

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铎, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期
Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析	刘春景, 吕建毅, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳 (3375)
基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟	庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏 (3386)
基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨	王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰 (3396)
厦门港大气 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平 (3404)
南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征	张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇 (3416)
晋中盆地主要城市冬季 PM _{2.5} 传输特征分析	王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣 (3423)
鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析	孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳峰 (3439)
济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP	王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋 (3451)
长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析	罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧 (3463)
2019 年 7 月石家庄市 O ₃ 生成敏感性控制策略解析	朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇 (3473)
华北平原 AOD 时空演化与影响因素	郭霖, 孟飞, 马明亮 (3483)
基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系	郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康 (3494)
基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征	王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威 (3508)
近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析	陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏 (3523)
高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素	杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强 (3532)
三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性	纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽 (3543)
典型喀斯特城市湖泊溶解性有机质成分特征及来源解析	倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康 (3552)
骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估	黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕 (3562)
千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素	王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军 (3575)
泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征	张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮 (3587)
降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响	周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕 (3597)
典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价	储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏 (3608)
筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响	王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜 (3623)
天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识	刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德 (3635)
地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制	彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪 (3645)
北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析	门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵 (3656)
微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响	胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明 (3664)
不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响	任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟 (3672)
微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd ²⁺ 吸附机制	马文艳, 裴鹏刚, 高歌, 孙约兵 (3682)
不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素	连宁海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水 (3692)
Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能	印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨根, 何世颖, 薛利红 (3699)
一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析	李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送 (3708)
丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性	高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程阳阳, 彭永臻 (3718)
2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测	徐勇, 郑志威, 郭振东, 宴世卿, 黄雯婷 (3730)
近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估	陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明 (3741)
土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响	何宇, 盛茂根, 王轲, 王霖娇 (3752)
长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价	张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁 (3763)
煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性	尚誉, 桑楠 (3773)
燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价	李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚 (3781)
广州市南沙区第四系剖面镉富集特征及生物有效性	王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏 (3789)
黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准	徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀 (3799)
土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测	张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南 (3811)
添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响	鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利 (3825)
不同稻作系统土壤的 CH ₄ 产生潜力与产生途径	沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华 (3835)
东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程	马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮 (3844)
同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (3854)
岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较	肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛 (3865)
紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异响应	王智慧, 蒋先军 (3876)
有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响	肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全 (3884)
《环境科学》征订启事 (3403) 《环境科学》征稿简则 (3462) 信息 (3493, 3655, 3834)	

厦门港大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评估

肖思晗^{1,2}, 蔡美君^{1,2}, 李香^{1,2}, 黄屋³, 王坚³, 朱清墩⁴, 吴水平^{1,2*}

(1. 厦门大学环境与生态学院, 厦门 361102; 2. 福建省海陆界面生态环境重点实验室, 厦门 361102; 3. 厦门市环境科学研究院, 厦门 361021; 4. 厦门嵩屿集装箱码头有限公司, 厦门 361026)

摘要: 于2020年夏季和秋冬季在厦门港海天码头和嵩屿码头进行大气 PM_{2.5} 的采集, 并对20种元素污染特征、来源及健康影响进行了分析。结果表明, 厦门港大气 PM_{2.5} 浓度较低, 且两个站点的 PM_{2.5} 浓度并无显著性差异, 也不存在明显的昼夜差异。地壳元素中以 Ca 和 Si 的含量最高, 而痕量元素中以 Zn 和 Mn 的含量为最高。与标准值相比, 重金属元素中只有 Cr(VI) 出现超标。受风向和吞吐量季节性变化的影响, 部分元素浓度在夏季高于秋冬季。Cu、Zn、SO₂ 和 NO₂ 有较一致的明显昼夜变化, 但来自重油燃烧排放的 V 和 Ni 并无明显昼夜差异。PMF 源解析确定码头 PM_{2.5} 的4个污染因子为工业源、船舶排放、交通源和海盐+建筑尘混合源, 其中工业源对 PM_{2.5} 浓度的贡献率最大(55.2%~59.4%), 远高于船舶排放的贡献率(7.1%~7.7%)。健康风险评估显示, 厦门港大气 PM_{2.5} 中重金属对人群具有潜在的致癌风险($>1 \times 10^{-5}$), 其中 Cr(VI)、V 和 As 的累计贡献率为 97.3%~97.5%; 非致癌风险的危害指数 <1, 其中 V、Mn、Ni 和 As 的累计贡献率为 89.6%~91.2%。4种污染因子对重金属致癌风险的贡献率顺序为: 交通源(47.2%~49.4%) > 工业源(23.8%~24.2%) > 船舶排放(16.9%~20.8%) > 海盐+建筑尘(5.7%~12.1%), 而对非致癌风险的贡献率顺序为: 交通源(38.7%~42.3%) > 工业源(24.5%~28.2%) > 船舶排放(24.1%~27.2%) > 海盐+建筑尘(5.4%~9.6%)。

关键词: 厦门港; PM_{2.5}; 重金属; 来源分析; 健康风险评估

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3404-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110163

Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM_{2.5} in Xiamen Port

XIAO Si-han^{1,2}, CAI Mei-jun^{1,2}, LI Xiang^{1,2}, HUANG Zhi³, WANG Jian³, ZHU Qing-dun⁴, WU Shui-ping^{1,2*}

(1. College of Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory for Coastal Ecology and Environmental Studies, Xiamen 361102, China; 3. Xiamen Research Academy of Environmental Science, Xiamen 361021 China; 4. Xiamen Songyu Container Terminal Co., Ltd., Xiamen 361026, China)

Abstract: PM_{2.5} samples at Haitian and Songyu container terminals in Xiamen Port were collected in summer and autumn/winter in 2020 and analyzed for 20 elements to investigate their temporal-spatial distribution features, sources, and health risk. The results showed that the levels of PM_{2.5} were relatively low and did not show significant spatial and diurnal differences. Ca and Si were the main crustal elements, and Zn and Mn were the main heavy metals in PM_{2.5}. Compared with GB 3095-2012 guidelines, Cr(VI) was in the range of 27.4-28.6 times above the standard. Under the influence of monsoon and port throughput, the concentrations of some elements in summer were higher than those in autumn/winter. Significant diurnal variations were observed for Cu, Zn, SO₂, and NO₂ but not for V and Ni. Industrial sources were identified as the primary contributor (55.2%-59.4%), followed by traffic (28.7%-31.3%), ship emissions (7.1%-7.7%), and sea salt plus construction dust (4.8%-5.8%). The results of health risk assessment showed that heavy metals in PM_{2.5} in Xiamen Port had potential carcinogenic risk (ECR > 1 (10⁻⁵) to people living near the port, and Cr(VI), V, and As together accounted for 97.3%-97.5% of the total risks; however, the non-carcinogenic risk was negligible (HI < 1), and the major contributors were V, Mn, Ni, and As (89.6%-91.2%). The relative contributions of each contributor to ECR was in the order of traffic (47.2%-49.4%) > industrial (23.8%-24.2%) > ship emissions (16.9%-20.8%) > sea salt plus construction dust (5.7%-12.1%), and the relative contribution to HI was in the order of traffic (38.7%-42.3%) > industrial (24.5%-28.2%) > ship emissions (24.1%-27.2%) > sea salt plus construction dust (5.4%-9.6%).

Key words: Xiamen Port; PM_{2.5}; heavy metal; source apportionment; health risk assessment

大气 PM_{2.5} 由于粒径小, 比表面积大, 是重金属、多环芳烃和细菌等有毒有害物质的有效载体, 经呼吸暴露和其他途径进入人体后, 可造成人体机能障碍和不可逆损伤^[1-5]。2019年联合国环境规划署(UNEP)报道, 大气颗粒物污染导致全球每年700万人过早死亡^[6]。尽管重金属元素只占 PM_{2.5} 质量的很少部分, 但由于其具有毒性和致癌性, PM_{2.5} 中重金属元素的污染及对人群潜在的健康影响受到广泛关注。国际癌症机构(IARC)^[7]将 As、Cd 和 Cr(VI) 化合物列为“确认人类致癌物”, 将 Pb 和 Ni 化合物分别列为“很可能人类致癌物”和“可能人类

致癌物”。此外, Pb 还会影响神经系统发育、新生儿运动与认知能力, 导致胎儿畸形等^[8]。PM_{2.5} 中的一些过渡金属如 Fe、Zn 和 Cu 进入人体后, 可通过与抗氧化物作用而产生过量活性氧(ROS), 导致氧化应激和炎症反应^[9,10]。世界卫生组织(WHO)基于空气污染如何影响人类健康的新证据^[11], 将 PM_{2.5} 年

收稿日期: 2021-10-21; 修订日期: 2021-11-17

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2021J0111); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502901)

作者简介: 肖思晗(2001~), 女, 主要研究方向为大气污染与健康, E-mail: 33120192202056@stu.xmu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: wsp@xmu.edu.cn

均目标值由 $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下调到 $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 将 24 h 目标值由 $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下调至 $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 在机动车、钢铁、电厂等排放标准日趋严格的背景下, 空气质量改善的边际成本也会增大. 开展达标城市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属元素的污染特征、来源和健康影响研究, 可为进一步研究低成本的大气污染防治精细化管理措施提供科学支持.

