

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区O₃浓度变化.....王占山,李云婷,安欣欣,李倩,孙乃迪,王步英,潘锦秀(1)

南京北郊黑碳气溶胶的来源解析.....肖思晗,于兴娜,朱彬,何镓祺,吕睿,沙丹丹(9)

电镀厂周边大气PM₁₀中重金属季节性分布特征及生态风险评价.....赵珍丽,赵委托,黄庭,程胜高,余葱葱,尹伊梦(18)

广西玉林市大气PM₁₀和PM_{2.5}中有机碳和元素碳污染特征分析.....黄炯丽,陈志明,莫招育,李宏姣,杨俊超,刘慧琳,毛敬英,梁桂云,张达标,吴熊平,郝爽(27)

青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征.....张瑞峰,祁建华,丁雪,谢丹丹(38)

大气环境分区管理:以广东省为例.....杨柳林,李敏辉,廖程浩,曾武涛,张晖,张永波(49)

基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别:以南京为例.....温爽,王桥,李云梅,朱利,吕恒,雷少华,丁潇蕾,苗松(57)

基于SWAT模型的流域河道硝酸盐δ¹⁵N和δ¹⁸O模拟.....王康,冉宁,林忠兵,周祖昊(68)

程河流域非点源污染负荷估算及其控制对策.....陈学凯,刘晓波,彭文启,董飞,黄智华,冯顺新,王若男(77)

陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价.....余葱葱,赵委托,高小峰,程胜高,谢地,马鹏途(89)

天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价.....张新波,宋姿,张丹,刘楠楠,李楠,温海涛(99)

西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响.....王琼,李乃稳,李磊,李龙国,苟思,杨凌肖(109)

以HKUST-1为模板制备铜电极物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明B.....陈卫平,彭程伟,杨阳,吴玉梅(117)

黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险.....姚宏,卢双,张旭,裴晋,鲁垠涛(123)

淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征.....周健,李春辉,张志永,胡红青,万成炎,胡莲,潘晓洁(130)

磷酸盐对铁锰复合氧化物膜去除地表水中氨氮的影响.....卓瑞双,黄廷林,张瑞峰,文刚(137)

K₂S₂O₈强化g-C₃N₄薄膜光电催化降解Cu(CN)₂并同步回收Cu.....党聪哲,李一兵,王彦斌,赵旭(145)

以HKUST-1为模板制备铜电极物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明B.....蒲嘉懿,万金泉,王艳,马邕文,武书彬(152)

氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能.....马亚红,黄婉婷,刁开盛,李鹏飞,谭学才,董慧岭,覃方夸,雷福厚,刘绍刚(161)

铁锰泥除砷颗粒吸附剂对As(V)的吸附去除.....曾辉平,吕赛赛,杨航,尹灿,曹瑞华,王艳菊,李冬,张杰(170)

水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态.....马玉玲,马杰,陈雅丽,雷梅,郭华明,翁莉萍,李永涛(179)

阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响.....任爽,孟昭福,王腾,张洋,田凯,刘伟,闫东旭(187)

典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征.....赵雪,张子峰,祝富杰,李一凡,马万里(195)

水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响.....许雯佳,戚小英(202)

环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性.....戴琦,刘锐,舒小铭,张永明,陈吕军(212)

AAO工艺低氧条件下的运行及其模拟.....曹特特,王林,李咏梅(219)

磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复.....顾澄伟,陈方敏,李祥,张程锦(227)

碳源对污水处理厂SAD工艺小试的影响.....李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏伟,张杰(232)

容积负荷对ABR-MBR工艺反硝化除磷性能的影响.....吕亮,尤雯,韦佳敏,吴鹏,沈耀良(239)

DNBF-O₃-GAC组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物.....钟丽燕,郝瑞霞,王卫东,万京京,朱晓霞(247)

交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响.....孙洪伟,陈翠忠,吴长峰,赵华南,于雪,方晓航(256)

纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响.....周丰,王翻翻,钱飞跃,黄慧敏,沈耀良,周建民(263)

高含固污泥厌氧消化中Fe/S及pH对原位抑硫效率影响及其交互作用.....韩芸,曹玉芹,卓杨,王晓飞,韩雅婷,彭党聪(269)

浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析.....刘甜甜,崔崇威,赫俊国,唐建(276)

去除城市生活污水中有机络合态金属强化其厌氧生物制气.....卢怡清,许颖,董滨,戴晓虎(284)

污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价.....王丰,李润东,李彦龙,赵云斌,杨天华(292)

初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的CH₄和N₂O通量日变化特征.....杨平,谭立山,黄佳芳,何清华,全川(300)

3种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响.....武岩,红梅,林立龙,刘梅,刘宇杰(310)

有机替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及N₂O排放的影响.....侯苗苗,吕凤莲,张弘毅,周应田,路国艳, Ayaz Muhammad,黎青慧,杨学云,张树兰(321)

拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应:¹³C-CO₂脉冲标记.....陈珊,祝贞科,袁红朝,王久荣,彭佩钦,葛体达,吴金水(331)

陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征.....兰志龙,赵英,张建国,李会杰,司炳成,焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial(339)

不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响.....邹娟,胡学玉,张阳阳,陈窈君,王向前,刘扬(348)

秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响.....徐国鑫,王子芳,高明,田冬,黄容,刘江,黎嘉成(355)

县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估.....李锦芬,瞿明凯,刘刚,黄标(363)

基于改进LUR模型的区域土壤重金属空间分布预测.....曾菁菁,沈春竹,周生路,陆春峰,金志丰,朱雁(371)

沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析.....李嘉康,宋雪英,魏建兵,王颖怡,李玉双,郑学昊(379)

磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化模拟铅镉污染土壤.....赵庆圆,李小明,杨麒,陈灿,钟振宇,钟宇,陈飞,陈寻峰,王祥(389)

控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响.....封文利,郭朝晖,史磊,肖细元,韩晓晴,冉洪珍,薛清华(399)

典型土壤双季稻对Cd吸收累积差异.....李欣阳,龙坚,王树兵,陈齐,董霞,蒋凯,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(406)

松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征.....张曼胤,李梦洁,崔丽娟,王贺年,郭子良,徐卫刚,魏圆云,杨思,肖红叶(415)

硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响.....代军帅,左小虎,王明霞,姚炎红,周志峰(422)

