

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



2020

Vol.41 No.7  
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响 ..... 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)

华北地区大气细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应 ..... 杨伟, 姜晓丽 (2995)

郑州市民运会期间大气PM<sub>2.5</sub>改善效果评估 ..... 王申博, 娄亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)

成都夏冬季PM<sub>2.5</sub>中水溶性无机离子污染特征 ..... 冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)

川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析 ..... 雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)

四川省典型行业挥发性有机物源成分谱 ..... 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)

成都市工业挥发性有机物排源成分谱 ..... 周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)

郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估 ..... 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)

阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响 ..... 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)

典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性 ..... 景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)

华北地区典型重工业城市夏季近地面O<sub>3</sub>污染特征及敏感性 ..... 欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)

稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性 ..... 顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运震 (3095)

苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析 ..... 卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)

轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征 ..... 谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日起, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)

非超低与超低排放煤电机组启动过程NO<sub>x</sub>排放特征对比分析 ..... 李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)

邢台市道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别 ..... 宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)

叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响 ..... 魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)

关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源 ..... 赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)

岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析 ..... 田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)

木沥河流域氮素污染及其污染源解析 ..... 齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)

辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析 ..... 齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)

鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应 ..... 王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾璐杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)

象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析 ..... 王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)

乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献 ..... 张慧, 王世亮, 余杨 (3204)

连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征 ..... 李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)

茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险 ..... 吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)

金盆水库沉积物铁锰释放规律 ..... 路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)

城市湖泊沉积物微塑料污染特征 ..... 王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)

西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析 ..... 刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)

海水中的红霉素与营养盐对微藻的复合影响 ..... 王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)

梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律 ..... 温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)

宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析 ..... 徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)

分层型水库藻类垂向演替的水质与细菌种群调控 ..... 闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾竞宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)

长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响 ..... 毕薇薇, 叶胜, 于健全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)

供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型 ..... 刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)

碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制 ..... 崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)

弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe<sup>0</sup>/WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制 ..... 计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)

一硫代砷在针铁矿上的吸附及影响因素 ..... 廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)

生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征 ..... 王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)

低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响 ..... 张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)

羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响 ..... 邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)

低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性 ..... 高春娣, 张娜, 韩徽, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)

我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化 ..... 董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)

城镇河流CO<sub>2</sub>及CH<sub>4</sub>排放与市政排水管网污水输入的关联影响 ..... 李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)

控释尿素对黄河故道沙性潮土N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)

我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放 ..... 张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)

不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异 ..... 黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)

锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响 ..... 孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)

钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响 ..... 曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)

叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响 ..... 杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)

《环境科学》征订启事 (3011) 《环境科学》征稿简则 (3084) 信息 (3174, 3185, 3391)

# 象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析

王磊<sup>1</sup>, 汪文东<sup>2,3</sup>, 刘懂<sup>2,3</sup>, 李刚<sup>2,3\*</sup>, 于红梅<sup>1\*</sup>, 黄沙<sup>4</sup>, 徐耀阳<sup>2,3</sup>

(1. 浙江师范大学地理与环境科学学院, 金华 321001; 2. 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021; 3. 中国科学院宁波城市环境观测研究站, 宁波 315800; 4. 上海师范大学环境与地理科学学院, 上海 200234)

**摘要:** 本文根据丰水期象山港8种溶解态重金属的浓度调查, 通过单因子污染指数( $P_i$ )、内梅罗综合污染指数( $P_n$ )和重金属污染指数(HPI)评价方法研究了重金属流域内入湾河流中重金属的污染. 基于流域内土地利用类型与重金属浓度的相关性, 结合实地走访调查, 对重金属的来源进行了解析. 结果表明, 区域内重金属平均浓度大小表现为:  $Fe > Mn > Zn > Cu > As > Cr > Pb > Cd$ ; 除 Mn 和 Fe 外, 其余6种重金属浓度均符合《地表水环境质量标准》中的 I 类水标准; 区域内重金属风险较低, 无污染现象, 但存在沾污情况; 以水产养殖为代表的农业面源污染是区域内重金属出现沾污的主要因素. 为了合理规避区域内城镇化发展进程中的重金属风险, 重点在于加强以农业面源为主的污染源监管.

**关键词:** 象山港流域; 风险评价; 来源解析; 溶解态重金属; 土地利用

中图分类号: X522; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3194-10 DOI: 10.13227/j.hjx.201910169

## Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed

WANG Lei<sup>1</sup>, WANG Wen-dong<sup>2,3</sup>, LIU Dong<sup>2,3</sup>, LI Gang<sup>2,3\*</sup>, YU Hong-mei<sup>1\*</sup>, HUANG Sha<sup>4</sup>, XU Yao-yang<sup>2,3</sup>

(1. College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321001, China; 2. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 3. Ningbo Research Center for Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315800, China; 4. School of Environment and Geographical Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234 China)

**Abstract:** Based on the survey data of eight kinds of heavy metals in the Xiangshan Bay watershed during the flood season, the pollution status of heavy metals in water was analyzed. The potential ecological risks of heavy metals were evaluated based on the single factor pollution index ( $P_i$ ), the Nemeru comprehensive pollution index ( $P_n$ ), and the heavy metal pollution index (HPI). Based on the correlation between land-use types and heavy metal concentrations, the sources of heavy metals were analyzed. The results show that the average concentration of heavy metals is in the order  $Fe > Mn > Zn > Cu > As > Cr > Pb > Cd$ . All heavy metal concentrations, except those of Mn and Fe, conform to the class I surface water environment quality standard. The risk level of heavy metals is low, and there is no pollution, but some contamination. Agricultural non-point source pollution is the main factor in the contamination of heavy metals. Overall, the heavy metals in the region have not reached the risk threshold. To reasonably avoid the risk of heavy metal pollution in the urban development process, it is important to strengthen the supervision of pollution sources based on agricultural non-point sources.