近年来, 我国学者在大气细颗粒物重金属污染特征与人体健康风险方面开了大量的研究, 但大部分的研究集中于北京、上海、广州、深圳、郑州和成都等超大城市的中心城区^[12~17], 很少针对港口区域进行研究. 由于港口区域独特的地理位置, 港口船舶排放大气污染物是影响港口城市空气质量及人群健康的重要因素之一. 广州市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 V 和 Ni 元素浓度及船舶排放颗粒物短期暴露与心血管疾病死亡率之间的关联性研究表明, 船舶排放是广州市人群心血管疾病死亡的一个重要风险因子^[18]. 模式研究显示, 2002 年全球船舶排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 可导致 6.4 万例的心血管和肺癌死亡, 且集中分布在主要航线附近^[19]. Wen 等^[20] 的研究显示, 渔船和货轮排放的 Cr 对重金属非致癌和致癌风险的贡献均大于 75%. 厦门市 1995 年提出“以港立市”的发展战略, 正式将厦门港作为厦门城市发展的依托和资源优势, 过去 10 年货物和集装箱吞吐量都保持持续增长趋势. 2019 年, 厦门港集装箱吞吐量达 1 112.22 万标箱, 居全球第 14 名、全国第 7 名, 该港已成为我国“海上丝绸之路”的重要组成部分和海峡两岸交流的重要口岸. 在陆地污染源排放控制日益严格的背景下, 港口船舶排放的大气污染物对厦门空气质量的影响不可忽视. 前期厦门港船舶控制区大气污染物排放清单显示^[21], 船舶在靠港停泊状态下的污染物排放量最大. 尽管厦门港已陆续开始了岸电建设, 但由于船舶受电系统的缺乏或不匹配、岸电价格偏高以及岸电使用非强制等原因, 厦门港船舶大气污染问题在较长时间内仍将继续存在.

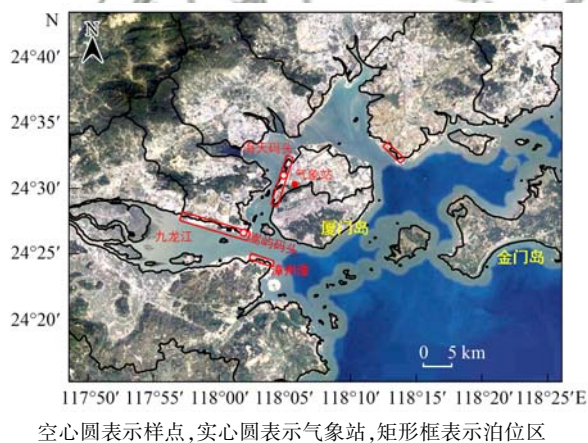
本研究选择在厦门港口两个码头采集大气 $\text{PM}_{2.5}$, 分析金属元素浓度的季节和昼夜变化特征, 并基于源解析结果, 对重金属元素健康风险的来源分担率进行评估, 以期为进一步研究船舶大气污染减排方案及绿色低碳港口评估提供参考.

1 材料与方法

1.1 样品采集

在厦门港选择海天码头 ($\text{E}118^{\circ}05'40.89''$, $\text{N}24^{\circ}31'16.25''$) 和嵩屿码头 ($\text{E}118^{\circ}02'38.76''$, $\text{N}24^{\circ}27'12.37''$) 分别设置 $\text{PM}_{2.5}$ 采样点, 两个站点直

线距离约 9 km, 离地高度约 18 m (图 1). 海天码头和嵩屿码头所在的泊位区, 均以集装箱运输为主, 码头大气 $\text{PM}_{2.5}$ 受船舶及集装箱卡车的尾气与交通扬尘的影响较大. 为考察不同主导风向条件下两个站点大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及负载元素的组成特征, 采样时间按照夏季 (西南季风期) 和秋冬季 (东北季风期) 分别进行. 夏季时段为 2020 年 7 月 1~18 日及 8 月 28 日~9 月 25 日, 秋冬季时段为 2020 年 11 月 3 日~12 月 30 日. $\text{PM}_{2.5}$ 采样仪器为自动换膜颗粒物采样器 (PMS-200A, 聚光科技股份有限公司), 颗粒收集于 PTFE 滤膜 (47 mm, Whatman Inc). 采样按照白天 (07:00~18:00) 和夜晚 (19:00~次日 06:00) 分开进行, 共采集 333 个样品 (海天码头 172 个, 嵩屿码头 161 个, 两个站点同步采集的样品 154 对). 根据滤膜采样前后质量差值与采样体积 (流量 $16.67 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 采时 11 h), 计算 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度. 厦门市环境监测站在两个站点分别设置了环境空气质量 6 参数 (PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 、CO 和 O_3) 自动在线监测系统, 可以对采样期间不同方法得到的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进行比较; 采样期间的气象资料来自厦门市狐尾山气象站, 可以对不同气象条件下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与组成差异进行分析.



空心圆表示样点, 实心圆表示气象站, 矩形框表示泊位区

图 1 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 采样位置示意

Fig. 1 Map of $\text{PM}_{2.5}$ sampling location

1.2 元素分析

将滤膜用陶瓷剪刀剪碎至特氟龙消解管中, 再加入 4 mL 65% HNO_3 和 2 mL 35% H_2O_2 , 加盖拧紧, 放入微波消解仪 (MILESTONE, ETHOS UP), 参照 Wu 等^[22] 的升温程序进行微波消解. 消解液用 $0.45 \mu\text{m}$ 孔径的一次性水相滤头过滤至干净的 PP 离心管中, 用超纯水稀释至 HNO_3 含量接近 2%, 等待上机测试. 使用电感耦合等离子体质谱仪 (NexION 2000 ICP-MS, PerkinElmer) 对样品中的元素 (Be、Na、Mg、Al、Si、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Se、Ag、Cd、Ba 和 Pb) 进行测定.

多元素标准溶液购置于国家有色金属及电子材料分析测试中心 (GNM-M193849-2013), 标准溶液上机测试的浓度范围在 $1 \sim 1\,000 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ 之间. 每批样品分析时, 同时设定 1 个流程空白, 以检测实验过程中可能存在的人为干扰; 采用空白加标方法, 测试元素分析回收率在 73% (As) $\sim$ 106% (Pb) 之间. 采用外标法定量, 最后结果经空白和回收率校正. 由于样品消解时没有添加 HF, 无法完全溶解与硅酸盐矿物相结合的元素, 尤其是元素 Si, 其测量值会偏低于实际值.

1.3 PMF 源解析模型

源解析模型采用 US EPA 推荐的受体模型 PMF 5.0^[23]. PMF 是一种多变量因子分析工具, 该模型是综合了数据中的误差估计来解决一个受限制加权最小二乘线性模型的矩阵分解法. 基本方程如下:

$$\mathbf{x}_{ij} = \sum_{k=1}^p \mathbf{g}_{ik} \mathbf{f}_{kj} + \mathbf{e}_{ij} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x}_{ij}$ 为第 i 个样品中污染物 j 的浓度; $\mathbf{g}_{ik}$ 为第 i 样品第 k 个因子的贡献率; $\mathbf{f}_{kj}$ 为第 k 个因子中污染物 j 的浓度; $\mathbf{e}_{ij}$ 为第 i 个样品污染物 j 的残差.

PMF 模型的输入数据除了样品中不同元素的浓度外, 还需要输入所测浓度值的不确定度. 依据 PMF 使用手册给出的估算方法, 当所测元素浓度等于或低于检出限时 (MDL), 不确定度 (Unc) 的计算公式为:

$$\text{Unc} = (5/6) \times \text{MDL} \quad (2)$$

当所测浓度大于 MDL 时, Unc 的计算公式为:

$$\text{Unc} = \sqrt{(\text{测量误差} \times \text{测量浓度})^2 + (0.5 \times \text{MDL})^2} \quad (3)$$

式中, 测量误差在 10% $\sim$ 20% 之间, 本文按 10% 测量误差来计算不确定度.

1.4 重金属呼吸暴露健康风险

大气颗粒物中重金属元素进入人体的暴露途径主要有呼吸摄入、皮肤接触和口腔摄入 (非饮食途径), 其中经呼吸途径的暴露风险最大^[24]. 因此, 本

文仅对呼吸途径的暴露风险进行评估. $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属经呼吸途径进入人体的日均暴露浓度 (EC, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 计算公式如下:

$$\text{EC}_i = \text{CA}_i \times (\text{ET} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{ASF}) / \text{AT} \quad (4)$$

式中, CA_i 为重金属元素 i 的浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); ET 为暴露时间 ($24 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$); EF 为暴露频率 ($350 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$); ED 为暴露年限 (儿童为 6 a, 成人为 24 a); ASF 为年龄敏感因子 (儿童为 3, 成人为 1); AT 为平均暴露时间 (致癌风险为 $70 \text{ a} \times 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1} \times 24 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$, 非致癌风险为 $\text{ED} \times 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1} \times 24 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$).

另外, 由于两个采样站点受季风的影响较大, 其中 6 $\sim$ 9 月受西南风影响较大, 其余时间受东北风影响较大. 因此本研究以加权平均浓度来计算暴露浓度:

$$\text{CA}_i = (c_1 \times 122 + c_2 \times 243) / 365 \quad (5)$$

式中, c_1 为西南季风期 (6 $\sim$ 9 月) 重金属元素 i 的浓度, c_2 为东北季风期 (10 月至次年 5 月) 重金属元素 i 的浓度.