长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响.....王伟华,刘毅,唐海明,孙志龙,李宝珍,葛体达,吴金水(430)

海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较.....张玉,米铁柱,甄毓,陈焯,付璐璐,王勋功(438)

鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系.....袁丽娟,廖且根,张莉,张大文,罗林广,刘聚涛(450)

畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征.....张昊,王盼亮,杨清香,俞宁(460)

烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧飞灰性质的影响.....章骅,于思源,邵立明,何晶晶(467)

《环境科学》征稿简则(17) 《环境科学》征订启事(26) 信息(160, 255, 338)

电镀厂周边大气 PM₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价

赵珍丽¹, 赵委托^{2*}, 黄庭¹, 程胜高^{1*}, 余葱葱¹, 尹伊梦¹

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 2. 核工业二〇三研究所环境工程与评价中心, 咸阳 712000)

摘要: 本研究以东莞市 5 个镇区的电镀厂为中心, 在其周边共布设 45 个监测点位, 通过系统采集 2015 年度春夏秋冬四个季节不同时段电镀厂周边大气 PM₁₀ 颗粒物样品, 应用 ICP-MS 分析样品中 12 种重金属的含量, 并对季节分布特征及空间分布特征进行比较, 评价其生态风险。 以期为大气环境危害与风险评估及相关部门制定污染治理决策提供科学依据。 结果表明, 5 个镇的 PM₁₀ 浓度均小于我国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 中相应日均值二级标准限值, 且呈现出冬季污染严重, 夏季污染较轻的规律。 PM₁₀ 中各金属的浓度总体表现为秋冬季偏高, 且各镇 PM₁₀ 中 As、Cd、Cr 均超过《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 中年平均浓度限值, 其中严重超标的是虎门镇、沙田镇和大岭山镇。 富集因子法和地累积指数法分析表明, Cd、Sb、Hg、Co 为极强污染, Pb、Zn 为轻度污染到强污染, Ni、Cr、Mn 和 V 属于未污染。 研究区大气颗粒物 PM₁₀ 中重金属的潜在生态风险指数 RI 远大于 600, 潜在的生态风险极强。

关键词: PM₁₀; 重金属; 富集因子; 地累积指数; 生态风险评价; 电镀厂

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0018-09 DOI: 10.13227/j.hjcx.201705025

Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM₁₀ Around Electroplating Plants

ZHAO Zhen-li¹, ZHAO Wei-tuo^{2*}, HUANG Ting¹, CHENG Sheng-gao^{1*}, YU Cong-cong¹, YIN Yi-meng¹

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. The Center of Environmental Engineering and Assessment, No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, Xianyang 712000, China)

Abstract: PM₁₀ samples were collected from 45 sites around the electroplating factories in five towns in Dongguan at different times during all four seasons in 2015. The contents of 12 heavy metals (HMs) from the PM₁₀ samples were analyzed by ICP-MS. The seasonal and spatial distribution characteristics and the ecological risk were analyzed to provide a scientific foundation for the relevant department to make decisions regarding the environmental hazard, risk assessment and, pollution control. The results showed that PM₁₀ concentrations in the towns were lower than national standard level-II, and the air pollution was heavier in winter than summer. The HM concentrations were higher in autumn and winter, and As, Cd, and Cr concentrations were higher than national standard (GB3095-2012). The concentrations of HMs in Humen, Shatian, and Dalingshan were much higher. The results for the enrichment factor and the geoaccumulation index indicated that Cd, Sb, Hg, and Co were in the extreme degree of pollution category, Pb and Zn were in the slight to extreme degree of pollution category, and Ni, Cr, Mn, and V were described as uncontaminated. The average potential ecological risk assessment (RI) of the HMs from the PM₁₀ samples was more than 600, which suggested an extremely serious ecological risk in the study area.

Key words: PM₁₀; heavy metals; enrichment factor; geoaccumulation index; potential ecological risk assessment; electroplating plants

近年来雾、霾频发, 大气环境问题已引起人们的广泛关注。有研究表明, 大约 75% ~ 90% 的重金属分布在 PM₁₀ 中^[1]。PM₁₀ 中所含的污染物经呼吸作用进入人体, 威胁人体健康, 其中, 重金属是最有害污染物之一^[2], 可能会造成中枢神经系统及脑损伤、智力障碍、肝肾及骨组织损伤、出生缺陷等, 甚至引发癌症^[3]。当前, 有关 PM₁₀ 中重金属化学成分和来源的研究较多^[4-6], 在此基础上, 众多研究者针对具体场地如焦化厂、机场周边等地的 PM₁₀ 中重金属进行了健康风险评价^[7,8]。在生态风险评价方面, PM_{2.5}^[9]、TSP^[10] 的相关研究较多, 而关于 PM₁₀, 目

前有对遵义市^[11]、宝鸡市^[12]、长沙市^[13]等地 PM₁₀ 中重金属的生态风险分析与评价, 而关于电镀厂周边大气 PM₁₀ 中重金属的生态风险评价尤为少见。

珠江三角洲是典型的城市群区域, 区域性大气复合型污染特征日益突出^[14]。东莞市位于珠江三角洲中两个特大城市广州和深圳之间, 且在此区域

收稿日期: 2017-05-03; 修订日期: 2017-08-10

基金项目: 中央高校青年教师科研启动基金项目(CUGW140908); 国家自然科学基金项目(41072023, 41402312)

作者简介: 赵珍丽(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境风险评价与管理, E-mail: m18760963545@163.com

* 通信作者, E-mail: weituo2006@126.com; chengsg@cug.edu.cn

中,城市间的距离极小,城乡分离带已基本消失,城市间的污染相互影响,东莞市的大气环境问题的研究不仅关系到本地空气质量的改善,也对珠江三角洲空气质量的改善起到举足轻重的作用^[15]. 东莞市以制造业为主,随着各个企业的不断发展,污染物排放量将随之增加,污染源愈发复杂,众多企业产生大量的大气颗粒物一次污染物和二次转化污染物,造成东莞市 PM₁₀ 污染更加严重. 电镀产业是东莞市的核心产业之一,电镀企业排放的大量废水、固体废物和废气中含重金属等有害物质^[16]. 电镀厂周边大气颗粒物中重金属的研究对于开展区域性大气污染研究具有十分重要的意义.

