

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响	李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)
珠三角地区利用 PM _{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)
广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性	范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)
扬州市 PM _{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估	董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)
博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源	宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)
某集约化肉鸡饲养场 PM _{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征	刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)
水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响	胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)
滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献	任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)
基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)
湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响	余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)
异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险	李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 王荣, 沈吉 (614)
珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素	杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)
北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价	陈磊, 李蕾芳, 邱晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)
氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律	郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)
磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响	王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)
钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响	赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)
NH ₄ ⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响	郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)
3 种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较	吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)
硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制	代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 邵超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)
ZnTiO ₂ -TiO ₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)
高指数晶面 TiO ₂ 对铬的吸附及光催化去除	钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)
Fe ⁰ /海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B	张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)
不同滤料滤池启动期对铁锰离子的去除机制	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)
SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能	张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)
一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制	薛文静, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺处理高盐废水及膜污染分析	王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)
多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除	刘淑惠, 周伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)
微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程	刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)
从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水	窦文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)
夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法	宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)
硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性	于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)
乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性	毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)
DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性	杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建国, 张帆, 吕廷廷 (791)
间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷	赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)
ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行	韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)
进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响	都叶奇, 于德爽, 甄建国, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)
ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性	李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)
不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响	李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)
调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)
C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响	张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)
基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性	王杨, 朱斌, 童俊, 白晓慧 (853)
黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征	姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)
基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化	祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)
硝化作用对盐碱湿地 N ₂ O 排放的影响及其环境因子分析	杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)
长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N ₂ O 和 NO 排放的影响	聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)
地膜覆盖和施氮对菜地 N ₂ O 排放的影响	倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)
双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系	肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)
多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响	李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)
桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征	丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)
工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析	李峰, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)
膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响	林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)
缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征	陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)
复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献	张彦军, 郭胜利 (961)
不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征	王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓扬悟, 葛体达, 吴金水 (970)
宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价	张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)
生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响	周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)
污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响	袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)
热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜禽粪混合物料及其甲烷高值化条件	卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素

杜佳¹, 王永红^{1*}, 黄清辉², 戴琦², 杨远东¹

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 在珠江河口开展了16个站位同步采样和观测, 分析该河口不同区段悬浮物中6种重金属(Cr、Cu、Zn、Pb、As、Cd)含量的时空特征, 并结合同步的水文调查资料进行统计分析, 探讨其影响因素。结果表明, 珠江口重金属含量枯水季节高于洪水季节, 受流量、温度、粒度的影响; 河口段重金属含量低于远口段与“过滤器效应”有关, 主要是由枯水季节这两区段的盐度和含沙量差异导致的。运用富集系数和沉积物质量基准法对珠江口重金属进行评价。结果表明, 两种评价方法均显示重金属枯水季节危害强于洪水季节, As、Zn生态风险大, Cd、As、Zn污染严重, 远口段重金属污染程度高于河口段, 远口段北江Cu、Zn、As、Cd污染程度明显高于西江和东江, 分别为重度污染、严重~极重污染、严重污染、极重污染, 与上游矿区有关, 需要重点关注。河口段东四门和西四门的6种重金属污染程度相似, 虎门污染最严重, 与当地的工业发展有关。珠江口悬浮物中重金属来源与流域地质背景、工业以及矿区有关。

关键词: 珠江口; 时空变化; 重金属; 污染评价; 影响因素

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0625-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201807028

Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors

DU Jia¹, WANG Yong-hong^{1*}, HUANG Qing-hui², DAI Qi², YANG Yuan-dong¹

(1. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment of the Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Simultaneous sampling and observation were conducted at 16 stations in the Pearl River Estuary, and the temporal and spatial characteristics of the contents of six heavy metals (Cr, Cu, Zn, Pb, As, and Cd) were analyzed. The influencing factors of suspended particulate matter (SPM) were explored through the combined results of our statistical analyses. With the influence of discharge, temperature and particle size, the content of heavy metals in the dry season is higher than that in flood season. Regarding the estuary filter, the content of heavy metals in the estuary segment was lower than that in the far mouth segment, which was principally caused by the difference in salinity and sediment concentration between the two segments during the dry season. Both the sediment quality standard and enrichment factor methods were used to evaluate heavy metals. The results showed that the threat of heavy metals in the dry season was stronger than that in the flood season. As and Zn were more harmful to the ecological risk, while Cd, As, and Zn were the more abundant pollutants in the Pearl River Estuary. Heavy metal pollution was more severe in the far mouth segment. The degree of pollution for Cu, Zn, As, and Cd—which are classified as heavy pollution, severe to extremely heavy pollution, severe heavy pollution, and extremely heavy pollution, respectively—in the Beijiang River were higher compared to the Xijiang River and Dongjiang River. The pollution level of the six heavy metals in the four eastern outlets and four western outlets were similar, and the most serious pollution in Humen may be related to local industrial development. The source of heavy metals in SPM of the Pearl River Estuary is related to geological background, industry, and the mining area.

Key words: Pearl River Estuary; temporal and spatial variation; heavy metals; pollution assessment; influencing factors

悬浮物的比表面积大, 吸附重金属的能力较强, 一般悬浮颗粒物中的重金属含量明显高于海水和表层沉积物^[1], 但重金属在水体中不能被微生物降解, 其通过食物链的传递会引起生态与人体健康风险。珠江泥沙以悬移质为主^[2], 重金属入海通量低于长江, 但远高于中国境内其他河流^[3]。因此, 研究珠江悬浮物中的重金属含量特征对认识其重金属污染具有十分重要的科学意义。

对国内外河口和河流悬浮物中重金属的研究发现, 黄河下游颗粒态重金属含量冬季高于夏季的主要原因是颗粒物粒径和泥沙稀释^[4]; 长江口

颗粒态重金属的迁移转化受潮汐、溶解有机碳、含沙量等因素影响^[5]; Kali 河口悬浮物中重金属受到河流动力和区域地球化学等自然和人为的影响^[6]; Tinto 河口悬浮物中重金属的分配与酸性矿山的废水排放和河口潮汐循环有关^[7]。有关珠江口重金属的研究主要是在海水、土壤和表层沉积

收稿日期: 2018-07-04; 修订日期: 2018-08-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402602); 国家自然科学基金项目(41376054, 41176039, 41410304022)

作者简介: 杜佳(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为河口沉积与环境, E-mail: dujia@stu.ouc.edu.cn

* 通信作者, E-mail: yonghongw@ouc.edu.cn

物,较为系统地研究了珠江口重金属的迁移扩散和转化规律,阐明河口的化学净化过程^[8,9].但对珠江口悬浮物中重金属的研究较少,主要集中在河口过程^[10]、颗粒物-水分配系数^[11],对影响因素认识不足.