**Key words:** Xiangshan Bay watershed; risk assessment; source analysis; dissolved heavy metal; land-use

在流域生态研究中, 重金属是指不可降解且有毒性的物质, 具有隐蔽性强, 危害时间持久, 消除难度大的特点<sup>[1]</sup>. 水体中重金属按照赋存形态可以分成溶解态和颗粒态(悬浮态和沉积态)<sup>[2]</sup>, 而溶解态既是重金属在水体中的主要迁移形式, 又会对下游的生态系统产生重要的影响<sup>[3]</sup>, 因此了解水体中溶解态重金属的环境行为能更好地认识水体中重金属的环境效应.

在持续的人为压力下流域内重金属浓度高于背景值且污染来源复杂<sup>[4-7]</sup>, 不同的土地利用类型与流域内水质和水量之间存在着密切关系<sup>[8,9]</sup>. 近年来, 国内外学者对不同流域内重金属风险<sup>[10-15]</sup>、污染特征<sup>[16,17]</sup>、积累效应<sup>[18,19]</sup>和来源解析<sup>[20-22]</sup>, 不同

土地利用类型下重金属的时空分布<sup>[23-27]</sup>、迁移转化与驱动机制<sup>[28,29]</sup>, 水生态过程的演化机制与模型<sup>[30]</sup>, 景观生态效应与流域内重金属的关系<sup>[31,32]</sup>等方面进行了大量的研究. 证明了流域内重金属存在不同程度风险、点源面源共同作用、生物富集和人为源为主导的现象; 土地利用类型的变化是流域重金属时空分布、迁移转化的主导因素之一; 降水、气候和水文特征驱动着重金属的动态变化; 流域重金属受平均斑块规模、破碎化程度、聚集化程度和景观形

收稿日期: 2019-10-23; 修订日期: 2020-02-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFE0119000)

作者简介: 王磊(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市水环境与流域生态, E-mail: ashu0705@foxmail.com

\* 通信作者, E-mail: gli@iue.ac.cn; yuhongmei@zjnu.cn

状复杂度影响.但以海湾流域为视角,流域内土地利用对重金属的来源解析与风险评价仍然较少,且现有的研究分析仍以湖泊和江河为主<sup>[33,34]</sup>,方法主要为相关性分析.

近年来,以象山港为依托的农业、工业和旅游业得到迅速发展,港区内土地利用格局发生改变<sup>[35]</sup>.这些变化对象山港地区的自然地球化学以及化学元素的迁移转化产生了巨大的影响<sup>[36]</sup>.城镇化改变土地利用格局<sup>[37]</sup>加剧海湾景观演变的复杂性,景观格局变化引起的海侵海退致使成土母质的化学元素不断迁移释放到水体中;不透水面的变化对径流产生影响,降低水体自净能力,并将不透水面表面的颗粒冲刷到流域内的水生系统中,最终影响流域的化学循环<sup>[38]</sup>;工业活动产生的废水废气废渣,农业耕作中大量施用的农药化肥,旅游业经营中产生的重金属污染物慢慢渗入环境介质中,通过渗透、径流和搬运等多种方式危及流域内地表水环境<sup>[39]</sup>.

港区各流域内的河流集饮水、灌溉、养殖、航运、调节气候和维持生态平衡的作用于一身<sup>[38]</sup>,对象山港具有极其重要的地位.象山港的丰水期较长为4~10月<sup>[40]</sup>,且在丰水期内流域内养殖、林业、工业和旅游等经济活动活跃.本文以宁波象山港入海口为研究对象,在象山港丰水期对流域污染河流8种溶解态重金属Cr、Mn、Fe、Cu、Zn、As、Cd和Pb的污染现状开展了调查与分析,通过单因子污染指数( $P_i$ )、内梅罗综合污染指数( $P_n$ )和重金属污染指数(HPI)评价方法对象山港流域内溶解态重金属风险进行评估,结合每个流域的土地利用方式进行水体中溶解态重金属的来源解析,区分流域内重金属的来源,恶化程度,有利于准确判定污染源对污染进

行及时修复,保护流域内生态环境并使其得到良性发展.

## 1 材料与方法

### 1.1 流域特征和采样点布置

象山港地处浙江北部,北部毗邻杭州湾,东侧紧靠舟山群岛,南部邻近三门湾,是一个由东北向西南深入内陆的条带状半封闭式深水避风港湾(29°24'~29°46' N, 121°25'~122°00' E,图1).海岸线曲折<sup>[41]</sup>,全长291 km;海域辽阔,海域面积约为920.87 km<sup>2</sup>.象山港流域内河流具有河网密、源头近、流程短和流量小的特点<sup>[42]</sup>,港湾内以发展临港经济为主,人类活动对港湾内河流影响巨大<sup>[43]</sup>.象山港流域地形特征与其他港湾性流域相似<sup>[44]</sup>,主要由低山、山前岗和平原组成,发育众多河流.