本文以东莞市电镀厂周边大气 PM₁₀ 中重金属为主要研究内容,通过对电镀厂周边大气 PM₁₀ 中重金属含量进行定量分析,应用地累积指数法及富集因子法对重金属生态风险进行评价,以期为研究区重金属风险评价和治理提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于东莞市,分别是麻涌镇、沙田镇、虎门镇、长安镇和大岭山镇,5个镇在东莞市分别从西到南分布. 5个镇均位于珠江口岸,总体地貌以丘陵台地和冲积平原为主,属亚热带季风气候,日照充足,雨量充沛,温差振幅小,季风明显,年平均气温 22℃,年均降水量 1 783 mm. 研究区 5 个镇是目前东莞市的电镀厂集中区,电镀产业带动了东莞市

工业企业发展,是东莞市核心产业之一. 据企业调查显示,研究区电镀厂主要的电镀类型有镀铜、镀锌、镀铬、镀银、镀金等.

对于一般电镀企业而言,产污环节主要存在于以下几个流程. 抛光:产生的污染物主要是含金属粉尘;除油:产生含有油、碱的废水;酸洗:主要产生含有金属离子、酸的废水;预镀铜:产生含铜、含酸的废水;镀镍:主要产生含镍的废水以及废气;镀硬铬:产生含铬的废水、铬雾废气;钝化:产生含铬的废水;清洗:含有重金属的废水;喷漆:产生含有机溶剂的废气;烘干:产生含有有机溶剂的废气^[17].

1.2 样品采集

本研究以区域内电镀厂为中心在其周边共布设 45 个监测点位,采样点均设在周边没有遮挡物且通风宽敞的地方,并分析了风向、地形等自然因素,避开周边其他污染源,利用 GPS 准确获取采样点的具体地理位置,得到采样点地理位置图,如图 1. 各监测点周边 50 m 范围内除电镀厂外无其他大型企业及污染源,无主要交通干线,监测点位布设原则与环境空气质量监测要求基本一致. 采样仪器为中流量大气采样器(青岛,2030 型),采样流量为 100 L·min⁻¹,采样滤膜为石英滤膜(Φ 90 mm,英国). 对研究区域内 45 个采集监测点进行了春夏秋冬四个季节不同时段采样,每季进行 5~7 d 有效天数连续 24 h 采集(不利天气状况时停止采集),具体采样时间见表 1.

表 1 采样时间

Table 1 Sampling dates

季节	采样时间						
冬季(2014 年 12 月~2015 年 3 月)	2015-01-14	2015-01-15	2015-01-16	2015-01-17	2015-01-18	2015-01-19	2015-01-20
春季(2015 年 4~5 月)	2015-04-12	2015-04-13	2015-04-14	2015-04-15	2015-04-16	2015-04-17	2015-04-18
夏季(2015 年 6~9 月)	2015-07-11	2015-07-12	2015-07-13	2015-07-14	2015-07-15	—	—
秋季(2015 年 9~11 月)	2015-10-15	2015-10-16	2015-10-17	2015-10-18	2015-10-19	2015-10-20	2015-07-21

1.3 PM₁₀ 的质量浓度与重金属含量测定

采用重量法计算 PM₁₀ 的质量浓度,采样前将空白滤膜于马弗炉 500℃ 条件下灼烧 3 h,以去除膜上的有机杂质等. 采样前后将滤膜在恒温恒湿箱放置 48 h,恒重后采用十万分之一天平称量,每张滤膜各称量 3 次求其平均值,将滤膜剪成条状,取适量 HCl-HNO₃ 混合酸(体积比 1:3)消解,随后用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS, Agilent 7500a)测定 PM₁₀ 中重金属元素 As、Co、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Sb、V 和 Zn 的含量,采用 Tekran2500CVAFS 测

汞仪测定 Hg 的含量. 为保证实验准确性,每批次实验均取等量空白滤膜进行空白实验对照. 结果表明,空白膜中元素本底值低于仪器检出限,对结果无较大影响.

1.4 评价方法

1.4.1 富集因子法

富集因子法被广泛应用于大气重金属来源的研究^[18,19],计算公式如下:

$$EF = (C_i/C_n)_{\text{样品}} / (C_i/C_n)_{\text{背景}}$$

式中,EF 表示富集系数; C_i 为重金属元素 i 的含

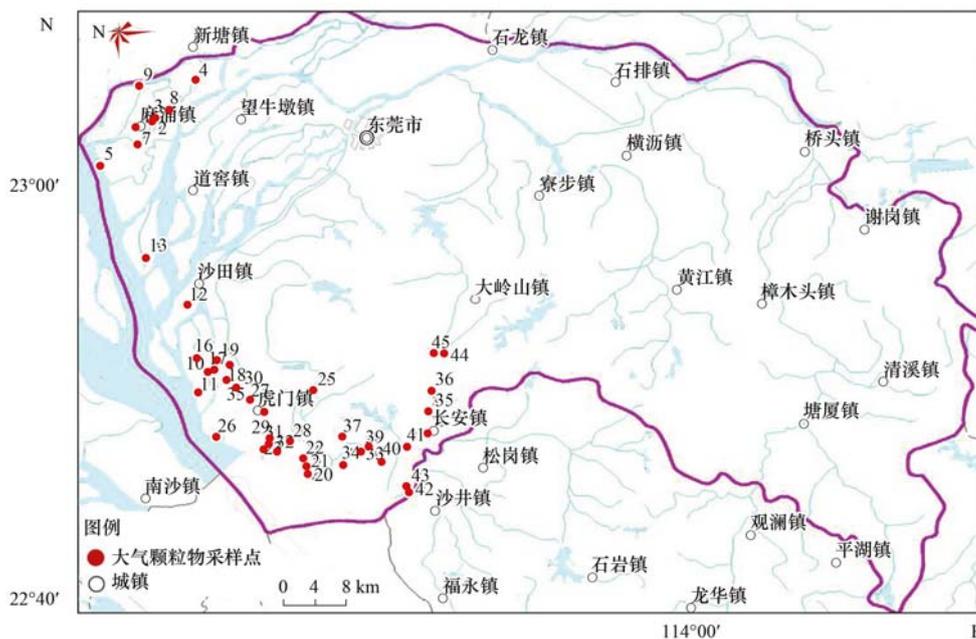


图 1 研究区 PM_{10} 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution map showing the PM_{10} sampling points in the study area

量, $mg \cdot kg^{-1}$; C_n 为参比元素 n 的含量, $mg \cdot kg^{-1}$.
重金属富集程度与污染分级表如表 2^[20].