本文拟分析珠江口悬浮物中 Cr、Cu、Zn、As、Pb、Cd 含量的时空分布和污染状况,并利用数理统计分析其影响因素,以期对珠江河口重金属的污染防治提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

珠江是西江、北江、东江和珠江三角洲诸河的总称,是华南地区最重要的河流,其流量仅次于长江.珠江河口区包括绝大部分珠江三角洲平原及滨岸地区,从上游到下游方向可划分为远口段、近口段、河口段和口外海滨这 4 个区段.远口段介于枯季潮流界和洪季潮区界之间,洪季完全受河流动力控制^[12];河口段是河口的核心范围,是咸淡水交锋、混合的区域.

2016 年 11~12 月枯水季节(下文简称枯季)大潮和小潮期间,2017 年 7 月洪水季节(下文简称洪季)大潮和小潮期间,共计 4 个航次的调查取样.调查区域覆盖珠江下游河段的 16 个站位:远口段(马口、三水、三多、紫洞、天河、南华、石龙南、石龙北),河口段(虎门、蕉门、洪奇沥、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门、崖门).调查方法采用 16 条船的同步观测.每个航次均用 ADCP 获得 16 站位 24 h 的流量和流速数据;用 OBS 获得 16 站位 24 h 的温度、盐度数据.

所有站位选取洪季和枯季大小潮采样,每个潮期均采集涨潮和落潮 2 个样品,一次采集 25 L 水样,经 0.45 μm 孔径醋酸纤维滤膜过滤获得,每季节均获得大潮 32 个和小潮 32 个悬浮物样品,共计 128 个样品.128 个悬浮物样品中 Al、Cu、Cr、Zn 的含量采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES, Agilent 720ES, USA)测得;Pb、Cd、As 的含量采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS, Agilent 7700,

USA)测得.以大小潮期间 4 次取样的重金属含量的平均值作为该季节站位的代表值.在测定过程中,所有样品均平行试验 2 次,并用国家标准土样(GBW07309)进行回收试验,二次平行试验的相对偏差均在 5% 以内;标样 Al、Cr、Cu、Zn、As、Pb、Cd 的相对误差分别为 -0.32%、-1.47%、-0.52%、0.98%、-0.78%、0.24%、-0.55%,回收率分别为 101.76%、92.97%、101.32%、95.23%、93.56%、104.82%、97.11%.

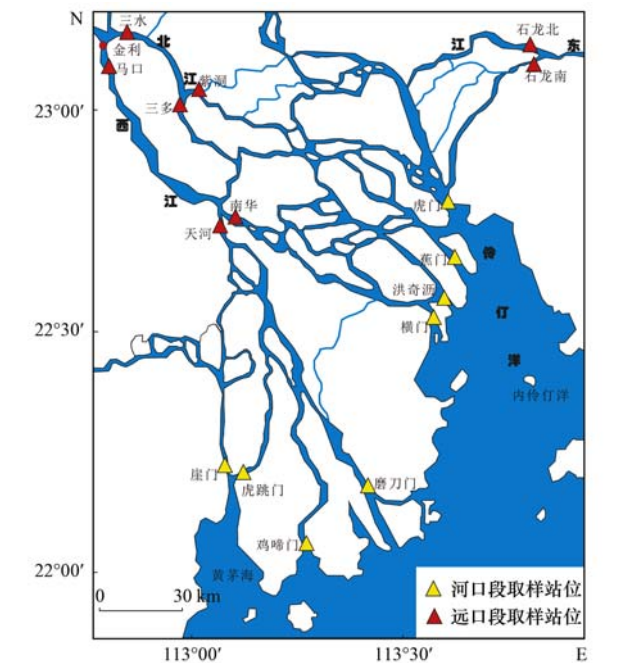


图 1 珠江河口悬浮物取样站位示意
Fig. 1 Map of the SPM sampling stations in the Pearl River Estuary

1.2 重金属评价方法

沉积物质量基准法以生物效应的数据库为基础,根据重金属生物毒性推断出两个基准值,用来评价重金属对底栖生物潜在的不利影响,是沉积物质量评价中一种较为普遍的方法^[13].本文选用中国香港水体沉积物质量基准值^[14](表 1),ISQV-low 是沉积物质量基准的低值,表示重金属对生物的负面效应基本不发生;ISQV-high 是沉积物质量基准的高值,表示重金属对生物的负面效应经常发生;当介于 ISQV-low 和 ISQV-high 之间,表示重金属对生物的负面效应偶尔发生.

表 1 中国香港水体的沉积物质量基准/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Table 1 Sediment quality standards for waters in Hong Kong, China/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

项目	As	Cd	Cu	Pb	Cr	Zn
ISQV-low	8.2	1.5	65	75	80	200
ISQV-high	70	9.6	270	218	370	410

富集系数(enrichment factor, EF),是评价人类活动对沉积物中重金属富集程度影响的重要参数^[15].为了减少试验过程中人为影响以及保证各

指标间的可比性,以参比元素为参考标准,对测试样品中元素进行归一化处理.本文选用性质稳定 Al 作为参比元素.其计算公式为:

$$EF = \frac{C_N}{C_{REF}} \cdot \frac{B_{REF}}{B_N}$$

式中, C_N 、 B_N 为某元素在测试区和参照区浓度, C_{REF} 、 B_{REF} 为参比元素在测试区和参照区浓度. 选用广东省土壤背景值^[16]作为参考值, 其 As、Cd、Cu、Pb、Cr、Zn 分别为 8.90、0.06、17.0、36.0、50.5、47.3 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 富集系数 (EF) 分级与污染程度的关系列于表 2.

