhang G X, He L X, Guo X F, *et al.* Mechanism of biochar as a biostimulation strategy to remove polycyclic aromatic hydrocarbons from heavily contaminated soil in a coking plant[J]. *Geoderma*, 2020, **375**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114497.
- [29] Liu Z M, Gao Z M, Lu X G. An integrated approach to remove PAHs from highly contaminated soil: electro-fenton process and bioslurry treatment[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2020, **231**(6), doi: 10.1007/s11270-020-04696-7.
- [30] Tao S Y, Zhong B Q, Lin Y, *et al.* Application of a self-organizing map and positive matrix factorization to investigate the spatial distributions and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Xiangfen County, northern China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **141**: 98-106.
- [31] Zhao L, Hou H, Shangguang Y X, *et al.* Occurrence, sources, and potential human health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils of the coal production area surrounding Xinzhou, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **108**: 120-128.
- [32] Cao W, Yin L Q, Zhang D, *et al.* Contamination, sources, and health risks associated with soil PAHs in rebuilt land from a coking plant, Beijing, China [J]. *International Journal of*

- Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(4), doi: 10.3390/ijerph16040670.
- [33] Cao W, Geng S Y, Zou J, *et al.* Post relocation of industrial sites for decades; ascertain sources and human risk assessment of soil polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **198**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110646.
- [34] Chen J D, Liao J B, Wei C H. Coking wastewater treatment plant as a sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments and ecological risk assessment[J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/S41598-020-64835-2.
- [35] Liu D M, Liu Z H, Li Y Y. Distribution and occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons from coal combustion and coking and its impact on the environment[J]. *Energy Procedia*, 2011, **5**: 734-741.
- [36] Li H L, Chen, J J, Wu W, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in different size fractions of soil from a coke oven plant and its relationship to organic carbon content [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **176** (1-3): 729-734.
- [37] 何佳璘, 段永红, 孙健. 晋中某焦化企业周边农田表土中 PAHs 污染特征及风险分析[J]. *山西农业科学*, 2020, **48** (3): 416-419, 440.
- He J L, Duan Y H, Sun J. PAHs pollution characteristics and risk analysis in the topsoil of farmland around a coking company in Jinzhong[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2020, **48**(3): 416-419, 440.
- [38] 谢荣焕. 安徽北部某焦化厂场地土壤和地下水环境调查与风险评估[J]. *中国资源综合利用*, 2019, **37**(5): 145-147.
- Xie R H. Soil and groundwater environment investigation and risk assessment of a coking plant Site in northern Anhui province[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2019, **37**(5): 145-147.
- [39] 尹勇, 戴中华, 蒋鹏, 等. 苏南某焦化厂场地土壤和地下水特征污染物分布规律研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(8): 1525-1531.
- Yin Y, Dai Z H, Jiang P, *et al.* Characteristic distributions of typical contaminants in the soils and groundwater of a coking plant in the south of Jiangsu province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(8): 1525-1531.
- [40] 王培俊, 刘俐, 李发生, 等. 西南某焦化场地土壤中典型污染物的特征分布[J]. *煤炭学报*, 2011, **36**(9): 1587-1592.
- Wang P J, Liu L, Li F S, *et al.* Characteristic distribution of typical contaminants in the soil of a coking plant site in the southwest of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, **36** (9): 1587-1592.
- [41] 张亦弛, 于玲红, 王培俊, 等. 某焦化生产场地典型污染物的垂向分布特征[J]. *煤炭学报*, 2012, **37**(7): 1211-1218.
- Zhang Y C, Yu L H, Wang P J, *et al.* Vertical distribution of typical contaminants at a coking plant site, China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, **37**(7): 1211-1218.
- [42] 钟名誉, 陈卓, 贾晓洋, 等. 焦化污染土壤有机质不同组分中多环芳烃分布及其生物有效性分析[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(8): 3349-3358.
- Zhong M Y, Chen Z, Jia X Y, *et al.* The analysis in distribution and bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons in organic matter components of coking contaminated soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(8): 3349-3358.
- [43] 郭晓欣, 范婧婧, 周友亚, 等. 焦化场地典型多环芳烃类污染物精细化风险评估[J]. *生态毒理学报*, 2021, **16**(1): 155-164.
- Guo X X, Fan J J, Zhou Y Y, *et al.* Refined risk assessment of typical polycyclic aromatic hydrocarbons in a coking site [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2021, **16**(1): 155-164.
- [44] 钟岩. 云南曲靖某煤化工基地及周边土壤中多环芳烃的检测研究[J]. *干旱环境监测*, 2016, **30**(4): 165-169.
- Zhong Y. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons of coal chemical plant and the surrounding soil in Qujing of Yunnan province[J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2016, **30** (4): 165-169.
- [45] Qi H X, Chen X L, Du Y E, *et al.* Cancer risk assessment of soils contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons in Shanxi, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **182**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109381.
- [46] Wang Y L, Xia Z H, Liu D, *et al.* Multimedia fate and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in a coking industry city in Northern China[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **181**: 115-121.
- [47] 张玉, 宋光卫, 刘海红, 等. 某大型化工场地土壤中多环芳烃(PAHs)污染现状与风险评估[J]. *生态学杂志*, 2019, **38** (11): 3408-3415.