本文选取 Mn 元素作为参比元素, 元素背景浓度均取广东省土壤背景值^[21].

表 2 富集因子污染程度分级

Table 2 Contamination level for the enrichment factors

EF	<1	[1 ~ 2)	[2 ~ 5)	[5 ~ 20)	[20 ~ 40)	≥ 40
污染级别	0	1	2	3	4	5
富集程度	无	轻度	中度	重度	严重	极重

1.4.2 地累积指数法

地累积指数 I_{geo} 是一种研究水环境沉积物中重金属污染的定量指标^[22], 地累积指数不仅可以反映各组分分布的自然变化特征, 还可以判别人为活动对环境组分的影响, 是判定人为活动影响的重要参数, 目前也应用于土壤环境中元素、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 等的分析^[23].

计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{k \times B_n} \right]$$

式中, C_n 为实测大气颗粒物中元素 n 的含量, $mg \cdot kg^{-1}$; B_n 为元素 n 的广东省土壤背景值^[21], $mg \cdot kg^{-1}$; k 为考虑各地岩石差异可能会引起背景值变动而取的系数. 表 3 为 I_{geo} 的详细分级标准与污染程度划分.

1.4.3 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法由瑞典科学家 Hakanson 提出^[24], 该方法不仅可用于评价土壤及河流沉积物

表 3 地累积指数污染程度分级

Table 3 Contamination level for different geoaccumulation indexes

分级	地累积指数 (I_{geo})	污染程度
0	$I_{geo} \leq 0$	无污染
1	$0 < I_{geo} \leq 1$	轻度污染
2	$1 < I_{geo} \leq 2$	中度污染
3	$2 < I_{geo} \leq 3$	中度污染-重度污染
4	$3 < I_{geo} \leq 4$	重度污染
5	$4 < I_{geo} \leq 5$	重度污染-极重污染
6	$I_{geo} > 5$	极重污染

重金属的生态风险, 同样可用于评价大气降尘中的重金属的生态风险^[25].

计算公式如下:

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

$$E_i = T_i \times \left(\frac{C_i}{C_0} \right)$$

式中, RI 为潜在生态风险污染指数; E_i 为潜在生态危害单项系数; T_i 为重金属毒性系数, 本研究分别取 10 (As)、30 (Cd)、2 (Cr)、5 (Cu)、40 (Hg)、5 (Ni)、5 (Pb) 和 1 (Zn)^[26]; C_i 为重金属含量,

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_0 为重金属背景值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 采用广东省土壤重金属背景值^[21]; RI 为各重金属 E_i 之和. 重金属的潜在生态风险分级标准见表 4.

表 4 潜在生态风险评价指标与等级划分

Table 4 Evaluation index and grade division for the potential ecological risk

E_i	单因子污染物潜在生态风险程度	RI	总的潜在生态风险程度
$E_i < 40$	轻微	$RI < 150$	轻微
$40 \leq E_i < 80$	中	$150 \leq RI < 300$	中
$80 \leq E_i < 160$	较强	$300 \leq RI < 600$	强
$160 \leq E_i < 320$	强	$RI \geq 600$	极强
$E_i \geq 320$	极强		

2 结果与讨论

2.1 电镀厂周边大气 PM₁₀ 的浓度时空变化特征

东莞市电镀厂周边大气 PM₁₀ 的质量浓度监测结果见表 5. 东莞市电镀厂周边 PM₁₀ 的总平均浓度为 $87.31 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 远低于我国空气质量标准 (GB

表 5 研究区大气 PM₁₀ 的质量浓度监测结果/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 5 Concentration of PM₁₀ in the study area/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

地区	麻涌镇	沙田镇	虎门镇	长安镇	大岭山镇	总平均
质量浓度	85.09 (71.10 ~ 104.96)	88.64 (69.93 ~ 102.12)	92.08 (69.51 ~ 107.99)	83.49 (70.36 ~ 95.89)	80.61 (43.44 ~ 117.78)	87.31 (43.44 ~ 117.78)

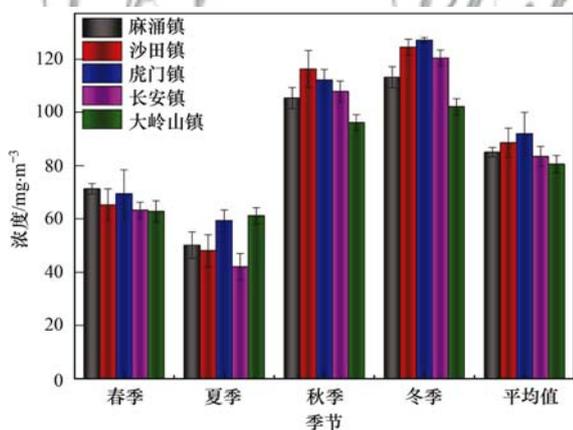


图 2 研究区各镇 PM₁₀ 质量浓度季节性分布特征

Fig. 2 Seasonal distribution characteristic of the concentration of PM₁₀ in the study area

2.2 PM₁₀ 中重金属元素在不同季节和不同地点的变化特征

根据采样结果分析, PM₁₀ 中重金属元素浓度在各镇的分布特征在如图 3 所示.

由图 3 可知, 5 个镇的各重金属元素浓度差别较小. 各镇 PM₁₀ 中 As、Cd、Cr 元素均高于《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 中的年平均值, 其中

3095-2012) 中的二级标准 (日均值 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). PM₁₀ 的浓度空间分布由高到低为: 虎门镇 > 沙田镇 > 麻涌镇 > 长安镇 > 大岭山镇. 大岭山镇的电镀厂较其他镇规模较小且生产活动时间较短, 大气颗粒物排放量较少; 其次大岭山镇的采样点位于森林公园, 绿植较多, 对大气颗粒物也有一定的滞留和吸附作用, 因此 PM₁₀ 浓度最低.

从超标率及超标倍数来看, PM₁₀ 在各个镇均未超标.