1.3 数据处理方法

数据统计分析采用 SPSS 19.0 完成, 6 种重金属与环境因子数据经变换后均服从二元正态分布,

相关系数均为 Pearson 积矩相关系数.

2 结果与讨论

2.1 悬浮物中重金属含量的季节变化特征

2.1.1 重金属含量的季节变化

6 种重金属含量在洪季和枯季存在差异 ($P < 0.1$, Mann-Whitney), 枯季 Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 含量的平均值高于洪季(表 3), 其中, Zn 含量枯季是洪季的 1.87 倍, 6 种重金属在洪季和枯季的平均含量分别是 102 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 155 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 整体来看, 枯季重金属含量高于洪季.

表 2 富集系数 (EF) 的分级标准

Table 2 Index of geoaccumulation and classification of pollution degree						
EF	≤1	1~2	2~5	5~20	20~40	>40
污染程度	无	轻度	中度	重度	严重	极重

表 3 珠江河口悬浮物中重金属洪季和枯季的含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 3 Contents of heavy metals of SPM in the Pearl River Estuary in the flood and dry season/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$							
时期	项目	Cr	Cu	Zn	As	Pb	Cd
洪季 (n=64)	范围	54.6~244	30.6~679	77.4~597	65.4~113	46.7~352	0.63~1.98
	平均值	91.4	86.1	270	87.4	78.4	1.19
枯季 (n=64)	范围	52.1~317	50.4~272	168~2328	12.0~189	43.9~297	0.24~7.36
	平均值	129	108	505	62.1	126	1.48

与其他站位相比, 石龙南、石龙北、虎门站位的重金属含量季节差异性较小, 某些重金属含量甚至出现洪季高于枯季(图 2).

2.1.2 重金属含量季节变化的影响因素分析

流量和温度均具有非常显著的季节性差异 ($P < 0.004$, Mann-Whitney). 洪季 16 站位的流量是枯季的 1.92~6.80 倍, 在较大的径流作用下河床沉积物再悬浮: ①水体中悬浮物浓度增大, 对重金属稀释作用加强^[17]; ②较粗的沉积物质进入水体, 吸附重金属的能力减弱^[18]. 洪季 16 站位的温度比枯

季高 5℃ 以上, 较高的温度: ①有利于重金属的物理解吸, 悬浮物向水体释放更多重金属; ②促进了微生物繁殖, 微生物本身及其代谢产物都能吸附重金属. 这些原因是导致洪季悬浮物中重金属含量较低的重要因素.

粒径是影响颗粒态金属元素含量的重要因素之一^[19], Al 进行归一化, 消除粒度的影响减少自然过程对重金属含量的波动, 更好反映人类活动对重金属元素的贡献^[20]. 洪季重金属归一化处理后(图 3), 虎门和石龙南、石龙北、紫洞站位出现较大波

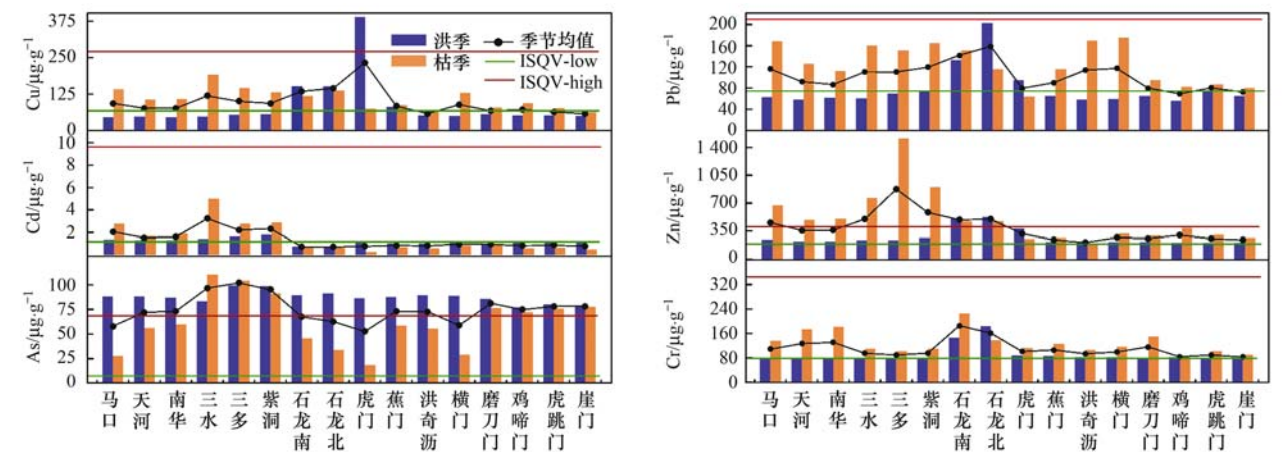


图 2 16 站位悬浮物中重金属含量的洪枯季比较以及香港的沉积物质量基准

Fig. 2 Heavy metal contents distribution of SPM at 16 stations in the flood and dry seasons, and sediment quality guideline of Hong Kong

动(图3虚线矩形框),归一化值季节差异小,部分重金属归一化值高于枯季,表明:石龙南、石龙北、虎门站位重金属含量高可能与东江沿线受一定人为因素影响有关;人为因素并非是影响紫洞重金属含量的主导因素,因为紫洞洪季重金属含量(图2)并未出现高值。