本文研究的象山港流域,是以象山港周边的北仑、鄞州、奉化、宁海和象山这5个县区的23个乡镇内地表水最终汇入港湾的陆域部分.它具有典型港湾地区特点,发育众多河流,据实地统计有52条入海河流<sup>[45]</sup>.流域气候类型属于亚热带季风气候,温暖湿润,无霜期年平均约248 d,年平均气温为16~17℃,年平均降水量1400 mm以上.流域内具有丰富的林业资源、海水养殖资源、生态环境资源、旅游休闲资源和港口资源,是宁波市重要的经济增长地区<sup>[44]</sup>.近年来象山港产业结构转型迅速,打造生态型港区,大力发展旅游业,规划五处休闲度假旅游区.

本次采样时间为2018年9月中旬,持续时间为1个月.根据象山港的水位特征,在象山港丰水期时,陆相一侧进行广谱式采样,采集港内所有入湾河

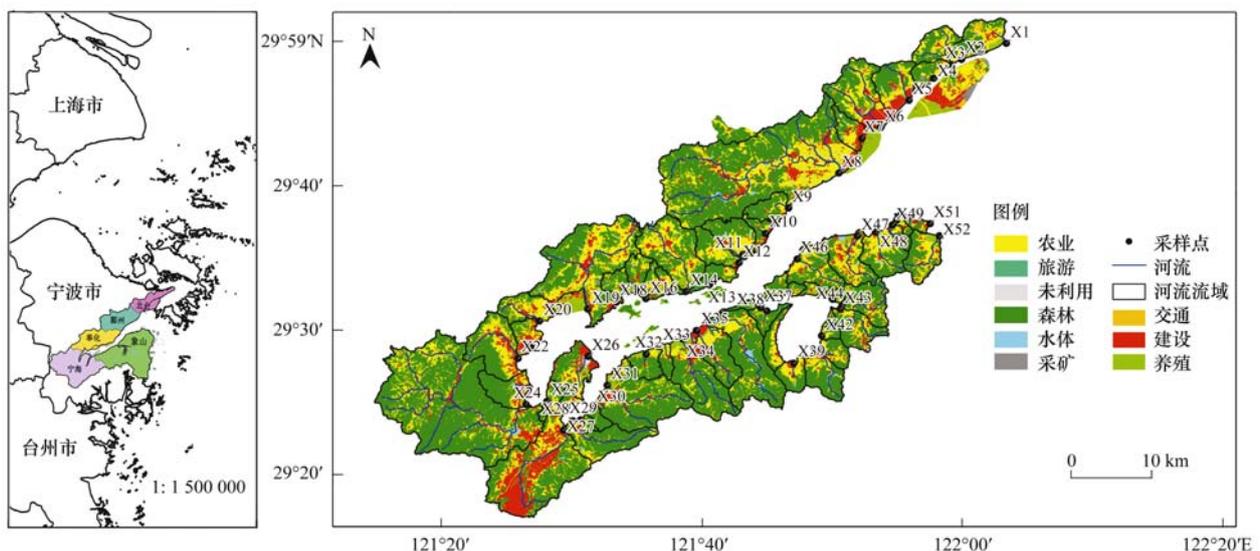


图1 象山港流域采样点分布及土地利用方式

Fig. 1 Distribution of sampling points and land-use pattern in the Xiangshan Bay watershed

流. 如果遭遇下雨, 在雨停后 2 d 继续采样, 减少降水对样品的干扰. 本次采样根据广谱式采样原则, 用采水器采集流域内河流 50 cm 处表层水<sup>[43]</sup>. 根据现场考察情况, 因施工干扰和河流断流等原因删除个别采样点, 最终在象山港流域内共采集到 52 个样品. 采样瓶采用聚乙烯塑料瓶用 10% 硝酸浸泡 24 h, 样品采集完成后立即用硝酸酸化至 pH < 2, 返回实验室后用 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤, 存放于 4℃ 冰箱冷藏, 在两周之内完成测量.

## 1.2 样品测定

样品采用的是 ICP-MS 电感耦合等离子体质谱仪进行测定, 为满足上机要求, 按照 2‰ 的盐度, 对样品进行分别稀释. 8 种重金属的检出限分别为: Cr 0.020 μg·L<sup>-1</sup>、Mn 0.002 μg·L<sup>-1</sup>、Fe 0.322 μg·L<sup>-1</sup>、Cu 0.009 μg·L<sup>-1</sup>、Zn 0.069 μg·L<sup>-1</sup>、As 0.004 μg·L<sup>-1</sup>、Cd 0.003 μg·L<sup>-1</sup> 和 Pb 0.002 μg·L<sup>-1</sup>. 标准物质采用的是国家标准物质研究中心生产的 GSB 04-1767-2004 多元标准溶液.