各镇 PM₁₀ 质量浓度随季节变化分布特征如图 2. 5 个镇的四季浓度均未超过国家 PM₁₀ 的日均值二级标准, 且均呈现出冬季污染最严重, 夏季污染较轻的规律. 冬季各种化石燃料使用量增大, 污染物排放量随之增多, 加之气候原因, 采样期间研究区空气流动性较差, 使污染物难以扩散. 夏季降雨充沛, 雨水的冲刷有利于颗粒物的沉降, 且南海季风带来清洁的海洋气流使污染物浓度得到稀释, 因此 PM₁₀ 浓度冬季较夏季较低.

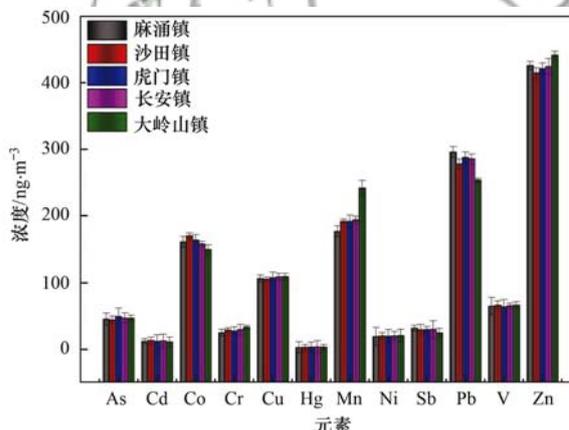


图 3 研究区 PM₁₀ 中重金属元素浓度在各镇的分布特征

Fig. 3 Concentrations distribution characteristics of HMs in the PM₁₀ in the study area

虎门镇、沙田镇和大岭山镇最高, 而各镇的 Hg 和 Pb 总体平均值均未超标. 据实际调查, 研究区电镀厂采用的工艺流程大致相同, 排放的气态重金属的特点差异较小. 且按照国家环保监管要求, 企业均严格采取了污染处理措施, 排放的重金属的量较少. 因此研究区内 As、Cd、Cr 为电镀材料的电镀厂较多是 As、Cd、Cr 元素超标的主要原因.

比较成都、杭州、Gwangju、Venice 大气 PM₁₀ 中重金属浓度(见表 6)可知,研究区除 Pb 和 Zn 元素外,其余元素浓度均高于成都;除 As、Cu、Pb、Zn 外,研究区其余元素均高于杭州;而比较 Gwangju,

研究区重金属元素浓度均偏高;相对 Venice, As、Cd、Cr、Ni、Sb 浓度较低,其余元素均偏高.可见,研究区 PM₁₀ 中重金属污染较国内外部分城市严重,应采取一定的防范措施.

表 6 研究区 PM₁₀ 中重金属浓度与国内外部分城市的比较/ng·m⁻³

Table 6 Comparison of the concentrations of the HMs in the PM₁₀ to other cities/ng·m⁻³

地区	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Sb	Pb	V	Zn	文献
东莞市	46.8	12.6	163.2	28.3	107.3	3.4	191.5	20.0	30.0	284.9	65.3	422.1	本研究
成都	—	9	3	18	41	—	84	11	—	705	34	1 060	[27]
杭州	70	10	—	20	130	—	130	20	—	370	20	550	[28]
Gwangju(韩国)	5.5	1.5	0.5	9.5	—	—	31.7	7.3	11.1	61.5	—	176.0	[29]
Venice(意大利)	181	170	—	57	73	—	—	74	68	161	—	387	[30]

图 4 为大气颗粒物 PM₁₀ 中重金属元素浓度季节性分布特征,PM₁₀ 中重金属总平均浓度由高到低为:Zn > Pb > Mn > Co > Cu > V > As > Sb > Cr > Ni > Cd > Hg. 从中可知,As、Co、Cr、Cu、Mn、Pb、V 的浓度均表现为冬季 > 秋季 > 夏季 > 春季. 这和 PM₁₀ 的质量浓度的季节分布规律相似,即 PM₁₀ 的浓度越高,重金属的浓度随之升高,PM₁₀ 的质量浓度影响重金属的浓度. 而元素 Cd、Hg、Ni、Sb、Zn 的浓度季节分布特征没有明显规律.

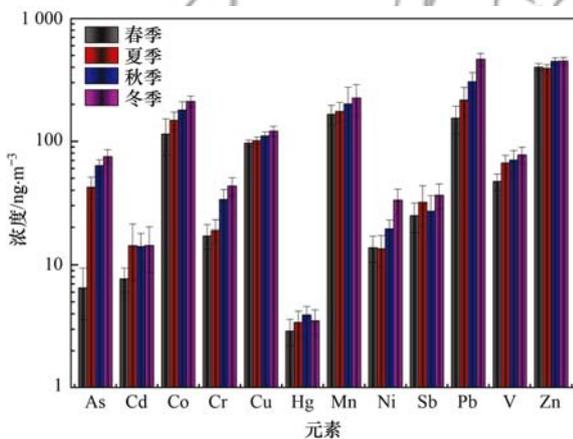


图 4 研究区 PM₁₀ 中重金属元素浓度季节性分布特征

Fig. 4 Seasonal distribution characteristic of the concentration of the HMs in PM₁₀

2.3 PM₁₀ 中重金属污染程度评价

2.3.1 富集因子法

以 Mn 元素作为参比元素,取广东省土壤背景值为背景浓度,分别计算不同元素的富集因子 EF 值如图 5 所示.

PM₁₀ 中各元素 EF 值从大到小为: Cd > Sb > Hg > Co > Zn > Pb > Cu > As > Ni > V > Cr. 其中 Cr、Ni、V 的 EF 值均小于 5,表明其极大可能来源于地壳,主要受地面扬尘的影响; As、Cu、Pb 和 Zn 是典型的城市污染元素,EF 值在 5 ~ 20 之间,初步判断

来自人为污染,采样点所处区域为城镇区,交通流量较大,Cu 和 Zn 主要来源于机动车排放、橡胶轮胎的磨损,且汽油中含有一定量的 Pb,元素不断积累并迁移转化,这些都是 EF 值偏高的原因;元素 Co 的 EF 值在 20 ~ 40 之间,属于强污染,说明同时受到人为污染和自然污染,Co 和钴合金在电镀业有着广泛的应用,这也是 Co 元素强富集的主要原因.元素 Cd、Hg 和 Sb 的富集因子远大于 40,属于极强污染,Cd 一方面来源于化石燃料燃烧、冶炼、化工、电镀、印染、垃圾焚烧等^[31],另一方面研究区存在大量以 Cd 为电镀材料的企业,因此与电镀镀种和工艺也有很大关系,说明受人为污染源影响严重,是典型的污染元素.