除去东江沿线站位和紫洞,洪季 Zn、Pb、Cu、As 的归一化值在珠江河口变化较小,表明受粒度影响较大。枯季除 Zn 以外,其他重金属归一化值变化较大,可能因为其含量已经超过背景值,受较大人为污染的影响。

2.2 悬浮物中重金属含量的空间变化特征

2.2.1 重金属含量在远口段和河口段的分布

Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 含量在远口段和河口段存在差异($P < 0.1$, Mann-Whitney),远口段6种重金属含量的平均值均高于河口段(表4),其中Cd含量远口段是河口段的2.08倍,6种重金属在远口段和河口段的平均含量分别是 $136 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $101 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。整体来看,远口段的重金属含量高于河口段。

表4 珠江河口悬浮物中重金属远口段和河口段的含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 4 Contents of heavy metals of SPM in Pearl River Estuary of estuary segment and far mouth segment/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$							
区段	项目	Cr	Cu	Zn	As	Pb	Cd
远口段($n=8$)	范围	89.5~185	76.3~144	356~875	58.0~101	96.9~158	0.73~3.23
	平均值	124	104	515	78.3	117	1.81
河口段($n=8$)	范围	82.7~116	56.3~232	208~316	52.6~81.1	72.6~117	0.78~0.98
	平均值	96.5	90.4	260	71.2	87.9	0.87

远口段东江、西江、北江重金属含量的平均值 $\pm$ 标准差分布如图4(a)所示。西江、北江、东江的重金

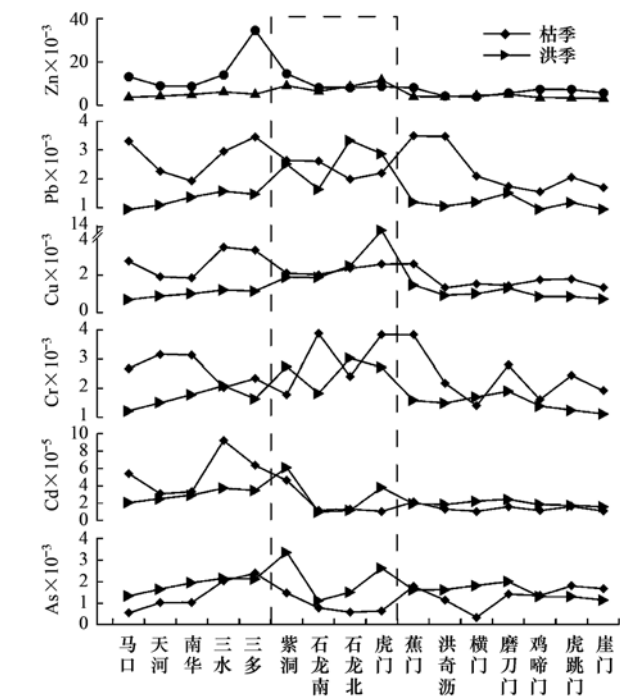
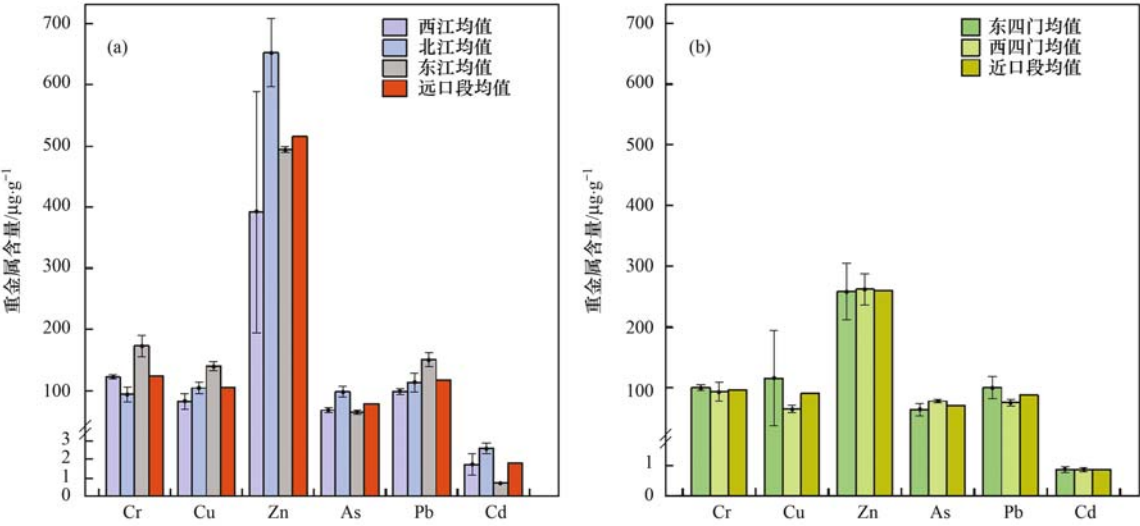


图3 16 站悬浮物中重金属经 Al 归一化的折线图

Fig. 3 Line chart of heavy metals normalized by aluminum of SPM at 16 stations

属平均含量相差较大,其中北江的 Cd、Zn、As 含量较高,分别是 (2.59 ± 0.28) 、 (652 ± 56.3) 、 $(97.8 \pm$



误差棒代表 ± 1 个标准差

图4 重金属在珠江口东江、西江、北江和东四门、西四门的空

Fig. 4 Spatial variation in heavy metals in four eastern and western outlets of the Pearl River Estuary as well as in the Dongjiang River, Xijiang River, and Beijiang River

8.45) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 东江 Cr、Cu、Pb 含量较高, 分别是 (173 ± 17.2) 、 (139 ± 7.06) 、 $(150 \pm 11.8) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

河口段东四门、西四门重金属含量的平均值 $\pm$ 标准差分布如图 4(b) 所示。东四门和西四门中 Cr、Zn、As、Pb、Cd 的平均含量相近, 但 Cu 含量相差很大, 分别是 $(115 \pm 79.1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $(65.1 \pm 6.65) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