- Zhang Y, Song G W, Liu H H, *et al.* Pollution status and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil of a large chemical engineering site [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(11): 3408-3415.
- [48] 王荔, 张腾飞, 杨苏才, 等. 焦化厂 PAHs 污染土壤中微生物群落多样性特征[J]. *环境工程技术学报*, 2021, **41**(4): 720-726.
- Wang L, Zhang T F, Yang S C, *et al.* Characteristics of microbial community diversity in PAHs contaminated soil of a coking plant [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, **11**(4): 720-726.
- [49] 邢志林, 袁山林, 郭江枫, 等. 重庆工业园区土壤微生物群落结构及功能分析——以焦化厂土壤为例[J]. *环境影响评价*, 2020, **42**(2): 74-78.
- Xing Z L, Yuan S L, Guo J F, *et al.* Evaluation of microbial community structure and functional characteristics in industrial park soil—a case study of coking plant soil[J]. *Environmental Impact Assessment*, 2020, **42**(2): 74-78.
- [50] Zhong M S, Jiang L, Jia X Y, *et al.* Health risk assessment on PAHs contaminated site - a case study in a relocated coke and chemical plant in Beijing[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, **18**: 666-678.
- [51] Li F M, Guo S H, Wu B, *et al.* Pilot-scale electro-bioremediation of heavily PAH-contaminated soil from an abandoned coking plant site[J]. *Chemosphere*, 2020, **244**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125467.
- [52] 王星星, 王海芳. 山西省某焦化厂土壤重金属污染状况分析与评价[J]. *应用化工*, 2020, **49**(4): 850-853.
- Wang X X, Wang H F. Analysis and evaluation of soil heavy metal pollution in a coking plant in Shanxi province[J]. *Applied Chemical Industry*, 2020, **49**(4): 850-853.
- [53] 卜凡迅, 王云平. 焦化厂土壤重金属污染影响因素研究进展[J]. *山西农业科学*, 2019, **47**(4): 695-700.
- Bu F X, Wang Y P. Research progress on influencing factors of heavy metal pollution in soil of coking plant [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, **47**(4): 695-700.
- [54] 刘子姣, 范智睿. 焦化厂周边土壤—玉米系统重金属污染风险评估[J]. *山西农业科学*, 2019, **47**(11): 1995-1998.
- Liu Z J, Fan Z R. Risk assessment of heavy metal pollution in the agricultural soil-maize system of the coking plant area[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, **47**(11): 1995-

- 1998.
- [55] 顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 等. 焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1081-1092.
- Gu G Q, Wan X M, Zeng W B, *et al.* Analysis of the spatial distribution of heavy metals in soil from a coking plant and its driving factors [J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1081-1092.
- [56] Cao S Z, Duan X L, Zhao X G, *et al.* Health risks from the exposure of children to As, Se, Pb and other heavy metals near the largest coking plant in China [J]. Science of the Total Environment, 2014, **472**: 1001-1009.
- [57] 陈润甲, 田艳梅, 张钧, 等. 山西省某焦化厂周边土壤中重金属污染评价及特征分析[J]. 天津农业科学, 2020, **26**(6): 79-84.
- Chen R J, Tian Y M, Zhang J, *et al.* Evaluation and characteristic analysis of heavy metal pollution in soil of a coking plant in Shanxi province [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2020, **26**(6): 79-84.
- [58] 高燕, 董苗, 张永清. 吕梁市某焦化厂及周边土壤重金属污染状况与评价[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2015, **35**(3): 318-324.
- Gao Y, Dong M, Zhang Y Q. Pollution status and assessment on soil heavy metals of a coking plant site and the surrounding farmland in Lvliang [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2015, **35**(3): 318-324.
- [59] 张荣海, 李海明, 张红兵, 等. 某焦化厂土壤重金属污染特征与风险评价[J]. 水文地质工程地质, 2015, **42**(5): 149-154.
- Zhang R H, Li H M, Zhang H B, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in soil of a coking plant [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, **42**(5): 149-154.
- [60] 陈月芳, 许锦荣, 段小丽, 等. 某焦化企业周边儿童重金属经口综合暴露健康风险[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(11): 4865-4874.
- Chen Y F, Xu J R, Duan X L, *et al.* Health risks of cumulative oral exposure to heavy metals for children living around a coking enterprise [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(11): 4865-4874.
- [61] Yang P G, Drohan P J, Yang M, *et al.* Spatial variability of heavy metal ecological risk in urban soils from Linfen, China [J]. CATENA, 2020, **190**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104554.
- [62] Maliszewska-Kordybach B. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination [J]. Applied Geochemistry, 1996, **11**(1-2): 121-127.
- [63] 钟名誉, 李慧颖, 贾晓洋, 等. 不同焦化厂土壤中多环芳烃污染特征比较研究[J]. 生态与农村环境学报, 2021, **37**(5): 627-635.
- Zhong M Y, Li H Y, Jia X Y, *et al.* A comparative study on the pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the soil of different coking plants [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, **37**(5): 627-635.
- [64] 张俊叶, 俞菲, 俞元春. 中国主要地区表层土壤多环芳烃含量及来源解析[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(6): 1059-1067.
- Zhang J Y, Yu F, Yu Y C. Content and Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil in major areas of China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(6): 1059-1067.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)