表 1 汇总了 US EPA 按照可接受癌症风险水平 1×10^{-6} 和非致癌风险商 1.0 给出的部分重金属元素经呼吸暴露途径的呼吸参考浓度 (RfC, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)、吸入单位风险 [IUR, ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) $^{-1}$] 和致癌与非致癌浓度筛选值 (SL, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)^[25]. 根据某一重金属元素 i 的 IUR 与 RfC 值, 即可计算该重金属元素的致癌风险 (CR) 和非致癌危害商 (HQ):

$$\text{CR}_i = \text{IUR}_i \times \text{EC}_i \quad (6)$$

$$\text{HQ}_i = \text{EC}_i / (\text{RfC}_i \times 1\,000) \quad (7)$$

对于非致癌物, 所有污染元素 HQ 值的加和得到危害指数 (hazard index, HI): HQ 或 HI < 1 表示非致癌风险小或可以忽略, > 1 则认为很可能存在非致癌风险. 对于致癌物, 所有污染元素 CR 值的加和得到人群暴露的总超额致癌风险 (excess cancer risk, ECR): $\text{ECR} < 1 \times 10^{-6}$ 表示重金属产生的致癌风险可以忽略, $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 表示污染元素可能引起癌症, 致癌风险处于可接受范围, $> 1 \times 10^{-4}$ 则认为其引起癌症的风险性较高, 需要采取措施降低污染浓度.

表 1 大气环境中重金属元素经呼吸暴露途径的呼吸参考浓度、吸入单位风险、致癌和非致癌浓度筛选值

Table 1 Summary of RfC, IUR, and screening levels (SL) of selected heavy metals via inhalation exposure

元素	IUR/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) $^{-1}$	RfC/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	SL (致癌)/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	SL (非致癌)/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
Al	— ³⁾	5.0×10^{-3}	—	5.2×10^0
As (无机砷)	4.3×10^{-3}	1.5×10^{-5}	6.5×10^{-4}	1.6×10^{-2}
Ba	—	5.0×10^{-4}	—	5.2×10^{-1}
Cd (饮食暴露)	1.8×10^{-3}	1.0×10^{-5}	1.6×10^{-3}	1.0×10^{-2}
Cr(VI) ¹⁾	8.4×10^{-2}	1.0×10^{-4}	1.2×10^{-5}	1.0×10^{-1}
Pb (乙酸铅)	8.0×10^{-5}	—	3.5×10^{-2}	1.5×10^{-1}
Mn (非饮食暴露)	—	5.0×10^{-5}	—	5.2×10^{-2}
Ni (碱式硫化镍) ²⁾	4.8×10^{-4}	1.4×10^{-5}	5.8×10^{-3}	1.5×10^{-2}
V (五氧化二钒)	8.3×10^{-3}	7.0×10^{-6}	3.4×10^{-4}	—

1) Cr(VI) 按照测量值的 1/7 进行估算^[25]; 2) 碱式硫化镍按照测量值的 1/2 进行估算^[26]; 3) “—”表示无数据

2 结果与讨论

2.1 不同站点 PM_{2.5} 浓度比较

采样期间,海天码头和嵩屿码头大气 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值分别为 $(21.38 \pm 11.31) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(21.86 \pm 12.54) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,且两个站点 PM_{2.5}浓度的时间序列变化规律一致;采用成对样本 T 检验得知两个站点的 PM_{2.5} 浓度并无显著性差异($P = 0.922$, 双侧检验). 手工采样方法得到的 PM_{2.5} 浓度值与自动站获得的 PM_{2.5} 浓度值之间具有很好的可比性,在 $P = 0.001$ 显著水平下正相关(R 为 $0.697 \sim 0.745$). 与上海^[13]和广州^[14]等其他港口城市报道的 PM_{2.5} 浓度相比较,厦门港区 PM_{2.5} 浓度处于较低水平. 由于大气 PM_{2.5} 除来自局地污染排放贡献外,区域传输也存在一定的影响. 假定港口船舶对码头 PM_{2.5} 浓度有明显影响,则在不同主导风向条件下 PM_{2.5} 浓度应存在明显差异. 从均值看,海天码头和嵩屿码头夏季白天 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $(21.20 \pm 9.63) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(21.48 \pm 9.00) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,均高于夜间的 $(17.75 \pm 10.18) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(19.52 \pm 9.61) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,但秋冬季白天 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $(23.47 \pm 13.25) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(21.61 \pm 11.10) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,则略低于夜间的 $(24.92 \pm 15.41) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(22.56 \pm 14.21) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 为进一步检验均值差异是否显著,采用单因素方差分析方法(one-way ANOVA),对 PM_{2.5} 浓度的昼夜差异进行分析,发现在给定显著性水平 α 为 0.05 前提下,同一采样季节内两个站点 PM_{2.5} 的浓度均值都不存在显著的昼夜差异,仅在嵩屿码头发现夏季夜间 PM_{2.5} 浓度均值显著低于秋冬季白天和夜间 PM_{2.5} 的浓度均值(显著性为 0.04 和 0.01). 这些特征表明,厦门港 PM_{2.5} 浓度受船舶直接排放的影响并不大. 进一步分析发现,码头 PM_{2.5} 与气态前体物(SO₂ 和 NO₂)之间呈显著正相关(r 为 $0.317 \sim 0.444$, $P < 0.01$),与风速呈显著负相关(r 为 $-0.307 \sim -0.336$, $P < 0.01$),说明气态前体物可转化为二次硫酸盐和硝酸盐,进而影响 PM_{2.5} 的浓度. 很多研究显示,二次无机离子是大气 PM_{2.5} 的主要成分,占比贡献介于 40%~80% 之间^[27],且存在较明显的季节变化. 此外,较高风速也有利于大气污染物的扩散稀释,降低污染物浓度.

表 2 汇总了两个站点 PM_{2.5} 中所测元素的均值、标准偏差及中位值. 海天码头和嵩屿码头站点所测元素之和占相应 PM_{2.5} 浓度的质量分数分别为 $(16 \pm 15)\%$ 和 $(13 \pm 11)\%$,海天码头 PM_{2.5} 中元素质量分数更高的原因可能与地壳元素浓度显著偏高有

关. 除 K 元素外,地壳元素如 Na、Mg、Al、Si、Ca 和 Fe 的浓度表现为海天码头高于嵩屿码头,且地壳元素的含量顺序均表现为: $\text{Ca} > \text{Si} > \text{Na} > \text{Fe} > \text{K} > \text{Al} > \text{Mg}$. 痕量元素的含量大小表现为: $\text{Zn} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Ba} > \text{Ni} > \text{V} > \text{As} > \text{Se} > \text{Cd} > \text{Ag} > \text{Be}$,与厦门城区、常州工业区和南京城区站点^[28~30]的测试结果接近. 痕量元素的浓度普遍在 $10 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,比地壳元素的浓度值低 1~2 个数量级,但由于部分重金属元素如 Cd、Pb、As、V、Ni 和 Cr 等具有毒性与致癌性,且容易生物富集而造成不可逆的健康危害,其在大气环境质量管理中受到广泛关注^[7]. 利用成对样本 T 检验方法,发现海天码头 PM_{2.5} 中 V 和 Ag 的浓度均值显著小于嵩屿码头,而元素 Mn、As、Se、Cd 和 Ba 的浓度值在海天码头显著偏高,差异规律类似于地壳元素(表 2). 元素 Ni 和 Pb 在海天码头的均值也小于嵩屿码头,但差异不显著. 由于嵩屿码头处于厦门西港的南端,除受到集装箱货运船的烟囱排污影响外,还可能受九龙江入海口渔船及往返厦门和漳州港之间客运船只的影响,导致 V 和 Ni 浓度偏高. 相比而言,海天码头处于厦门城市中心区域,靠近繁忙的海沧跨海大桥,受机动车及周围其它污染源的影响更大. 从表 2 中的数据均值比较来看,海天码头地壳元素的浓度普遍高于嵩屿码头,显示其受城市扬尘的影响更为明显.