2.2.2 重金属含量在远口段和河口段分布的影响因素分析

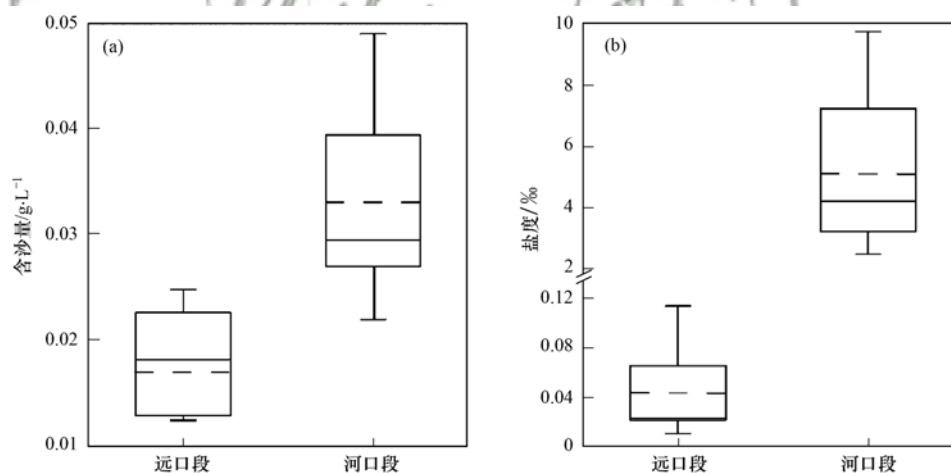
珠江河口段重金属含量低与“过滤器效应”^[21] 相关。马口和金利相距约 10 km (图 1), 将金利、磨刀门沉积物^[9] 中重金属的季节均值数据对应于马口、磨刀门悬浮物中的季节均值数据 (表 5), 发现马口悬浮物、磨刀门沉积物中重金属的含量较高, 表明河流携带的绝大部分重金属随着悬浮物在口门转化沉积。

具体来看, 洪季 Cr、Cu、As、Pb、Cd 在远口段

和河口段的重金属含量差异性小 ($P > 0.05$, Mann-Whitney), 除去东江沿线站位, 其他站位重金属含量相差不大 (图 2), 因而, 重金属含量呈现河口段低于远口段, 主要是枯季这两区段重金属差异导致的。枯季河口段和远口段盐度的取值范围分别为 3‰ ~ 9.73‰ 和 0 ~ 1‰, 一般来说, 在咸淡水混合的河口地区, 盐度是影响金属含量的首要因素^[8], 研究发现枯季河口段的 Cu、Pb、Cd 含量与盐度呈现显著的负相关关系 (r 为 $-0.59 \sim -0.76$, $P < 0.05$), 远口段由于基本为淡水, 盐度变化几乎可以忽略, 因此重金属和盐度无相关性。因而, 河口段重金属含量低, 主要因为: ①在适宜的盐度条件下发生絮凝, 且含沙量较高 [图 5(a)], 颗粒碰撞几率大, 颗粒物絮凝沉降速度大^[22]; ②盐度较高 [图 5(b)], Cl^- 对重金属的络合作用增强, 加之水中的阳离子对悬浮物表面结合位置的竞争较强。

表 5 磨刀门和西江河段站位的悬浮物和沉积物中重金属含量的对比/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

站位	项目	Cr	Cu	Zn	As	Pb	Cd	文献
金利	沉积物	47.1	22.4	636	41.7	81.8	0.84	[9]
马口	悬浮物	108	93.2	456	58.0	115	2.06	本研究
磨刀门	沉积物	59.5	69.5	613	133	101	7.44	[9]
磨刀门	悬浮物	116	67.4	257	81.6	80.0	0.96	本研究



箱体中间的水平实线代表中位数, 水平虚线代表平均值, 箱体的边缘代表第 25% 和 75% 的数据

图 5 箱形图展示枯季远口段和河口段盐度和含沙量的数据分布

Fig. 5 Whisker box plot display salinity and sediment concentration of estuary segment and far mouth segment in dry season

本研究发现, 洪季远口段的 Cr、Cu、Zn、Pb 与径流量呈现显著负相关关系 (r 为 $-0.51 \sim -0.89$, $P < 0.05$), 与流速呈现显著负相关关系 (r 为 $-0.53 \sim -0.84$, $P < 0.05$), 河口段重金属含量与径流量和流速的相关关系弱。洪季大潮期正逢西江 1 号洪水, 西江、北江流量均为五年一遇, 较大的径流冲刷促使远口段富集的重金属重新释放到水体中。此外, 泥沙既能对重金属浓度有稀释作用, 又能吸附水体中的重金属促进其富集^[4], 远口段和河

口段 Cr、Pb、Cd 与含沙量呈现显著负相关关系 (r 为 $-0.51 \sim -0.89$, $P < 0.05$), 表明洪季泥沙的稀释作用较为明显。综上, 较强的流量和流速对远口段重金属的冲刷是导致珠江河口重金属含量较为相近的主要原因。

2.3 重金属风险与污染评价

2.3.1 重金属风险评价

Cu、Pb、Zn、Cr 洪季含量多处于 ISQV-low 附近或以下, 枯季大多处于 ISQV-low 和 ISQV-high 之

间,部分站位 Zn 含量在 ISQV-high 以上(图 2),说明枯季生态危害较高。

就季节均值(图 2)而言,As、Zn 生态危害最高,68.75%的站位 As 含量超过 ISQV-high,远口段 75%的站位 Zn 含量超过 ISQV-high. Cu、Pb、Cr 的含量多处于 ISQV-low 和 ISQV-high 之间,重金属对生物负面效应偶尔发生;Cd 的生态危害最轻,62.5%的站位 Cd 含量均位于 ISQV-low 之下,重金属对生物负面效应基本不发生。