## 1.3 分析与评价方法

### 1.3.1 单因子污染指数法和综合污染指数法

对象山港流域河流水体中单一重金属污染水平和综合重金属污染水平进行评价<sup>[46]</sup>, 相关标准见表 1, 计算公式如下:

$$P_i = \frac{c_i}{S_i} \quad (1)$$

$$P_n = \sqrt{\frac{\max(P_i)^2 + \text{ave}(P_i)^2}{2}} \quad (2)$$

式中,  $P_i$  为水体中重金属的单因子污染指数 (single factor pollution index);  $c_i$  为象山港流域内河流重金属的实测浓度;  $S_i$  为重金属的评价标准值;  $P_n$  为象山港流域内水体重金属综合污染指数 (composite pollution index).

### 1.3.2 重金属污染指数

对流域内各个重金属产生的水质污染影响进行综合评价, 相关参数毒理学及健康依据文献<sup>[47]</sup>, HPI (heavy metal pollution index) 模型计算公式如下:

$$\text{HPI} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Q_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

式中,  $Q_i$  是第  $i$  个参数的子索引,  $W_i$  是第  $i$  个参数的单位权重,  $n$  是考虑参数的个数.

参数的子索引  $Q_i$  计算公式如下:

$$Q_i = \sum_{i=1}^n \frac{(M_i - I_i)}{S_i - I_i} \times 100 \quad (4)$$

式中,  $M_i$  是第  $i$  个参数的重金属测量浓度,  $I_i$  是  $i$  个参数的理想值,  $S_i$  是第  $i$  个参数的标准值. Prasad 等<sup>[47]</sup> 推荐可允许的临界污染指数值为 100.

采用《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 中 I 类水的水质标准限值作为流域水体中的评价标准, 地表水环境质量标准基本项目中未涵盖的重金属 (Fe 和 Mn) 参考集中式生活饮用水地表水源地标准限值<sup>[48]</sup>.

表 1 单因子污染指数和综合污染指数的评价标准

Table 1 Standards for single factor pollution index ( $P_i$ ) and composite pollution index ( $P_n$ )

单因子污染指数 ( $P_i$ )	污染水平	综合污染指数 ( $P_n$ )	污染水平
$P_i \leq 1$	清洁	$P_n \leq 1$	无污染
$1 < P_i \leq 2$	轻度污染	$1 < P_n \leq 2$	轻度污染
$2 < P_i \leq 3$	中度污染	$2 < P_n \leq 3$	中度污染
$P_i > 3$	重度污染	$P_n > 3$	重度污染

### 1.3.3 数据分析处理

本文研究利用 SPSS 25.0 和 EXCEL 2019 对数据进行处理和描述性统计; 用 ArcGIS 10.5 对 2017 年象山港流域内土地利用方式进行分析-提取-裁剪-叠加-合并绘制象山港内每个流域的土地利用方式; 利用 Origin2018 和 Canoco 5 等软件进行数据的分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 象山港流域水体中重金属的浓度变化特征

象山港流域 8 种溶解态重金属浓度含量特征统计分析结果见图 2 和表 2. Cr、Mn、Fe、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 的平均含量分别为 1.03、28.77、29.54、2.79、14.27、2.02、0.14 和 0.52 μg·L<sup>-1</sup>, 存在 Fe > Mn > Zn > Cu > As > Cr > Pb > Cd 的关系. 象山港流域内溶解态重金属浓度低于国家 I 类水的标准, 水质较好, 不存在重金属环境恶化情况和污染现象. 但与其他标准相比浓度较高, 研究区域内 Mn、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的平均含量分别为标准背景值的 5.75、1.85、1.42、1.93 和 2.6 倍; Cr、Mn、Fe、Cu、As、Cd 和 Pb 的平均含量分别为白溪水库的 6.89、27.67、4.67、2.95、11.21、13.52 和 4.00 倍. Cr、Fe 和 As 平均含量与标准背景值大致相当, Zn 平均含量略低于白溪水库. 变异系数 (CV) 是衡量数据的离散程度. 从统计结果来看, 变异系数呈现 Mn > Cr > Cu > Cd > Pb > As > Zn > Fe 的关系, 其中 Cr、Mn 和 Cu 变异系数分别达到了 1.23、1.92 和 1.16, 均为强变异, 表明象山港流域水中 Cr、Mn 和 Cu 浓度在空间的变化较大, 受影响的敏感程度较大.