WHO 给出大气环境中 V、Pb、As、Cd、Mn 和 Ni 的指导值^[31]分别为: 1 000、500、6.6、5、150 和 $25 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. 我国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)对 Pb、Cd、As 和 Cr(VI)也给出了相应的参考浓度限值,分别为 500、5、6 和 $0.025 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. 与以上标准值相比,US EPA^[25]基于可接受癌症风险水平 1×10^{-6} 给出的有毒金属元素 As、Cd、Cr(VI)、Pb、Ni 和 V 的浓度筛选值则低得多(表 1). 按照 Cr(VI)占所测 Cr 浓度的 1/7 计算^[20],海天码头和嵩屿码头 PM_{2.5} 中 Cr(VI)的均值分别为 $0.74 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.71 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,均超过了 GB 3095-2012 中给出的参考浓度限值($0.025 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$)和 US EPA 给出的致癌性浓度筛选值($0.012 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$)^[25],表明 Cr(VI)的污染较为严重;另外,港口码头 PM_{2.5} 中 As 和 V 的浓度值也高于 US EPA 给出的致癌性浓度筛选值($0.65 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.34 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$)^[25],但低于 WHO 和 GB 3095-2012 给出的指导值. 与成都、北京、上海和广州等城市 PM_{2.5} 中重金属元素浓度相比^[14,15,32,33],厦门港 PM_{2.5} 中重金属元素中的 V、Pb、As、Cd、Mn 和 Ni 的浓度都明显偏低. 鹿特丹港口的长期监测显示,随着船舶燃油含硫量的降低,大

气颗粒物中 V 的浓度明显下降^[34],表明船舶采用低硫燃油也能减少重金属元素的排放. 为有效实施国际海事组织(IMO)全球限硫令,交通运输部海事局规定自 2020 年 1 月 1 日起,国际航行船舶进入我国管辖水域应当使用硫含量(质量分数)不超过

0.50% 的燃油. 此外,厦门港主要泊位区已建立岸电系统,截至 2020 年 6 月,厦门港岸电设施覆盖率已达 50%^[35]. 这些措施的实施,都会减少船舶重金属的排放,降低港口码头大气 PM_{2.5} 中 V 和 Ni 等重金属元素的浓度.

表 2 PM_{2.5} 中元素浓度及站点差异成对样本 T 检验¹⁾

Table 2 The T test of paired samples for element concentration in PM _{2.5} and differences between stations				
元素	海天码头/ng·m ⁻³	嵩屿码头/ng·m ⁻³	<i>t_s</i>	显著水平
Be	0.04 ± 0.03 (0.03)	0.04 ± 0.05 (0.02)	-1.500	0.136
Na	355.8 ± 303.5 (269.0)	350.8 ± 265.9 (273.1)	2.720	0.007
Mg	111.1 ± 107.1 (69.2)	106.4 ± 96.8 (71.3)	2.824	0.005
Al	189.9 ± 171.6 (166.6)	164.7 ± 131.8 (148.8)	2.422	0.017
Si	449.4 ± 378.7 (351.5)	355.8 ± 237.6 (316.5)	3.014	0.003
K	191.9 ± 131.9 (154.4)	189.8 ± 134.3 (147.0)	1.091	0.277
Ca	849.2 ± 697.4 (700.9)	651.6 ± 642.4 (493.1)	3.780	0.000
V	1.88 ± 2.16 (0.92)	2.78 ± 4.33 (1.49)	-2.932	0.004
Cr	5.20 ± 4.09 (4.75)	4.95 ± 3.31 (3.98)	1.102	0.272
Mn	16.33 ± 11.65 (14.22)	12.72 ± 8.35 (11.24)	5.562	0.000
Fe	298.6 ± 194.6 (265.6)	261.8 ± 207.4 (208.2)	2.529	0.012
Ni	3.16 ± 3.44 (1.97)	4.00 ± 3.99 (2.81)	-1.792	0.075
Cu	7.47 ± 6.62 (5.99)	7.13 ± 7.00 (4.66)	1.542	0.125
Zn	53.87 ± 37.26 (43.82)	52.93 ± 39.61 (46.94)	1.164	0.246
As	2.42 ± 1.81 (1.95)	2.18 ± 1.60 (1.71)	3.120	0.002
Se	1.80 ± 1.21 (1.54)	1.67 ± 1.11 (1.34)	2.240	0.027
Ag	0.08 ± 0.05 (0.07)	0.10 ± 0.09 (0.07)	-2.434	0.016
Cd	0.39 ± 0.32 (0.29)	0.35 ± 0.28 (0.27)	2.324	0.021
Ba	5.16 ± 3.06 (4.55)	4.61 ± 2.74 (4.08)	3.493	0.001
Pb	10.31 ± 8.82 (7.19)	11.37 ± 9.90 (8.87)	-0.479	0.632

1) 数值表示为均值 ± 标准偏差 (中位值); T 检验统计量, $t_s = \overline{D}\sqrt{n}/SD$, 式中: $\overline{D}$ 、 n 和 SD 分别为海天码头与嵩屿码头测量值差值的算术均值、样本数和标准偏差; 黑体字表示两个站点之间存在差异显著 [$|t_s| > t_{0.05(154对)}$]

一般而言,夏季由于大气的稳定度低于冬季,且降雨较多,有利于空气污染物的扩散迁移与沉降,PM_{2.5} 中的重金属浓度也低于冬季. 采用同样的单因素方差分析方法,对 PM_{2.5} 中重金属元素在夏季和秋冬季的差异进行分析,发现在显著性水平 α 为 0.05 的前提下,元素 V、Ni、Cu、Zn、Ba 和 Pb 在夏季的浓度均值显著高于秋冬季(图 2),两者均值的比值

介于 1.15 ~ 3.45 之间. 厦门处于典型的东亚季风区,夏季采样期间以西南风为主导风,来自港口及海上船舶排放的污染物对采样点的相对影响更大,使得 V 和 Ni 的浓度偏高于秋冬季; 另外,据厦门港口管理局资料显示,夏季采样期间港口集装箱吞吐量也较高,货运卡车的活动水平也增大,来自车辆尾气及磨损过程(轮胎、刹车片)产生的 Cu、Zn、Ba 和

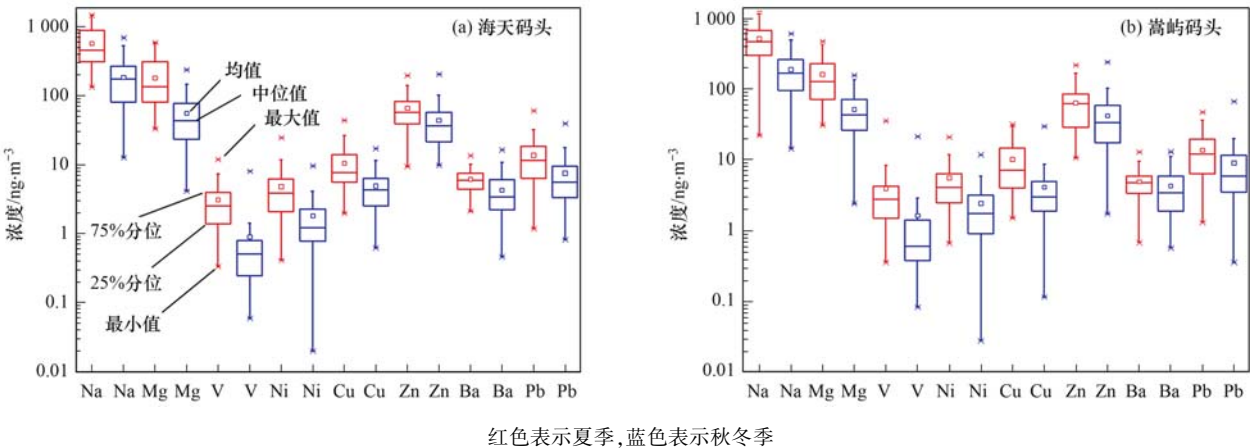


图 2 大气 PM_{2.5} 中部分元素夏季和秋冬季浓度比较

Fig. 2 Comparison of some elements in PM_{2.5} between summer and autumn-winter

Pb 相应增加, 导致其浓度高于秋冬季^[36,37]. 不同城市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属季节分布规律的不同, 可能受采样点与主要排放源相对空间位置的影响. 张洛红等^[18]和徐少才等^[38]对珠海和青岛的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属的污染监测发现, Zn、Cu、Pb 和 Ni 等在夏季的浓度达到甚至超过了冬季, 但上海、成都和保定等城市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属呈秋冬季显著高于夏季的特征^[13,32,39].

采用单因素方差分析方法, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属元素浓度的昼夜差异进行分析, 在显著性水平 α 为 0.05 的前提下, 发现海天码头夏季白天 Cu 和 Zn 的浓度均值显著高于夜间 (显著性 0.025 和 0.017), 以及秋冬季白天 Mn、Fe 和 Zn 的浓度均值显著高于夜间 (显著性 0.002、0.005 和 0.001); 嵩屿码头 $\text{PM}_{2.5}$ 中只有 Zn 的浓度均值在夏季白天显著高于夜间 (显著性 0.043), 而在秋冬季的昼夜差异不显著 (显著性 0.071). 在城市和交通区, 汽车轮胎和刹车片磨损是大气颗粒物中 Zn 和 Cu 的重要来源之一^[40]. Zn 的来源较为广泛, 既可能来源于电镀、冶金等工业排放, 也可能来源于机动车尾气与轮胎磨损. 常州市 $\text{PM}_{2.5}$ 中 Cu 和 Zn 的浓度昼低夜高, 而 Al 和 Fe 为昼高夜低, 显示机动车与扬尘源不同的活动水平^[41]. 港口作业白天更加繁忙, 货运卡车在港区内来回穿梭可能是 Zn 和 Cu 白天高于夜间的重要原因之一. 对码头自动站获取的 SO_2 和 NO_2 浓度的昼夜差异进行分析, 得到海天码头夏季 SO_2 浓度白天高于夜间 (显著性 0.023), 而 NO_2 浓度白天小于夜间 (显著性 0.032), 但秋冬季采样时段两者皆无明显昼夜差异; 嵩屿码头只有秋冬季 SO_2 浓度白天显著高于夜间 (显著性 0.038), 而 NO_2 的昼夜差异都不明显. 白天船舶和机动车燃油使用量大, 排放了更多的 SO_2 气体, 但 NO_2 由于光化学作用的消耗, 使其浓度下降而低于夜间.