2.3.2 重金属污染评价

枯季 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 的 EF 值高于洪季[图 6(a)],分别是洪季的 1.25、1.73、2.07、1.53、1.21 倍,说明枯季污染较高。

16 站位的富集系数(EF)表明:珠江河口的 6 种重金属都处于污染水平,但污染程度不同[图 6(b)]. 平均富集系数呈现 $Cd(41.7) > As(15.8) > Zn(15.2) > Cu(10.1) > Pb(5.16) > Cr(3.99)$,珠江河口 Cd 污染最为严重,枯季 Cd 的污染水平最高,其 EF 的取值从 13.2(虎门)到 132(三水),对应的分别是重度污染和极重污染. As、Zn、Cu、Pb 均为重度污染,其中 As 和 Zn 污染较为严重;Cr 污染最轻微为中度污染。

远口段各站位重金属归一化后的平均值为 2.98×10^{-3} ,高于河口段 2.17×10^{-3} ,可见远口段

重金属受人为影响更大,西江、北江上游采矿和有色金属冶炼业发达,远口段重金属污染程度较高(图 7)与接纳上游较严重的人为污染有关. 据报道,某矿区河流沉积物中 Cd 含量为 $50 \sim 250 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,即使在离矿区 23 km 远的下游沉积物中 Cd 含量仍高达 $153 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ [23];某有色金属冶炼厂土壤中绝大部分重金属含量远高于土壤背景值,其中 Cd、Cu 含量分别高达背景值的 478、25 倍[24]. 此外,河口段受人为影响较小,加之“过滤器”效应的影响,重金属污染较轻。

远口段东江、西江、北江的重金属污染分布如图 7(a)所示. 西江和北江的 Cd 污染最为突出,主要因为:①西江、北江土壤 Cd 的污染深度与高含量地质体的沉积厚度一致[25],Cd 污染受地质背景影响;②西江、北江上游的南岭成矿带盛产铅锌矿,铅锌矿是富集 Cd 元素最常见的矿床[26]. 北江的 Cu、Zn、As、Cd 污染程度明显高于西江和东江($P < 0.1$, ANOVA),分别为重度污染、严重~极重污染、严重污染、极重污染,其中 As 和 Cd 最明显($P < 0.01$). 造成北江重金属污染特别是 Cd 污染最为严重的原因与北江上游韶关冶炼厂曾发生大型 Cd 污染废水事件,以及矿区重金属污染较为常见[27],北江分布有全国大型凡口铅锌矿、乐昌铅锌矿、大宝山矿有关. 东江的 Cr、Cu 污染程度与西江、北江差异性显著($P < 0.1$, ANOVA),为重度污染,其污染与沿线的电镀业有关. 东江流经惠州、东莞等制造业基地,接纳深圳部分河流水体. 2002 年广东省中山、东莞、深圳、广州电镀企业年废水排放量占全省工业废水排放总量的 67.8%[28],Cr、Cu、Pb、Mn、Zn 均为电镀行业使用最为广泛的金属,虽然近年来广东省整治东江电镀行业的发展,但重金属污染具有持久性和不可分解性,重金属污染依旧存在. 西江、北江、东江的 Pb 污染程度差异性小($P > 0.1$, ANOVA),为中度~重度污染。

河口段东四门和西四门的重金属污染分布如图 7(b)所示. 6 种重金属的污染程度在东四门和西四门差异较小($P > 0.1$, Mann-Whitney). 虎门是污染最严重的口门,虎门镇是广东省的经济重镇,2016 年的工业生产总值在东莞市 33 个镇街中位列第 4[29],工业发展产生的废水排放会对重金属污染有较大影响. 珠江“三江汇合,八口分流”,虎门 Cu 污染最突出,为严重污染,污染程度是远口段 8 个站位的 2.22~4.45 倍,河口段 7 个站位的 3.17~5.16 倍,说明上游测站对 Cu 输入较小,主要来源于当地人为活动:①服饰业至今仍为第一大产业,印染是其产业链条上重要的一环,而 Cu 化合物是