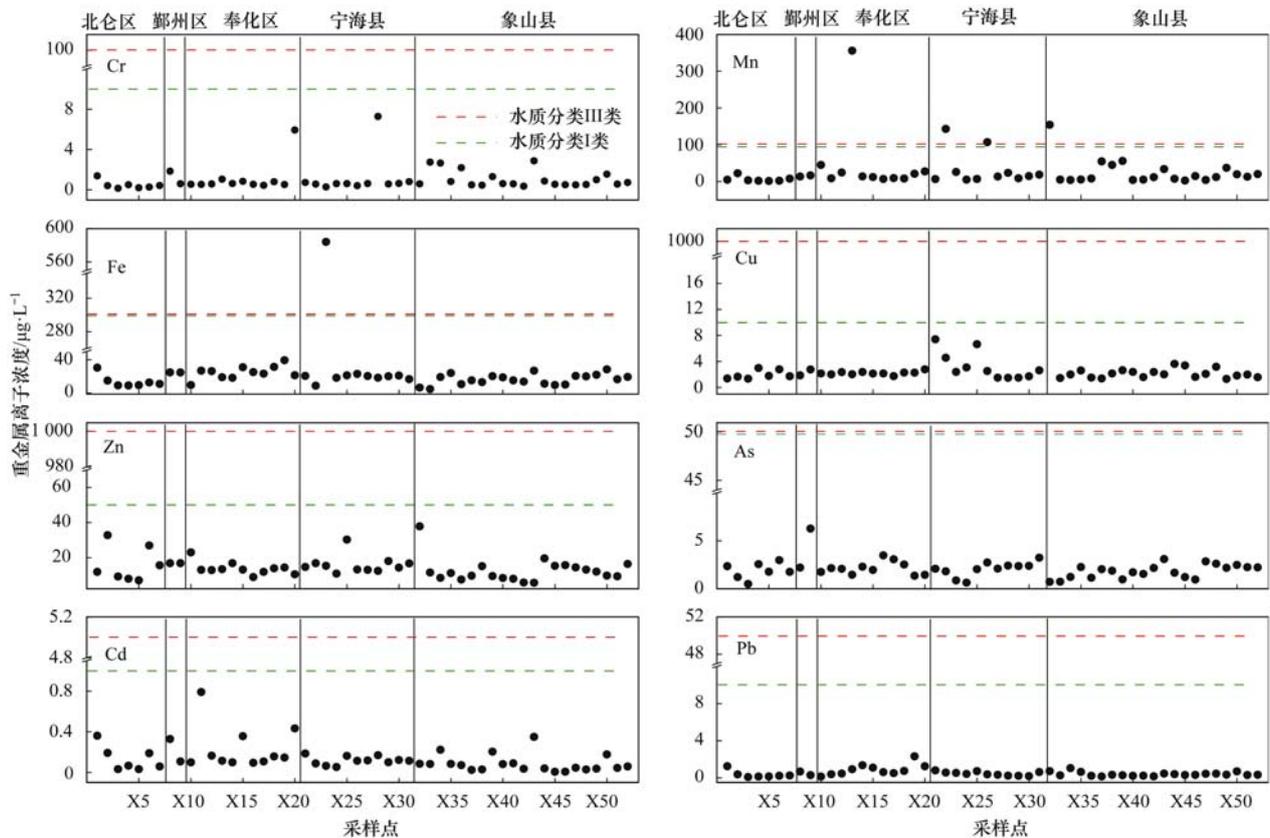


图2 象山港流域不同区县的重金属浓度情况

Fig. 2 Heavy metal concentrations in different districts in the Xiangshan Bay watershed

表2 象山港流域重金属含量的描述性统计<sup>1)</sup> ( $n=52$ )Table 2 Descriptive statistics of heavy metal content in the Xiangshan Bay watershed ( $n=52$ )

项目	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	As	Cd	Pb
最小值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.15	1.32	4.79	1.30	5.77	0.47	0.01	0.10
最大值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	7.28	355.48	39.34	24.37	37.84	6.26	0.79	2.33
平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	1.03	28.77	18.67	2.79	14.27	2.02	0.14	0.52
标准差/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	1.29	55.82	7.20	3.26	6.37	0.93	0.13	0.40
变异系数(CV)	1.23	1.92	0.39	1.16	0.44	0.46	0.98	0.77
白溪水库/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.15	1.04	6.32	0.62	15.51	0.18	0.01	0.13
标准背景值 <sup>[49]</sup> / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.89	<5	<30	1.5	10	2	0.07	0.2
象山港内 <sup>[41]</sup> / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0~0.98	—	—	0.37~3.99	2.9~44	0.5~2.8	0~0.29	0~4.13