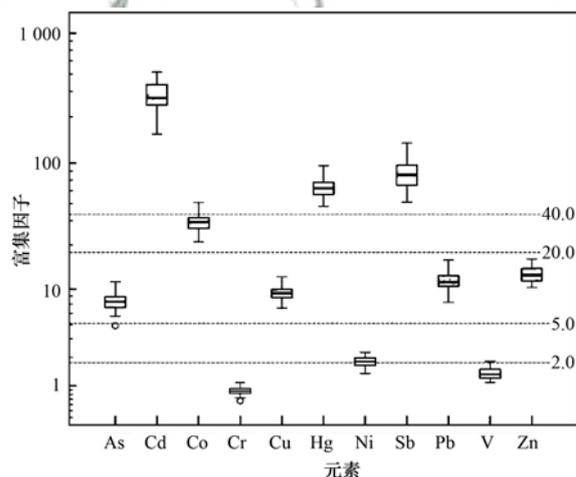


图 5 研究区大气颗粒物 PM₁₀ 中重金属元素富集因子

Fig. 5 Enrichment factors of the HMs in PM₁₀

2.3.2 地累积指数法

经计算,研究区各采样点 PM₁₀ 中重金属元素地累积指数及污染程度如表 7 所示. Cd、Co、Hg、Sb、Pb、Zn、Cu、As、Ni 都有不同程度的污染; Cr、Mn、V 的 I_{geo} 值均小于 0,属于未污染,说明主要来

源于自然因素的作用。

由分析结果可知,在相同的采样点位不同重金属元素累积指数各不相同,说明大气颗粒物中重金属的富集程度与区域环境和电镀种及工

艺有关。结合富集因子法分析,两种评价方法结果均表明:元素 Cd、Co、Hg、Sb、Pb、Zn、Cu 和 As 受人为活动影响最大,污染严重,且污染规律较明显。

表 7 研究区大气颗粒物重金属元素的地累积指数

Table 7 Geoaccumulation indexes of the HMs in the study area

元素	Cd	Co	Hg	Sb	Pb	Zn
I_{geo} 范围	6.27~7.71	3.72~4.22	4.32~5.24	4.68~5.63	2.07~2.61	2.44~2.69
污染程度	极重污染	重度极重污染	重度-极重污染	重度-极重污染	中度-重度污染	中度-重度污染
元素	Cu	As	Ni	Cr	Mn	V
I_{geo} 范围	1.96~2.19	1.42~2.01	-0.42~0.23	<0	<0	<0
污染程度	中度-重度污染	中度污染	无污染-轻度污染	无污染	无污染	无污染

2.4 潜在生态风险评估

2.4.1 PM₁₀ 中重金属潜在生态风险等级

表 8 为研究区 PM₁₀ 中重金属元素潜在生态危害系数。因未获得 Sb 的毒性响应系数,对 Sb 元素未进行潜在生态风险评估。

由表 8 可知,各元素的生态危害系数由大到小为: Cd > Hg > Co > Pb > As > Cu > Zn > Ni > Cr > Mn > V。根据分级标准,元素 Ni、Cr、Mn、V 的 E_i 值均小于 40,生态危害级别为轻微; Zn 的 E_i 值在 40~80 之间,属于中等危害级别; Cu 的 E_i 值介于 160~

320 之间,属于强危害级别; Cd、Hg、Co、Pb、As 的 E_i 值均大于 320,属于极强危害。研究区大气颗粒物 PM₁₀ 中重金属的总潜在生态风险指数 RI 达到 51 180.98,远高于 600,存在极强的生态风险。

以上两种分析方法所得的污染程度排序和污染等级基本一致: Cr 和 V 的富集因子 $EF < 1$,污染等级较轻,属于轻微生态危害; As、Co、Cu、Ni、Pb、Zn 等元素 $EF \geq 5$,说明污染较严重,属于强-极强生态危害; 两种分析方法结果均表明 Cd 和 Hg 为极严重污染元素。

表 8 研究区大气颗粒物重金属元素潜在生态危害系数

Table 8 Potential ecological risk factors for the HMs in the study area

元素	As	Co	Cu	Pb	Cd	Hg
E_i 范围	246.27~369.35	642.19~911.63	220.19~259.17	257.18~374.65	15 051.90~40 712.95	13 641.03~25 771.79
平均值	322.05	758.77	238.30	324.11	29 312.63	20 103.62
元素	Cr	Mn	Ni	V	Zn	
E_i 范围	3.31~5.76	3.10~5.81	29.92~46.86	3.95~6.00	64.53~76.43	
平均值	4.55	4.37	36.98	5.02	70.59	

2.4.2 潜在生态风险分布特征

由公式计算研究区各采样点位 PM₁₀ 中重金属潜在生态风险指数见图 6。研究区所有采样点位的 RI 值范围为 33 272.69~65 506.30,均远远超过 600,表明研究区重金属生态风险程度极强。采样点位的 RI 平均值为 51 180.98,其中 3 号点位 RI 值最小,34 号点位最大,其次是 24 号点位。这表明 24 和 34 号采样点位周围可能存在重金属污染源。

图 7 为研究区 PM₁₀ 中重金属元素对各采样点位的潜在生态风险的相对贡献率。从中可知, Hg 和 Cd 对 RI 值贡献率最大,分别为 39.60% 和 56.89%。Hg 的贡献率最小值和最大值分别在 15 号和 31 号采样点位,而 Cd 的贡献率最小值和最大值分别在 31 号和 15 号采样点位。其主要原因一方

面是由于 Hg 和 Cd 的土壤背景值较低,且两者的毒

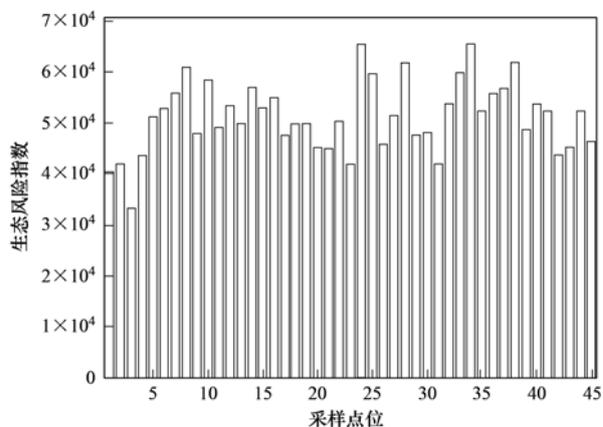


图 6 研究区各采样点位 PM₁₀ 中重金属元素潜在生态风险指数

Fig. 6 Average potential ecological RIs of the HMs in PM₁₀ at the sampling sites

性系数较高;另一方面是由于重金属在不同形态下可能会引起不同程度的生态风险.研究表明 Cd 在 PM_{10} 中的酸提取态比重较大,而 Hg 在酸提取态中占的比重虽小,但在可还原态中比重较大^[32].说明二者的生物可利用性较强,易被植物吸收利用,从而进入食物链,对生态系统造成危害的风险更高.由

此可见,低浓度的重金属对潜在生态风险的贡献率不容忽视.