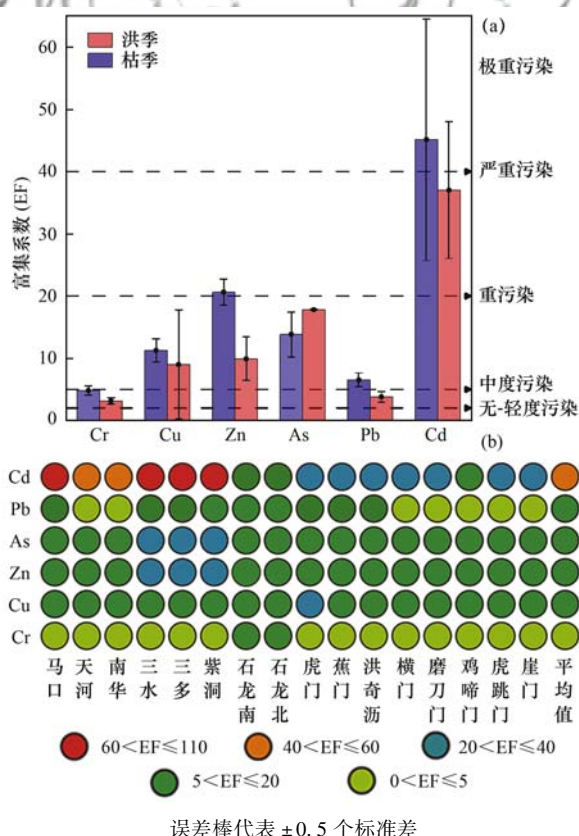


图 6 悬浮物中的重金属富集系数(EF)的季节和空间变化

Fig. 6 EF of heavy metals in SPM of seasonal and spatial variations

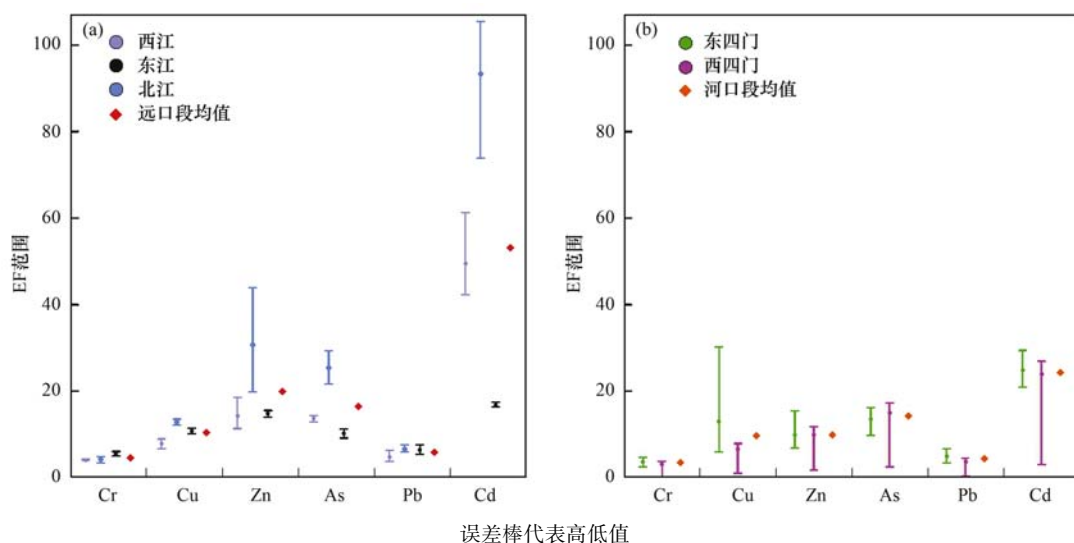


图7 富集系数(EF)在珠江口东江、西江、北江和东四门、西四门的分布

Fig. 7 Spatial distribution of EF in four eastern and western outlets of the Pearl River Estuary as well as the Dongjiang River, Xijiang River, and Beijiang River

一种较为普遍的重金属络合染料成分;②电镀行业历史悠久,镀铜工艺在电镀行业中应用较广,据报道,虎门镇电镀厂周围地表水Cu浓度远高于As、Cr、Cd、Hg、Pb等重金属的浓度^[30],说明电镀业是Cu的重要来源。

3 结论

(1)洪季悬浮物重金属(As除外)的含量低于枯季,主要受到温度、径流量、粒度的影响,其中洪季虎门和石龙南、石龙北站位,重金属季节差异性较小,甚至部分重金属含量高于枯季,可能与东江沿线人为影响有关。除Zn以外,枯季重金属一定程度上受人为影响。

(2)河口段重金属含量低于远口段主要是由枯季这两区段重金属含量差异导致的。一方面,洪季含沙量对两区段的重金属均有稀释作用,但远口段站位受到径流量、流速影响较大,富集的重金属得到释放,而河口段受到的冲刷较弱,各种因素综合导致两区段重金属含量相差不大。另一方面,两区段枯季盐度和含沙量的差异,是河口段重金属含量低于远口段的重要因素。

(3)沉积物质量基准法表明:As、Zn生态风险危害较大。富集系数法表明: Cd、As、Zn污染较严重。远口段西江和北江Cd污染程度最为突出,为极重污染,与其地质背景和矿区污染有关;东江的Cr、Cu、Pb污染严重与其电镀业有关。河口段东四门和西四门重金属污染程度较为相似,虎门是污染最为严重的口门,Cu污染与当地印染和电镀产业发展有关。

致谢:感谢李梦君、傅珍珍、马芳芳、陶建丽、

张勇、肖春辉、王兴、向亚武、袁晓东、常继强、张孟秋等对本文的帮助。

参考文献:

- [1] Ma Y Q, Qin Y W, Zheng B H, *et al.* Seasonal variation of enrichment, accumulation and sources of heavy metals in suspended particulate matter and surface sediments in the Daliao river and Daliao river estuary, Northeast China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(9): 5107-5117.
- [2] 罗宪林, 杨清书, 贾良文, 等. 珠江三角洲网河河床演变[M]. 广州: 中山大学出版社, 2002.
- [3] Luo X L, Yang Q S, Jia L W, *et al.* River-bed evolution of the pearl river delta[M]. Guangzhou: Sux Yat-Sex University Press, 2002.
- [4] 国家统计局环境保护部. 中国环境统计年鉴-2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [5] National Bureau of Statistics Ministry of Environmental Protection. China statistical yearbook on environment-2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [6] 辛成林, 任景玲, 张桂玲, 等. 黄河下游水体悬浮颗粒物中金属元素的地球化学行为[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(10): 3127-3134.
- [7] Xin C L, Ren J L, Zhang G L, *et al.* Geochemistry of metals in the suspended particles in the lower reach of the Huanghe[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(10): 3127-3134.
- [8] Feng C H, Guo X Y, Yin S, *et al.* Heavy metal partitioning of suspended particulate matter-water and sediment-water in the Yangtze Estuary[J]. *Chemosphere*, 2017, **185**: 717-725.
- [9] Suja S, Kessarkar P M, Fernandes L L, *et al.* Spatial and temporal distribution of metals in suspended particulate matter of the Kali estuary, India [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, **196**: 10-21.
- [10] Hierro A, Olías M, Cánovas C R, *et al.* Trace metal partitioning over a tidal cycle in an estuary affected by acid mine drainage (Tinto estuary, SW Spain) [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **497-498**: 18-28.
- [11] 宋美英. 珠江河口水体和沉积物中重金属的分布特征及风险评估[D]. 广州: 暨南大学, 2014.
- [12] Song M Y. Distribution and assessment of heavy metals in water