1) 白溪水库背景值取自丰水期库内实测重金属均值; 排除 X23(宁海县铁江) Fe 元素异常值干扰, X23 不做统计

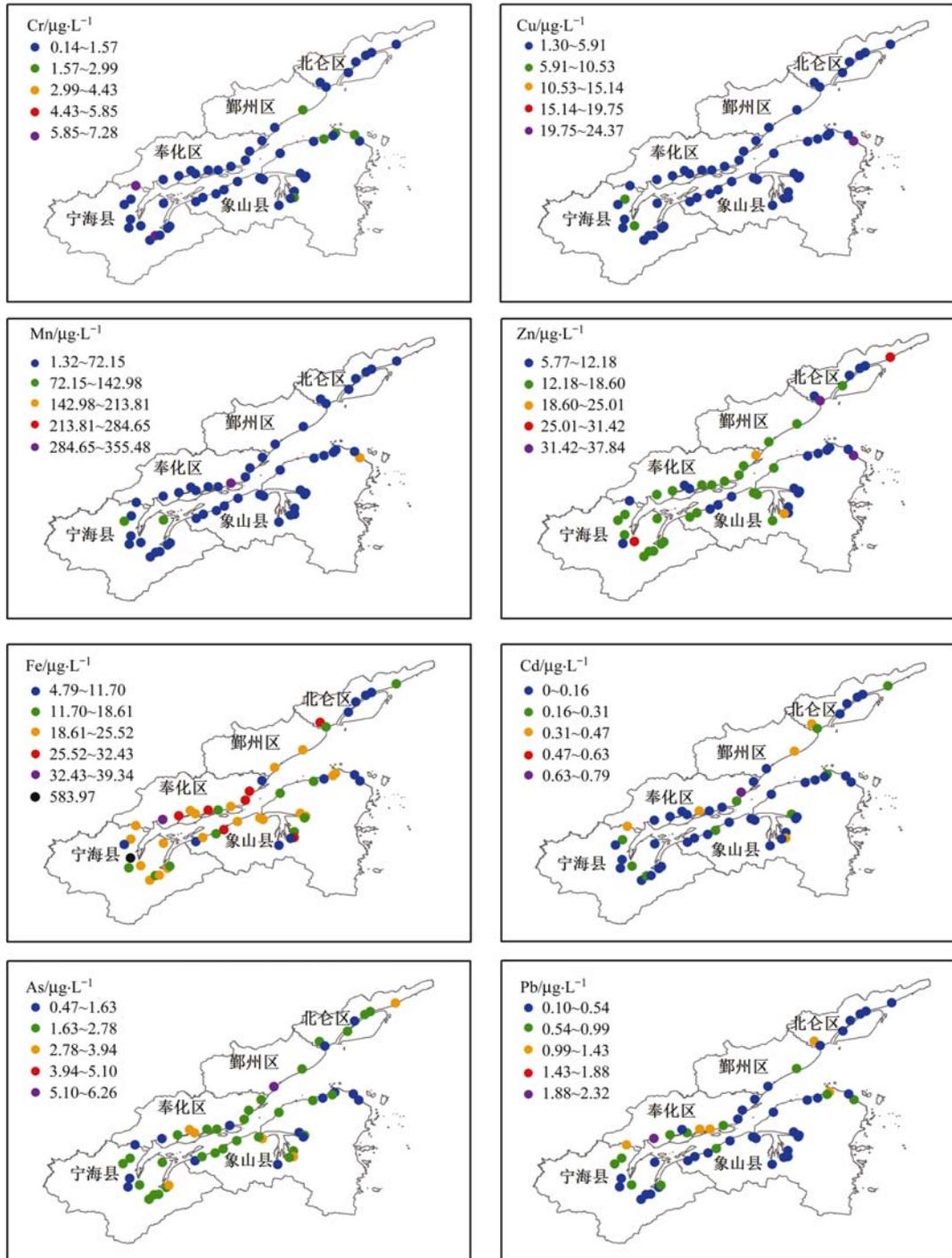
## 2.2 象山港流域重金属的空间变化特征

象山港流域重金属浓度的空间变化见图3, Cr、Mn 和 Cu 在空间上分布规律相似, 绝大多数点位浓度较低, 但个别点位在空间上浓度变化较大, 高值出现在宁海县和象山县东北部, 需要结合流域土地利用方式做进一步分析. Pb 与 Cd 的空间分布规律相似, 绝大多数点位浓度较低, 其中浓度高值点位出现在奉化区、鄞州区西北部和象山县北部, 这可能与象山港中部和北部主要是养殖区和农业区, 水体环境受到人为干扰等因素影响. Zn 呈西南向东北递减的趋势, 整体无超标现象, 但在东北低值区出现高值点, 这与当地的工业点源污染有关. Fe 在空间上分布较为分散无明显规律, 绝大多数点位都位于 4.79

~39.34  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, 远低于国家水质标准. 其中 X23 宁海县铁江超国家三类水标准 1.94 倍, 达到了 583.97  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 超过流域内平均水平 25 倍, 出现了异常变化, 可能与宁海县铁江沿岸污染企业的工业排放有关系. As 在空间上呈现中心向四周递减的趋势, 整体无超标现象.

## 2.3 重金属污染生态风险评价

为综合全面评价象山港流域内重金属的风险状况, 本文采用 3 种评价方法: ①单因子指数法( $P_i$ ), 算法简单明了, 能够反映出单个因子的污染状况. ②内梅罗综合指数法( $P_n$ ), 考虑各污染物平均污染水平和最大污染状况. ③重金属污染指数法(HPI), 对各个重金属产生的水质污染影响进行综



图内数值单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

图3 象山港流域重金属浓度的空间变化

Fig. 3 Spatial variation of heavy metal concentration in the Xiangshan Bay watershed

合评价,充分考虑每个重金属的毒理学及健康依据.

对象山港流域8种重金属Cr、Mn、Fe、Cu、Zn、As、Cd和Pb计算单因子污染指数,内梅罗综合污染指数和重金属污染指数(HPI).如图4所示,可以发现除Mn和Fe外,其他元素单因子污染指数远低于1,处于清洁水平.有研究通过主成分分析(principal component analysis, PCA)、失效分析(failure analysis, FA)和相关性进行分析,发现长江

流域内的Mn主要受自然源影响<sup>[50]</sup>,结合前文Cr、Mn和Cu空间分布规律相似可以推断象山港的Cu和Mn来自自然源的释放.而从内梅罗综合指数计算得到图5,除X12、X22、X26和X52点外其他河流流域均处于无污染水平,港内环境风险低.值得注意的是,有研究指出象山港内软体动物和甲壳动物重金属超标,需要防范港区内重金属在生物体内的富集现象.如表3所示,通过重金属污染指数(HPI)

计算得到流域内重金属污染水平远低于临界污染指数 100. 说明流域内重金属风险水平低. 但是需要注意的是,有研究表明港区内沉积物重金属污染达到

中等水平<sup>[51]</sup>,需要警惕港区内沉积物中重金属的释放.