尽管如此, 来自重油燃烧排放的 V 和 Ni, 其浓度并没有表现出明显的昼夜差异, 说明码头站点大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 V 和 Ni 不仅仅受局地船舶排放影响, 还可能受到港区之外的海上船舶的影响. 为此, 收集采样期间的风向风速数据, 绘制 $\text{PM}_{2.5}$ 中 V 和 Ni 浓度的极坐标图 (图 3), 来判断海上船舶排放对 V 和 Ni 的影响. 从图 3 可以看出, 无论是海天码头还是嵩屿码头, 两种元素都在偏西南-南风时出现高浓度, 而在东北偏北-东北偏东风时浓度较低, 夏季采样时段 V 和 Ni 浓度明显升高 (图 2); 同一采样季节内, 白天测得的 V 和 Ni 浓度偏高, 且高值更倾向于出现在偏西风时段, 与上风向海上船舶烟羽的扩散一致 (图 1). 此外, 采样点西侧是厦门工业集中区, 排放

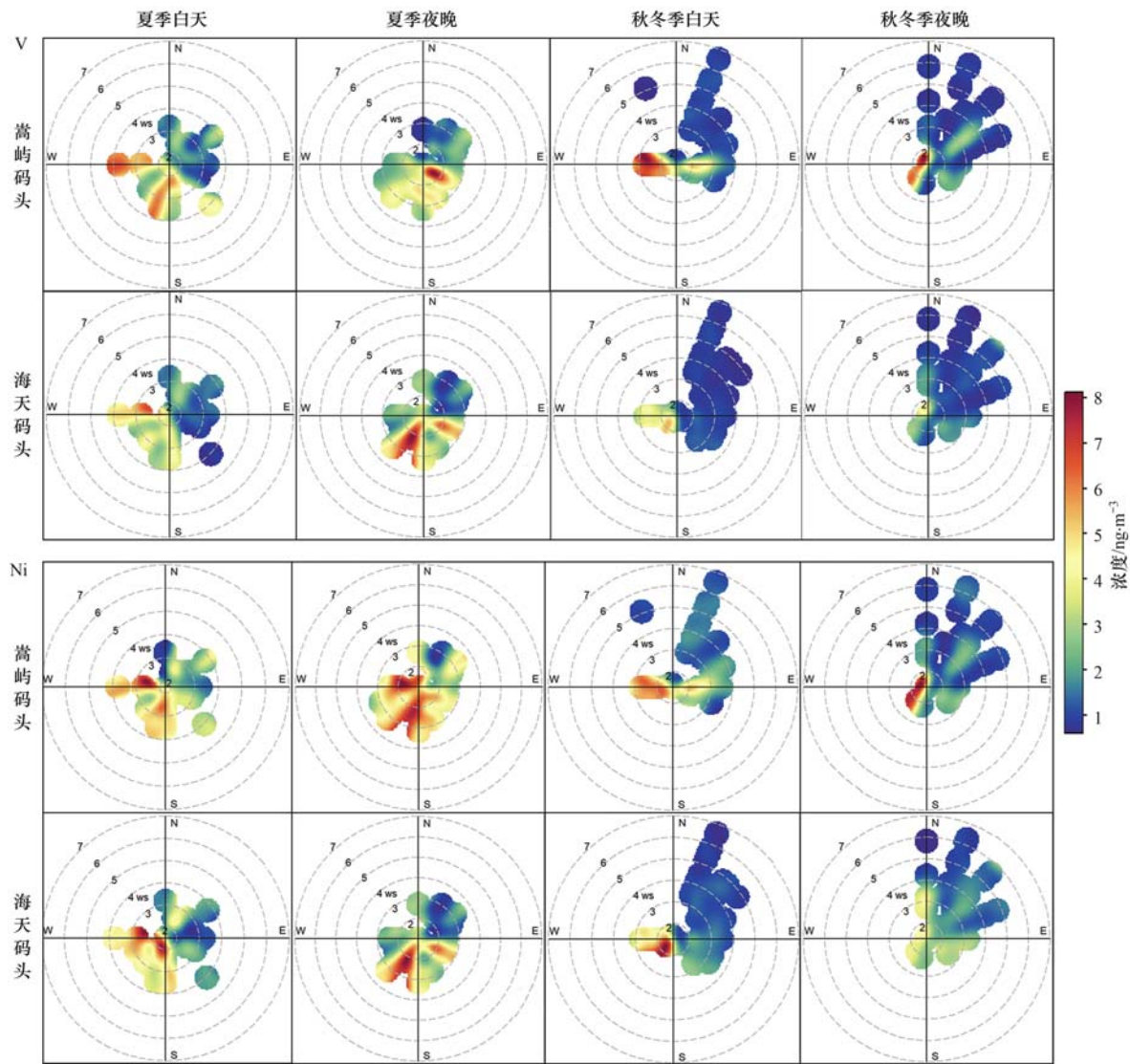
的污染物也可能对采样点产生影响. 考察风速对 V 和 Ni 浓度的影响, 在风速超过 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 空气污染物的扩散能力增强, V 和 Ni 浓度较低; 而在风速低于 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 大气稀释扩散能力下降, V 和 Ni 浓度出现上升.

2.2 重金属来源分析

为进一步了解大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中不同元素之间的关联性及可能的污染来源, 对 20 种元素进行相关性及层次聚类分析 (图 4). 根据元素的聚类结果, 可将元素可分为 3 种类型: 第一类为 Ca、Al、Mg、Na 和 Si, 彼此之间的相关性较为显著, 如 Na 和 Mg 的相关系数为 0.95 和 0.92, Si 和 Al 的相关系数为 0.65 和 0.48, 显示海盐及地壳源特征. 第二类为 Pb、Cd、As、Zn、Se、K、Ba、Mn、Fe、Ag 和 Cr, 把这类元素归为人为污染来源, 如机动车、工业、燃煤等. 它们主要是人为活动造成的污染, 有研究表明, As 和 Pb 是煤炭燃烧的标志物, Cu 和 Zn 是机动车刹车片和轮胎磨损释放的标志物, Pb 是机动车尾气的标志物, 元素 As、Se、Cd、Ag、Be 和 Mn 多来自化石燃料燃烧与工业冶金^[42]. 从图 4 可知, Fe 和 Mn 的相关系数为 0.78 和 0.79, As 和 Se 的相关系数为 0.85 和 0.84, 都显示强相关特征. 第三类为 Ni、V 和 Cu, 彼此之间呈显著相关, 可能具有相同或相似来源. V 和 Ni 一般认为是船舶重油燃烧排放的指示元素, 两者之间呈显著相关 (相关系数分别为 0.70 和 0.57), 但与其与 Ca、Al 和 Si 之间的相关性弱于与 Na 和 Mg 之间的相关性, 显示 V、Ni、Na 和 Mg 有一定的来源共性; 此外, Ni 与 Cr、Mn 和 Fe 之间的相关性强于 V 与这 3 种元素之间的相关性, 表明 Ni 还存在船舶重油燃烧之外的污染来源. 两站点间的元素聚类也存在差异, 其主要是两站地周围环境的差异性所导致的, 如 Ag 和 Pb 的相关性在海天码头比嵩屿码头更大 (相关系数分别为 0.60 和 0.35), 主要原因是 Ag 和 Pb 元素都有工业排放的贡献^[42], 而海天码头周围有大面积的工业区, 导致 Ag 和 Pb 元素在两地的相关性出现差异.

在相关聚类分析基础上, 利用 PMF 受体模型对大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中元素来源进行分析. PMF 模型运行时提取 4~8 个因子, 发现 $Q_{\text{Robust}}/Q_{\text{exp}}$ 随因子数增大降幅较小; 当选择 4 个因子时, 显示船舶源的因子映射相对其他拟合结果更高. 因此, 最终确定解析的 4 个因子为工业源、船舶排放、交通源和海盐 + 建筑尘混合源 (图 5).

因子 1 中元素 As、Se、Ag、Cd 和 K 的贡献较高, 显示工业排放特征, 该因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献最大, 在 55.2%~59.4% 之间. 因子 2 中 V 和 Ni 的



等值线表示风速,单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
图3 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中V和Ni的风向浓度极坐标

Fig. 3 Polar contour for V and Ni concentrations in $\text{PM}_{2.5}$ at the sampling sites

贡献显著高于其他元素,且两者之间的相关性显著,显示为船舶重油燃烧排放来源,其贡献在7.1%~7.7%之间,与2017年厦门岛南部海边站点解析的贡献率接近(7.6%)^[28],但高于上海洋山港的解析贡献值(2.4%)^[43].因子3中Cu、Zn和Pb的贡献都较为显著,显示机动车尾气、刹车片和轮胎磨损的排放特征^[36,37];此外,其他元素如Fe、Mn、Cr和Al也有较高贡献,显示道路扬尘和土壤尘的影响.海天码头该因子的贡献率(31.3%)略高于嵩屿码头(28.7%),与表2中元素浓度的站点差异一致.因子4中Na、Mg、Al和Ca的贡献明显,可归为海盐与建筑尘的混合来源^[44].当风速增大时,建筑尘与海洋飞沫的排放扩散都会增强,从而导致两者在解析时难以分开.由于海盐和建筑尘都以粗粒子为主, $\text{PM}_{2.5}$ 中该因子的贡献较低,介于4.8%~

5.8%之间.