- and sediments of the Pearl River Estuary[D]. Guangzhou: Jinan University, 2014.
- [9] 谢文平, 王少冰, 朱新平, 等. 珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 1808-1815.
- Xie W P, Wang S B, Zhu X P, *et al.* Residues and potential ecological risk assessment of metal in sediments from lower reaches and estuary of Pearl River[J]. Environmental Science, 2012, **33**(6): 1808-1815.
- [10] 张亚南, 贺青, 陈金民, 等. 珠江口及其邻近海域重金属的河口过程和沉积物污染风险评价[J]. 海洋学报, 2013, **35**(2): 178-186.
- Zhang Y N, He Q, Chen J M, *et al.* Heavy metals' process in water and pollution risk assessment in surface sediments of the Zhujiang River Estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, **35**(2): 178-186.
- [11] 龚剑, 李烨, 黄静文, 等. 珠江广州-东莞河段重金属污染状况及分布特征[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2017, **16**(4): 78-82.
- Gong J, Li Y, Huang J W, *et al.* Heavy metal pollution and its spatial distribution in the Guangzhou-Dongguan reach of the Pearl River[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2017, **16**(4): 78-82.
- [12] 李春初. 中国南方河口过程与演变规律[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [13] 刘成, 王兆印, 何耘. 水体沉积泥沙质量标准之探讨[J]. 泥沙研究, 2005, (2): 54-60.
- Liu C, Wang Z Y, He Y. Discussion on sediment quality standards in waters[J]. Journal of Sediment Research, 2005, (2): 54-60.
- [14] Chapman P M, Allard P J, Vigers G A. Development of sediment quality values for Hong Kong special administrative region: a possible model for other jurisdictions [J]. Marine Pollution Bulletin, 1999, **38**(3): 161-169.
- [15] Kessarkar P M, Shynu R, Rao V P, *et al.* Geochemistry of the suspended sediment in the estuaries of the Mandovi and Zuari rivers, central west coast of India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, **185**(5): 4461-4480.
- [16] 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. 331-379.
- [17] 付小明, 任景玲, 辛成林, 等. 调水调沙对黄河口颗粒态金属分布的影响[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(5): 1867-1877.
- Fu X M, Ren J L, Xin C L, *et al.* Impacts of water-sediment regulation event on the distributions of particulate metals in the Huanghe (Yellow River) estuary [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(5): 1867-1877.
- [18] 辛成林, 任景玲, 张桂玲, 等. 海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1315-1323.
- Xin C L, Ren J L, Zhang G L, *et al.* Distributions and pollution status of heavy metals in the suspended particles of the estuaries and coastal area of eastern Hainan[J]. Environmental Science, 2013, **34**(4): 1315-1323.
- [19] 王洪波. 长江口颗粒态金属元素分布特征及其影响因素的探究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- Wang H B. The study on the distribution characteristics and controlling factors of particulate metal elements in the Changjiang Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.
- [20] Din Z B. Use of aluminium to normalize heavy-metal data from estuarine and coastal sediments of Straits of Melaka[J]. Marine Pollution Bulletin, 1992, **24**(10): 484-491.
- [21] Boicourt W C. The estuary as a filter: physical processes [J]. Estuaries, 1983, **6**(3): 252-337.
- [22] 陈文彪, 陈上群. 珠江河口治理开发研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [23] 李航, 肖唐付, 双燕, 等. 云南金顶超大型铅锌矿区镉的水地球化学研究[J]. 地球化学, 2007, **36**(6): 612-620.
- Li H, Xiao T F, Shuang Y, *et al.* Hydrogeochemistry of cadmium in Jinding Pb-Zn mining district in Yunnan, China[J]. Geochimica, 2007, **36**(6): 612-620.
- [24] 许大毛, 张家泉, 占长林, 等. 有色金属冶炼厂周边地表水和农业土壤中重金属污染特征与评价[J]. 环境化学, 2016, **35**(11): 2305-2314.
- Xu D M, Zhang J Q, Zhan C L, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water and agricultural soil around the Nonferrous Metal Smelter [J]. Environmental Chemistry, 2016, **35**(11): 2305-2314.
- [25] 赖启宏. 珠江三角洲多目标区域地球化学生态环境评价[D]. 广州: 中国科学院广州地化研究所, 2005.
- Lai Q H. Multi-goal regional geochemical assessment of ecological environment in Pearl River Delta of Guangdong province[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [26] 许振成, 杨晓云, 温勇, 等. 北江中上游底泥重金属污染及其潜在生态危害评价[J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3262-3268.
- Xu Z C, Yang X Y, Wen Y, *et al.* Evaluation of the heavy metals contamination and its potential ecological risk of the sediments in Beijiang river's upper and middle reaches [J]. Environmental Science, 2009, **30**(11): 3262-3268.
- [27] 吴劲楠, 龙健, 刘灵飞, 等. 某铅锌矿区农田重金属分布特征及其风险评价[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(3): 1054-1063.
- Wu J N, Long J, Liu L F, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of a lead-zinc mining area[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(3): 1054-1063.
- [28] 袁国伟. 广东省电镀和清洁生产概况[A]. 见: 2009 穗港澳科技·产业(腐蚀防护)发展论坛论文集[C]. 广州: 中国腐蚀防护学会, 广州腐蚀防护学会, 2009. 25-29.
- [29] 广东省统计局. 广东统计年鉴-2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- Guangdong Provincial Bureau of Statistics. Guangdong statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [30] 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 等. 电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 993-1001.
- Yu C C, Zhao W T, Gao X F, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water around electroplating factories [J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 993-1001.

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> (532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> (540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaohe City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> (558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> (567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> (573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> (603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> (625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> (633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> (658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> (669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> (677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> (685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> (701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> (724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Juan, <i>et al.</i> (730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> (738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> (747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> (754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> (761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> (783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> (791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> (799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> (816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> (823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrosation System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> (845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> (853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> (859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> (869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> (876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> (885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> (904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> (915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> (934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> (945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> (953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> (978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> (987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> (994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1003)