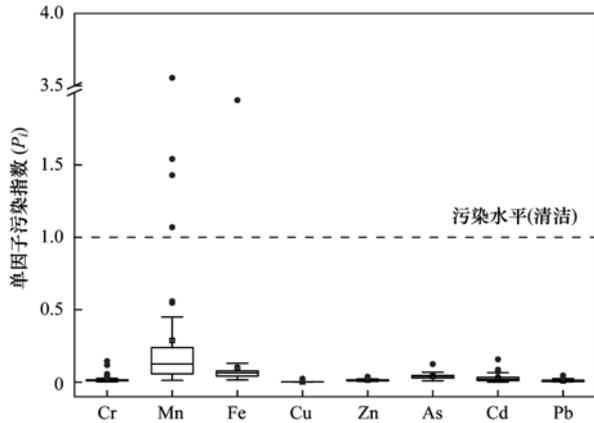


图 4 象山港流域重金属的单因子污染指数

Fig. 4 Single factor pollution index of heavy metals in the Xiangshan Bay watershed



图 5 象山港流域内梅罗综合污染指数分布状况

Fig. 5 Distribution of Nemeru comprehensive pollution index in the Xiangshan Bay watershed

表 3 象山港流域重金属污染指数 (HPI)<sup>1)</sup>

Table 3 Heavy metal pollution index of the Xiangshan Bay watershed

重金属	测量浓度均值 $M_i$ ( $n=52$ ) / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	标准值( $S_i$ ) / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	最高理想( $I_i$ ) / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	单位权 ( $W_i$ )	分类指数( $Q_i$ )	$W_i \times Q_i$
Cr	1.035	10.000	0.150	0.100	8.980	0.90
Mn	28.773	100.000	1.040	0.010	28.024	0.28
Fe	29.545	300.000	6.320	0.003	7.908	0.03
Cu	2.786	10.000	0.620	0.100	23.089	2.31
Zn	14.270	50.000	15.510	0.020	3.596	0.07
As	2.018	50.000	0.180	0.020	3.690	0.07
Cd	0.135	1.000	0.010	1.000	12.653	12.65
Pb	0.520	10.000	0.130	0.100	3.954	0.39

1)  $\sum W_i = 1.353$ ;  $\sum (W_i \times Q_i) = 16.707$ ;  $HPI = 12.345$

### 3 讨论

#### 3.1 重金属相关性

Pearson 相关性是分析不同重金属之间同源性的常用手段,重金属之间的相关性可以反映象山港流域内不同入海口重金属的来源和迁移特征,相关性高的重金属之间具有相似的污染源或类似的迁移特征<sup>[52]</sup>. 利用统计软件 SPSS 25.0 进行 Pearson 相关性分析,通过表 4 发现 Cd 与 Pb、Cu 与 Mn 之

间分别存在显著正相关( $P < 0.05$ ),结合上文 Pb 与 Cd, Cr、Mn 与 Cu 的空间分布规律相似,可以推测 Cd 与 Pb、Cu 与 Mn 可能来自于同样的污染源<sup>[53]</sup>. Cd 与 Cr 存在显著正相关( $P < 0.05$ ),Cu 与 Zn 存在极显著正相关( $P < 0.01$ ),但在空间分布规律上并不相似,因此可以推测 Cd 与 Cr、Cu 与 Zn 之间可能在迁移转化之间相互作用. 同时,8 种重金属不存在显著负相关,说明这 8 种重金属不存在明显的竞争作用.

表 4 象山港流域入湾河流水体重金属浓度相关性分析矩阵<sup>1)</sup>

Table 4 Correlation matrix of heavy metal concentrations in the Xiangshan River watershed

	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Cr	1.000							
Mn	-0.009	1.000						
Fe	-0.075	-0.016	1.000					
Cu	-0.088	0.303 *	-0.038	1.000				
Zn	-0.200	0.185	0.007	0.588 **	1.000			
As	-0.051	-0.138	-0.142	-0.168	-0.053	1.000		
Cd	0.329 *	-0.052	-0.029	-0.047	-0.011	0.088	1.000	
Pb	0.145	0.136	0.060	0.130	0.083	-0.062	0.323 *	1.000

1) \* 表示相关性  $P < 0.05$  显著, \*\* 表示相关性  $P < 0.01$  显著

### 3.2 重金属污染源分析

流域内的土地利用方式的空间变化是导致流域内重金属浓度分布的最主要原因. 通过 ArcGIS 10.5 提取 DEM(数字高程模型),对每条河流的流域进行划分,结合 2017 年象山港土地利用方式,通过分析-提取-裁剪,得出每个流域内土地利用方式数据,再通过 Canoco5 软件将流域内入海河流的重金属浓度作为生物因子,流域内的土地利用方式作为环境因子(不同土地利用方式是用每种土地利用方式在该流域的面积占比代表)进行冗余分析(redundancy analysis, RDA),结果见图 6.