总之,研究区 PM_{10} 中重金属污染严重,会损害人类健康,潜在较大的生态风险,应及时采取科学的防治措施,以确保周边人员的身体健康和大气环境的安全.

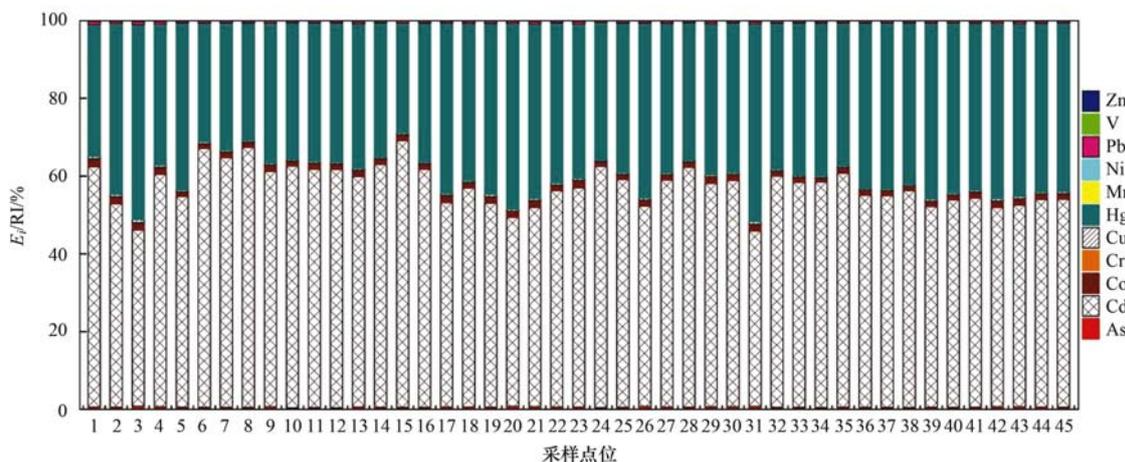


图 7 研究区 PM_{10} 中重金属元素对各采样点位潜在生态风险相对贡献率

Fig. 7 Relative contribution rates of HMs for potential ecological RIs at the sampling sites

3 结论

(1) 研究区 PM_{10} 的四季总平均浓度均低于我国空气质量标准 (GB 3095-2012) 中相应日均值二级标准限值,且各采样点位超标率及超标倍数都不超标. 5 个镇的 PM_{10} 随季节变化规律相似,均呈现出冬季污染最严重,夏季污染较轻的规律.

(2) 电镀企业周边大气 PM_{10} 中 12 种重金属元素平均浓度由高到低为: $Zn > Pb > Mn > Co > Cu > V > As > Sb > Cr > Ni > Cd > Hg$. 其中 As、Cd 和 Cr 平均浓度皆超标,且分别在虎门镇、沙田镇和大岭山镇严重超标, Hg 和 Pb 的平均浓度均低于限值. PM_{10} 中重金属元素的季节分布与 PM_{10} 质量浓度的季节分布规律相似,大部分重金属表现出冬季浓度较高,春夏季浓度较低的特征.

(3) 富集因子法分析表明, Cr、Ni、V 主要来源于地壳, As、Co、Cu、Pb 和 Zn 来源于自然源和叠加的工业污染, Cd、Hg 和 Sb 的富集因子远大于 40, 受人为污染严重. Cd、Sb、Hg、Co 为极强污染, Pb、Zn 为轻度污染到强污染, Ni、Cr、Mn 和 V 属于未污染.

(4) 研究区 PM_{10} 中 Cd、Hg、As、Pb 的生态危害程度为极强, 其中 Cd 和 Hg 为极严重污染, 且对重金属潜在生态风险指数 RI 值贡献率最大.

参考文献:

- [1] Mohanraj R, Azeez P A, Priscilla T. Heavy metals in airborne particulate matter of urban Coimbatore [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2004, 47 (2): 162-167.
- [2] Deforest D K, Brix K V, Adams W J. Assessing metal bioaccumulation in aquatic environments; the inverse relationship between bioaccumulation factors, trophic transfer factors and exposure concentration [J]. Aquatic Toxicology, 2007, 84 (2): 236-246.
- [3] Rashdi S A, Arabi A A, Howari F M, et al. Distribution of heavy metals in the coastal area of Abu Dhabi in the United Arab Emirates [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 97 (1-2): 494-498.
- [4] 吴虹, 张彩艳, 王静, 等. 青岛环境空气 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染特征与来源比较 [J]. 环境科学研究, 2013, 26 (6): 583-589.
Wu H, Zhang C Y, Wang J, et al. Comparative study on pollution characteristics and source apportionment of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Qingdao [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26 (6): 583-589.
- [5] 范瑜, 邹塞. 徐州市春季 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 污染来源分析 [J]. 环境科技, 2014, 27 (2): 49-52.
Fan Y, Zou S. Analysis of the PM_{10} & $PM_{2.5}$ pollution sources of Xuzhou in spring [J]. Environmental Science and Technology, 2014, 27 (2): 49-52.
- [6] 黄娇, 张海龙, 李祥平, 等. 广州市冬季 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征与来源研究 [A]. 见: 中国环境科学学会. 2015 年中国环境科学学会学术年会论文集 (第二卷) [C]. 北京: 中国环境科学学会, 2015. 6.
- [7] 董婷, 李天昕, 赵秀阁, 等. 某焦化厂周边大气 PM_{10} 重金属