2.3 健康风险评估

基于US EPA的健康风险评估模型,估算码头区域成人和儿童经呼吸暴露途径的重金属致癌风险和非致癌风险(图6).海天码头区域成人和儿童的ECR值为 2.8×10^{-5} 和 2.1×10^{-5} ,嵩屿码头区域成人和儿童的ECR值为 2.9×10^{-5} 和 2.2×10^{-5} ,均大于 1×10^{-5} ,表明厦门港区域大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属对人群具有潜在的致癌风险.从不同重金属元素的致癌风险贡献看,Cr(VI)的贡献最高(64%~70%),其次为V(16%~23%)和As(11%~12%).重金属元素的HI值在海天码头(成人0.87,儿童0.91)和嵩屿码头(成人0.91,儿童0.95)均小于1,表明港口区域大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属元素的非致癌风险可忽略.与2017年厦门岛南部站点大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中

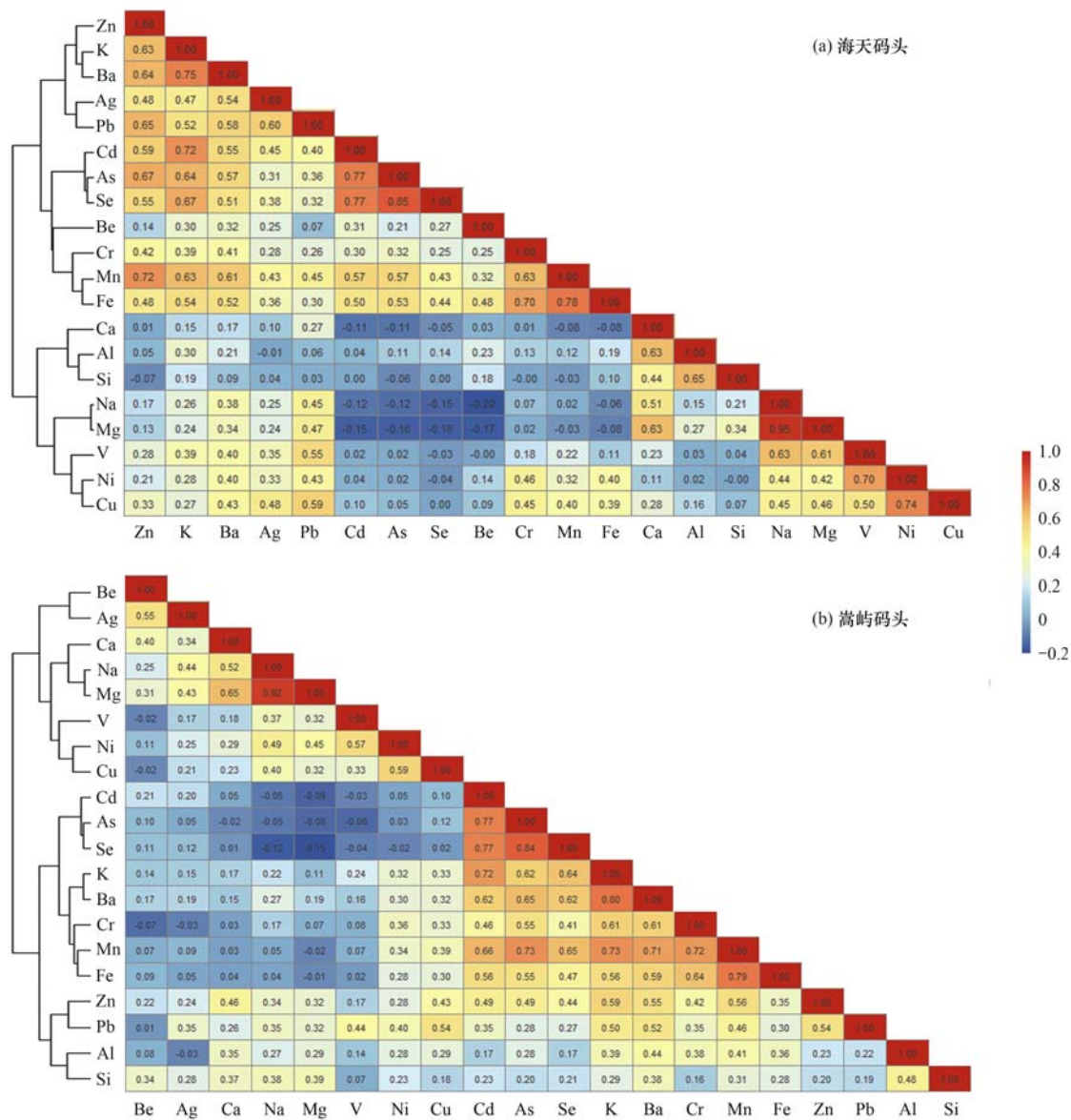


图4 海天码头和嵩屿码头大气 PM_{2.5} 中元素的相关性及聚类

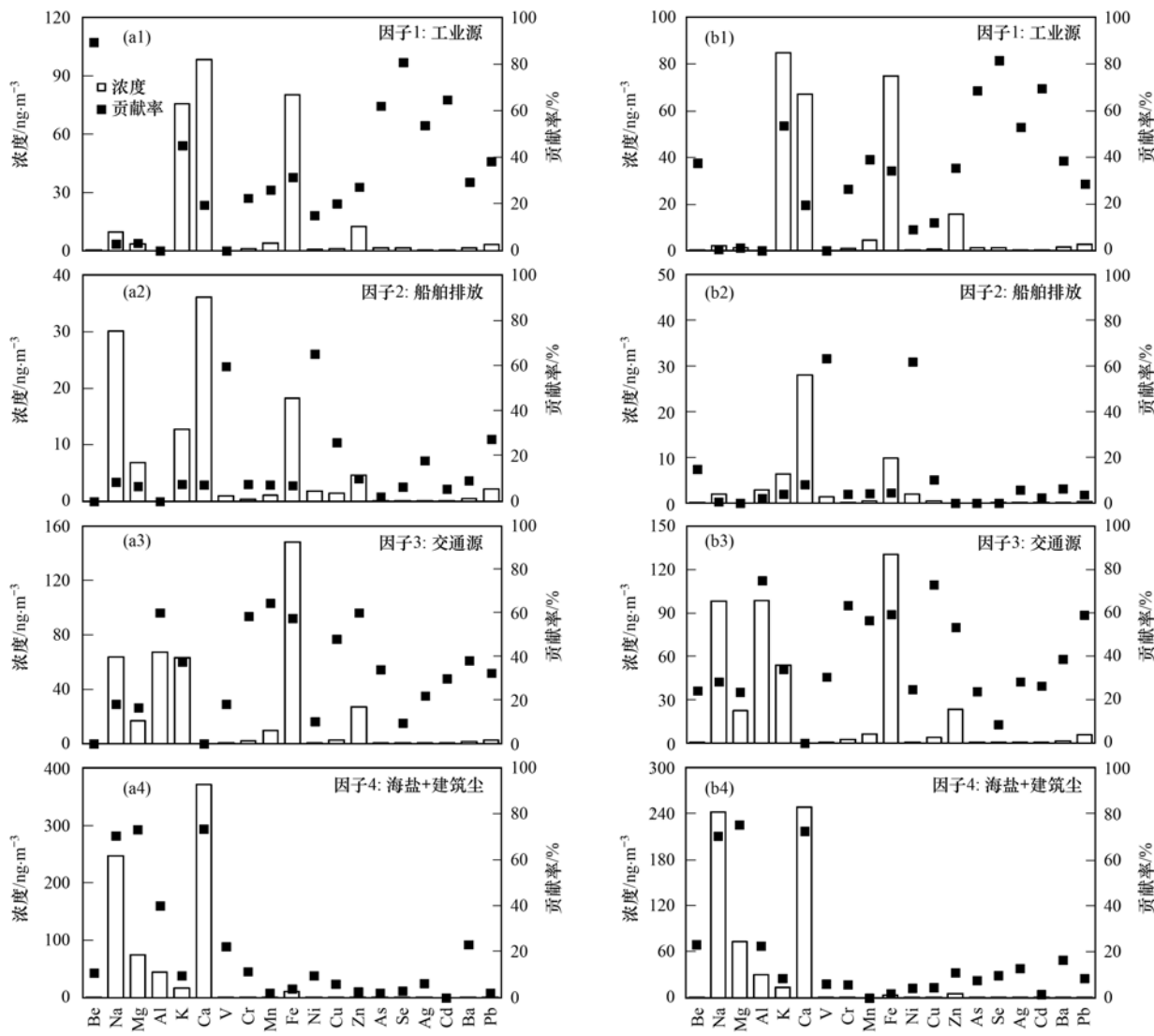
Fig. 4 Pearson correlation matrix coupled with hierarchical clustering results for elements in PM_{2.5} at Haitian and Songyu cargo terminals

重金属元素的健康风险相比^[26], 码头区域 PM_{2.5} 中元素 V 的致癌风险有显著降低, 可能与船舶低硫燃油强制推行有关. 与其他地区相比, 厦门港区域大气 PM_{2.5} 中重金属的人群健康风险低于太原和南京等城市^[45,46], 与广州和深圳的风险相当^[47]. 而本研究中 Pb、Cr 和 Ni 的致癌风险比广州和深圳的高, 这可能与本研究采样点位于码头, 受港口船舶和码头大型货车的影响较大所致.

为进一步减少人群呼吸暴露的健康风险, 需要对 PM_{2.5} 污染来源的风险贡献进行评估. 基于 PMF 的源解析得到的 4 种污染来源, 采用类似方法对其致癌风险和非致癌风险进行计算 (图 7).

致癌风险来源分担率以交通源为最大 (47.2%~49.4%), 其次为工业源 (23.8%~24.2%) 和船舶排放 (16.9%~20.8%), 海盐 + 建筑尘的贡献最小

(5.7%~12.1%). 对于非致癌风险, 交通源的分担率略有降低 (38.7%~42.3%), 但工业源 (24.5%~28.2%) 和船舶源 (24.1%~27.2%) 的贡献有所增加. 值得注意的是, PMF 解析船舶排放对 PM_{2.5} 的质量贡献 (7.1%~7.7%) 远小于其对致癌风险和非致癌风险的贡献. 在陆地固定源得到有效控制的前提下, 需进一步加强机动车和船舶排放控制, 以提升港口城市空气质量和降低人群暴露的不利健康风险. 中国香港地区的研究也显示, 在港口船舶转用低硫油后, 大气环境中 V、Ni 元素浓度也有明显下降, 且与心血管和肺癌死亡率的下降趋势一致^[44]. 此外, 靠港船舶使用岸电, 也能减少重金属及其他污染物的排放. 据统计, 2019 年深圳港使用岸电为 1 800 万 kW·h, 占全国岸电使用的 53%, 但其岸电使用率也只有 7%, 全国岸电使用情况则更低^[48], 仍有较大提



(a) 海天码头; (b) 嵩屿码头
图 5 PMF 解析来源因子贡献及元素谱分布

Fig. 5 PMF-resolved elemental source profiles and mean contributions

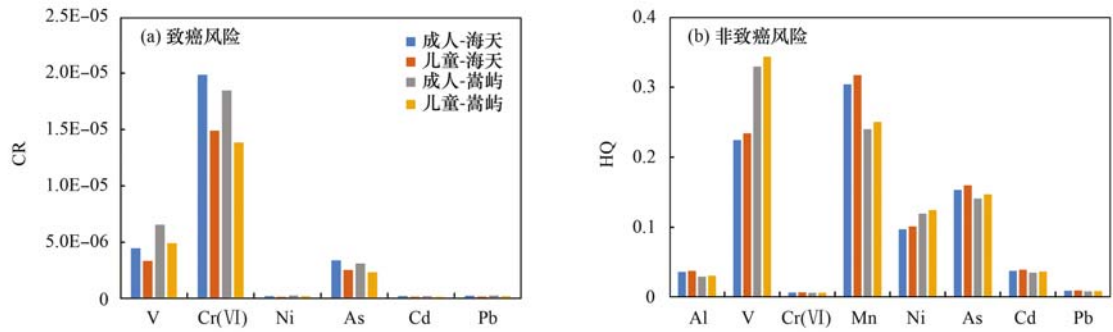


图 6 $PM_{2.5}$ 中重金属元素的致癌风险与非致癌风险

Fig. 6 Cancer risk and non-cancer risk of toxic heavy metals in $PM_{2.5}$

升空间. 相比于燃油/燃气车, 电动车没有了排气管的污染排放, 但电动车由于电池增加了车重, 使得轮胎及刹车片的磨损出现增加, 一定程度上也可能增加重金属的排放. 根据文献[49], 2020 年全球电动汽车耗电量超过 80 TW·h, 电动汽车的电力需求仅占目前全球最终总用电量的 1% 左右, 表明电动汽

车推广在港口城市空气污染治理方面仍有很大潜力.

3 结论

(1) 厦门港不同站点 $PM_{2.5}$ 浓度较低且无显著差异, 但大部分元素的浓度存在显著差异. 受船舶吞

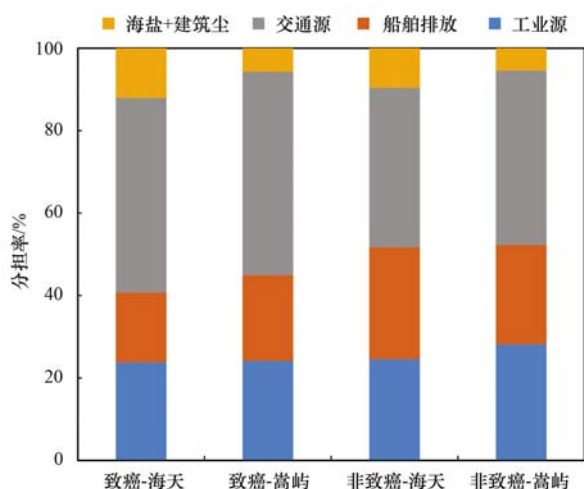


图7 基于PMF源解析的大气PM_{2.5}中重金属元素的
致癌与非致癌风险来源分担

Fig. 7 Percentage sharing in cancer risk and non-cancer risk from toxic metals in PM_{2.5} for different emission sources resolved by PMF

吐量、季风和采样位置的影响, V、Ni、Cu、Zn、Ba 和 Pb 的夏季浓度高于秋冬季. 受白天船舶和交通活动水平增强的影响, Cu 和 Zn 的昼夜差异显著, 但 V 和 Ni 无明显昼夜差异, 说明码头站点大气 PM_{2.5} 中 V 和 Ni 可能还受到港区之外的海上船舶的影响.

(2) 两个码头 PM_{2.5} 源解析结果无明显差异, 都呈现工业源 > 交通源 > 船舶源 > 海盐 + 建筑尘的特征. PM_{2.5} 中重金属对周围人群具有潜在的致癌风险 ($ECR > 10^{-5}$), 其来源贡献率为交通源 > 工业源 > 船舶源 > 海盐 + 建筑尘, 其中船舶源和交通源对健康风险的贡献远大于其对 PM_{2.5} 质量浓度的贡献率. 从降低人群暴露风险的角度考虑, 应加强交通源和船舶源的污染排放控制.

参考文献:

- [1] 李晓宝, 廖祖文, 赵红, 等. 高速公路沿线 PM_{2.5} 中重金属污染特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 3916-3923.
Li X B, Liao Z W, Zhao H, et al. Pollution characteristics of heavy metals in PM_{2.5} near highway[J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 3916-3923.
- [2] Zhao X G, Li Z L, Wang D L, et al. Assessment of residents' total environmental exposure to heavy metals in China [J]. Scientific Reports, 2019, **9**(1), doi: 10.1038/s41598-019-52649-w.
- [3] Xu X, Nie S, Ding H Y, et al. Environmental pollution and kidney diseases[J]. Nature Reviews Nephrology, 2018, **14**(5): 313-324.
- [4] Møller P, Danielsen P H, Karotki D G, et al. Oxidative stress and inflammation generated DNA damage by exposure to air pollution particles[J]. Mutation Research/Reviews in Mutation Research, 2014, **762**: 133-166.
- [5] Agay-Shay K, Friger M, Linn S, et al. Air pollution and congenital heart defects [J]. Environmental Research, 2013, **124**: 28-34.

- [6] 王鑫, 肖舜, 董治宝, 等. 西安重度以上污染天气 PM_{2.5} 重金属污染特征与健康风险[J]. 中国沙漠, 2020, **40**(5): 10-19.
Wang X, Xiao S, Dong Z B, et al. Pollution characteristics and health risk of heavy metals in PM_{2.5} in severely polluted weather in Xi'an, China[J]. Journal of Desert Research, 2020, **40**(5): 10-19.
- [7] IARC. Outdoor air pollution: IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans volume 109 [M]. Lyon: International Agency for Research on Cancer, 2016.
- [8] Li M N, Zhang L L. Haze in China: current and future challenges[J]. Environmental Pollution, 2014, **189**: 85-86.
- [9] Ghio A J. Metals associated with both the water-soluble and insoluble fractions of an ambient air pollution particle catalyze an oxidative stress[J]. Inhalation Toxicology, 1999, **11**(1): 37-49.
- [10] Godri K J, Harrison R M, Evans T, et al. Increased oxidative burden associated with traffic component of ambient particulate matter at roadside and urban background schools sites in London [J]. PLoS One, 2011, **6**(7), doi: 10.1371/journal.pone.0021961.
- [11] WHO. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide[R]. Geneva: WHO, 2021.
- [12] 刘建伟, 晁思宏, 陈艳姣, 等. 北京市不同年龄人群 PM_{2.5} 载体重金属的健康风险[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(4): 1540-1549.
Liu J W, Chao S H, Chen Y J, et al. Health risk of PM_{2.5}-bound heavy metals for different age population in Beijing, China [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(4): 1540-1549.
- [13] 胡子梅, 王军, 陶征楷, 等. 上海市 PM_{2.5} 重金属污染水平与健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(12): 3399-3406.
Hu Z M, Wang J, Tao Z K, et al. Pollution level and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5}, Shanghai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(12): 3399-3406.
- [14] 符小晴, 彭晓武, 王钰钰, 等. 广州市大气 PM_{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2018, **35**(2): 154-158.
Fu X Q, Peng X W, Wang Y Y, et al. Characteristic of elements in PM_{2.5} and health risk assessment of heavy metals in Guangzhou [J]. Journal of Environment and Health, 2018, **35**(2): 154-158.
- [15] 杜金花, 张宜升, 何凌燕, 等. 深圳某地区大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征及健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2012, **29**(9): 838-840.
- [16] 何瑞东, 张铁舜, 陈永阳, 等. 郑州市某生活区大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 4774-4782.
He R D, Zhang Y S, Chen Y Y, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological and health risk assessment of atmospheric PM_{2.5} in a living area of Zhengzhou city [J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 4774-4782.
- [17] 李友平, 刘慧芳, 周洪, 等. 成都市 PM_{2.5} 中有毒重金属污染特征及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(7): 2225-2232.
Li Y P, Liu H F, Zhou H, et al. Contamination characteristics and health risk assessment of toxic heavy metals in PM_{2.5} in Chengdu [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(7): 2225-2232.
- [18] Lin H L, Tao J, Qian Z M, et al. Shipping pollution emission