- 来源及健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1238-1244.
- Dong T, Li T X, Zhao X G, *et al.* Source and health risk assessment of heavy metals in ambient air PM₁₀ from one coking plant[J]. Environmental Science, 2014, **35**(4): 1238-1244.
- [8] 汤驰, 叶芝祥, 李再波, 等. 机场周边环境大气 PM₁₀ 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**(1): 77-79.
- [9] 姚青, 韩素芹, 蔡子颖. 天津采暖期大气 PM_{2.5} 中重金属元素污染及其生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(9): 1596-1600.
- Yao Q, Han S Q, Cai Z Y. The pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in PM_{2.5} during heating season in Tianjin[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(9): 1596-1600.
- [10] 温先华, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 大气颗粒物中重金属生态风险评价与源解析[J]. 广东微量元素科学, 2014, **21**(7): 11-19.
- Wen X H, Hu G R, Yu R L, *et al.* Ecological risk and source analysis of heavy metals in total suspended particulates [J]. Guangdong Trace Elements Science, 2014, **21**(7): 11-19.
- [11] 孙哲, 李金娟, 郭兴强, 等. 遵义市 PM₁₀ 中元素污染特征、来源与生态风险评价[J]. 环境监测管理与技术, 2014, **26**(3): 25-29.
- Sun Z, Li J J, Guo X Q, *et al.* Pollution characteristics, sources and ecological risk assessment of elements in PM₁₀ in Zunyi city [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2014, **26**(3): 25-29.
- [12] 周变红, 陈代妍, 孙洋. 宝鸡市高新区 PM₁₀ 中重金属元素的浓度水平及风险评价[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2016, **36**(1): 45-49.
- Zhou B H, Chen D Y, Sun Y. Concentration levels and risk assessment of heavy metals in PM₁₀ at high-tech zone of Baoji city [J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science), 2016, **36**(1): 45-49.
- [13] Zhai Y B, Liu X T, Chen H M, *et al.* Source identification and potential ecological risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} from Changsha [J]. Science of the Total Environment, 2014, **493**: 109-115.
- [14] 王淑兰, 张远航, 钟流举, 等. 珠江三角洲城市间空气污染的相互影响[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(2): 133-137.
- Wang S L, Zhang Y H, Zhong L J, *et al.* Interaction of urban air pollution among cities in Zhujiang delta [J]. China Environmental Science, 2005, **25**(2): 133-137.
- [15] 周丹. 东莞市大气环境污染来源分析与模拟研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2008.
- Zhou D. Study on atmospheric pollution source analysis and simulation of Dongguan city [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2008.
- [16] 周鼎. 广东某电镀厂搬迁场地土壤重金属健康风险评估与修复建议[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
- Zhou D. health risk assessment and remediation advice of soil heavy metals pollution in some relocated electroplating site of Guangdong [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014.
- [17] 庄大雪. 电镀企业产污环节分析与清洁生产方案制订探讨[J]. 中国高新技术企业, 2013, (7): 72-74.
- [18] Cancio J L, Castellano A V, Hernández M C, *et al.* Metallic species in atmospheric particulate matter in Las Palmas de Gran Canaria[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **160**(2-3): 521-528.
- [19] Shah M H, Shaheen N. Seasonal behaviours in elemental composition of atmospheric aerosols collected in Islamabad, Pakistan[J]. Atmospheric Research, 2010, **95**(2-3): 210-223.
- [20] Gu J X, Du S Y, Han D W, *et al.* Major chemical compositions, possible sources, and mass closure analysis of PM_{2.5} in Jinan, China[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2014, **7**(3): 251-262.
- [21] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [22] 李娟娟, 马金涛, 楚秀娟, 等. 应用地累积指数法和富集因子法对铜矿区土壤重金属污染的安全评价[J]. 中国安全科学学报, 2006, **16**(12): 135-139, 170.
- Li J J, Ma J T, Chu X J, *et al.* Application of index of geo-accumulation and enrichment factor in safety assessment of heavy-metalcontamination in soil of copper refining [J]. China Safety Science Journal, 2006, **16**(12): 135-139, 170.
- [23] 张静, 姬亚芹, 王伟, 等. 应用地累积指数评价鞍山市夏季 PM_{2.5} 中元素的污染[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(5): 2551-2556.
- Zhang J, Ji Y Q, Wang W, *et al.* Applying the geoaccumulation index to evaluate element pollution of PM_{2.5} in Anshan city during summer [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(5): 2551-2556.
- [24] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [25] 胡恭任, 戚红璐, 于瑞莲, 等. 大气降尘中重金属形态分析及生态风险评价[J]. 有色金属, 2011, **63**(2): 286-291.
- Hu G R, Qi H L, Yu R L, *et al.* Speciation analysis of heavy metal in atmospheric dust and ecological risk assessment [J]. Nonferrous Metals, 2011, **63**(2): 286-291.
- [26] 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.
- [27] 杨菊, 倪师军, 彭景. 成都市大气总悬浮颗粒物(TSP)和 PM₁₀ 中重金属含量及分布特征[J]. 环境化学, 2010, **29**(1): 143-144.
- [28] 祁国伟, 曹军骥, 卓里欣, 等. 杭州市空气中 PM₁₀ 的化学组成特征[J]. 环境化学, 2005, **24**(5): 603-608.
- Qi G W, Cao J J, Zhuo L X, *et al.* Chemical composition of PM₁₀ in Hangzhou atmosphere [J]. Environmental Chemistry, 2005, **24**(5): 603-608.
- [29] Park K, Dam H D. Characterization of metal aerosols in PM₁₀ from urban, industrial, and Asian dust sources [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **160**(1-4): 289-300.
- [30] Rossini P, Matteucci G, Guerzoni S. Atmospheric fall-out of metals around the Murano glass-making district (Venice, Italy)

- [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2010, **17**(1): 40-48.
- [31] 张春荣, 吴正龙, 姚春卉, 等. 青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2736-2741.
- Zhang C R, Wu Z L, Yao C H, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in atmospheric dust of Qingdao city [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2736-2741.
- [32] 赵委托. 东莞地区电镀厂重金属污染与风险评价研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.

欢迎订阅 2018 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行人,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):*Environmental Sciences*;剑桥科学文摘(CSA):*Pollution Abstracts*;剑桥科学文摘(CAS):*Life Sciences Abstracts*等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2018 年为大 16 开本,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorus Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNBf-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapigou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)