- associated with increased cardiovascular mortality: a time series study in Guangzhou, China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **241**: 862-868.
- [19] Corbett J J, Winebrake J J, Green E H, *et al.* Mortality from ship emissions: a global assessment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(24): 8512-8518.
- [20] Wen J, Wang X J, Zhang Y J, *et al.* PM_{2.5} source profiles and relative heavy metal risk of ship emissions: source samples from diverse ships, engines, and navigation processes [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **191**: 55-63.
- [21] 王坚, 黄屋, 刘艳英, 等. 厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3572-3580.
- Wang J, Huang Z, Liu Y Y, *et al.* Vessels' air pollutant emissions inventory and emissions characteristics in the Xiamen Emission Control Area[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3572-3580.
- [22] Wu S P, Li X, Cai M J, *et al.* Size distributions and health risks of particle-bound toxic elements in the southeast coastland of China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(32): 44565-44579.
- [23] Norris G, Duvall R, Brown S, *et al.* EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [R]. Washington: U. S. Environmental Protection Agency, 2014.
- [24] 张洛红, 范芳, 蒋炜炜, 等. 珠三角地区大气 PM_{2.5} 中重金属污染水平及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(1): 370-380.
- Zhang L H, Fan F, Jiang W W, *et al.* Concentrations and health risk assessment of heavy metals in atmospheric PM_{2.5} in the Pearl River Delta Region[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(1): 370-380.
- [25] US EPA. Regional Screening Level (RSL) resident ambient air table (TR=1E-06, HQ=1)[EB/OL]. <https://semspub.epa.gov/work/HQ/401647.pdf>, 2021-10-15.
- [26] U. S. Environmental Protection Agency. Methods to develop inhalation cancer risk estimates for chromium and nickel compounds[EB/OL]. https://www3.epa.gov/ttn/atw/utility/ni_cr_methods_final_report_cover.pdf, 2021-10-15.
- [27] 姚诗音, 韩力慧, 郭改仲, 等. 武安市 PM_{2.5} 及其二次水溶性无机离子污染特征和区域来源解析[J]. *北京工业大学学报*, 2021, **47**(6): 644-654.
- Yao S Y, Han L H, Guo G Z, *et al.* Contaminated character and regional source of PM_{2.5} and secondary water-soluble inorganic ions in Wu'an City [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2021, **47**(6): 644-654.
- [28] Wu S P, Cai M J, Xu C, *et al.* Chemical nature of PM_{2.5} and PM₁₀ in the coastal urban Xiamen, China: insights into the impacts of shipping emissions and health risk[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **227**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117383.
- [29] Bi C L, Chen Y T, Zhao Z Z, *et al.* Characteristics, sources and health risks of toxic species (PCDD/Fs, PAHs and heavy metals) in PM_{2.5} during fall and winter in an industrial area[J]. *Chemosphere*, 2020, **238**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124620.
- [30] Qi L, Zhang Y F, Ma Y H, *et al.* Source identification of trace elements in the atmosphere during the second Asian Youth Games in Nanjing, China: influence of control measures on air quality [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2016, **7**(3): 547-556.
- [31] WHO. Air quality guidelines for Europe (2nd ed.) [M]. Copenhagen: World Health Organization, 2000.
- [32] 杨怀金, 杨德容, 叶芝祥, 等. 成都西南郊区春季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4490-4503.
- Yang H J, Yang D R, Ye Z X, *et al.* Characteristics of elements and potential ecological risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} at the southwest suburb of Chengdu in spring[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4490-4503.
- [33] 李铭煊, 秦玮, 杭怡春, 等. 北京昌平某地冬季大气 PM_{2.5} 元素污染特征分析[J]. *中国环境监测*, 2016, **32**(3): 58-63.
- Li M X, Qin W, Hang Y C, *et al.* Study on the pollution characteristics of particulate matter based on the characteristic elements in Changping of Beijing[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(3): 58-63.
- [34] Visschedijk A H J, van der Gon H A C D, Hulskotte J H J, *et al.* Anthropogenic Vanadium emissions to air and ambient air concentrations in North-West Europe [J]. *E3S Web of Conferences*, 2013, **1**, doi: 10.1051/e3sconf/20130103004.
- [35] 厦门市人民政府. 厦门市人民政府关于印发厦门市打赢蓝天保卫战三年行动计划实施方案的通知[EB/OL]. http://www.xm.gov.cn/zwgk/flfg/sfwj/201901/t20190102_2200746.htm, 2018-12-21.
- [36] 郭广慧, 雷梅, 陈同斌, 等. 交通活动对公路两侧土壤和灰尘中重金属含量的影响[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(10): 1937-1945.
- Guo G H, Lei M, Chen T B, *et al.* Effect of road traffic on heavy metals in road dusts and roadside soils [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(10): 1937-1945.
- [37] 邵莉, 肖化云. 公路两侧大气颗粒物中的重金属污染特征及其影响因素[J]. *环境化学*, 2012, **31**(3): 315-323.
- Shao L, Xiao H Y. Pollution characterization and controlling factors of heavy metals in airborne particulate matter near expressway[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, **31**(3): 315-323.
- [38] 徐少才, 王静, 吴建会, 等. 青岛市 PM_{2.5} 化学组分特征及综合来源解析[J]. *中国环境监测*, 2018, **34**(4): 44-53.
- Xu S C, Wang J, Wu J H, *et al.* Characterization of chemical composition and comprehensive source apportionment of PM_{2.5} in Qingdao [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, **34**(4): 44-53.
- [39] 雷文凯, 李杏茹, 张兰, 等. 保定地区 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 38-44.
- Lei W K, Li X R, Zhang L, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} collected in Baoding[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 38-44.
- [40] Tian H Z, Zhu C Y, Gao J J, *et al.* Quantitative assessment of atmospheric emissions of toxic heavy metals from anthropogenic sources in China: historical trend, spatial distribution, uncertainties, and control policies [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(17): 10127-10147.
- [41] 刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 等. 常州夏冬季 PM_{2.5} 中无机组分昼夜变化特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 980-989.
- Liu J S, Gu Y, Ma S S, *et al.* Day-night differences and source apportionment of inorganic components of PM_{2.5} during summer-winter in Changzhou City[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 980-989.
- [42] 秦贱荣, 张新英, 黄炯丽, 等. 南宁市大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及其健康风险评估[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(7): 35-44.

- Qin J R, Zhang X Y, Huang J L, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metal in atmospheric PM_{2.5} in Nanning City[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(7): 35-44.
- [43] Rudell B, Ledin M C, Hammarström U, *et al.* Effects on symptoms and lung function in humans experimentally exposed to diesel exhaust [J]. *Occupational & Environmental Medicine*, 1996, **53**(10): 658-662.
- [44] Lippmann M, Ito K, Hwang J S, *et al.* Cardiovascular effects of nickel in ambient air [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2006, **114**(11): 1662-1669.
- [45] Hu X, Zhang Y, Ding Z H, *et al.* Bioaccessibility and health risk of arsenic and heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn) in TSP and PM_{2.5} in Nanjing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **57**: 146-152.
- [46] Qin S J, Li B R, Wang X, *et al.* Metal element detection and carcinogenicity risk assessment of PM_{2.5} samples [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2020, **39**(6): 1273-1276.
- [47] Wu Y J, Li G Y, Yang Y, *et al.* Pollution evaluation and health risk assessment of airborne toxic metals in both indoors and outdoors of the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Research*, 2019, **179**, doi: 10.1016/j.envres.2019.108793.
- [48] 周海英, 郑瑞君, 苏万春, 等. 船舶岸电推广研究 [J]. *科教文汇*, 2021, (10): 80-81.
- Zhou H Y, Zheng R J, Su W C, *et al.* The research on ship shore power promotion [J]. *The Science Education Article Collects*, 2021, (10): 80-81.
- [49] IEA. Global EV Outlook 2021 [EB/OL]. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>, 2021-11-12.



CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model	PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing	ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data	WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period	Ji Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths	WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst	HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province	XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil	XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)