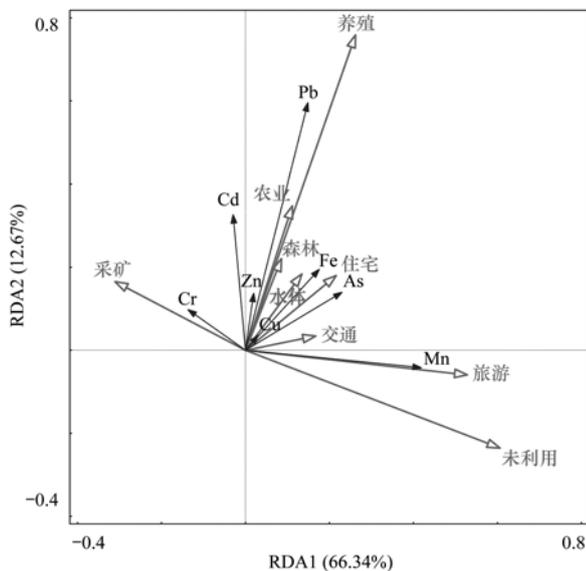


图 6 象山港流域重金属浓度与土地利用方式的冗余分析(RDA)

Fig. 6 Redundancy analysis of heavy metal concentration and land-use pattern in the Xiangshan Bay watershed

RDA 冗余分析 9 个环境因子变量可解释总变异的 79.01%,其中 RDA 1 解释了总变异的 66.34%,RDA 2 解释了总变异的 12.67%. 重金属 Pb 和 Mn 这两个变量的箭头长度长于平均贡献率,说明这两种重金属对象山港流域内的重金属浓度水平起着重要作用. 同时,森林用地、养殖用地和农业用地与重金属 Pb 和 Zn 之间箭头的交角很小,接近于 0,说明这 3 种土地利用方式与重金属 Pb 和 Zn 相关性最高,并且养殖和农业对 Pb 的解释率最高,因此农业的面源污染是导致水体中溶解态重金属 Pb 偏高的最主要原因. 根据前文分析,象山港流域内的海水养殖以及茶园与果园的农业种植是导致 Pb 偏高的人为源. 海水养殖所添加的饲料<sup>[54]</sup>,农业耕作所施用的肥料农药所含的 Pb 元素随地表径流进入流域内的水体中<sup>[55]</sup>;在水体中饲料和化肥的有机质具有大量吸附 Pb 离子的官能团,促进水体中有机结合态 Pb 的形成<sup>[56]</sup>;海水环境中的陪伴阴离子( $\text{Cl}^-$ 、

$\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) 释放沉积物中 Pb 并增加 Pb 在水中的溶解度<sup>[57]</sup>,在这 3 个方面的共同作用下象山港流域内水体中 Pb 含量升高.

Mn 与旅游用地和未利用地这两个变量之间的交角小,且箭头长度长于平均贡献率,因此可以推断旅游用地和未利用地是流域内的 Mn 迁移的重要驱动因素. 结合象山港流域内的土地利用类型,未利用地为空闲地和盐碱地. 旅游用地跟未利用地开发程度较小,人类活动对其的改造程度较低,较大程度保持了当地原始的自然风貌,因此可以推断流域内的地质背景是 Mn 分布的主要原因. 降水带来的径流、渗透和搬运以及潮汐对沉积物的规律性扰动是土壤中 Mn 向水中重金属释放的主要途径<sup>[58]</sup>. pH、温度和溶解性有机质是影响 Mn 释放的主要因素,而象山港内低 pH、高温和高溶解性有机质的自然环境推动了 Mn 的释放<sup>[59]</sup>. 因此自然源是港区内重金属 Mn 偏高的主要原因.

Cu、Fe 和 As 交角接近为 0,呈高度正相关,说明建设用地和交通用地对 Cu、Fe 和 As 的贡献率高并且相关性很强,而前文中 Cu 在空间上变化较大,Fe 和 As 空间变化复杂,符合建设用地的重金属污染特征. 通过象山港污染源的实地走访调查发现流域内企业无直排现象;港区以港口为枢纽的交通体系较为发达;建设用地傍水而建较为分散. 而 Cu、Fe 和 As 较国家水质标准而言总体浓度水平较低,且 Cu、Fe 和 As 箭头较短对前两轴贡献并不大,因此推断建设和交通用地所致的重金属随大气干湿沉降进入流域水体,造成水体中 Cu、Fe 和 As 出现污染情况. 这两类人类活动并未对流域内的重金属浓度水平造成较大影响.

重金属 Cr 与采矿用地呈正相关但相关性较高. 一方面象山港内的海侵海退的水动力条件以及低山平原的地形条件使得土壤中掩埋的铬渣随着浸出液以  $\text{Cr}^{6+}$  的形式<sup>[60]</sup>流入到水体中,另一方面象山港流域采矿用地在各个区县呈点状分布,临港工业所需要的铬矿在水运过程中进入水体. 因此推断象山港流域内 Cr 的主要来源是采矿等工业活动<sup>[61]</sup>,受人为活动影响较大.

结合前文 Pearson 相关性分析得出,Cu、Mn 和 Zn 这 3 类重金属的来源是象山港内较小受到的人类活动影响,因此可以推断这与象山港内的地质背景、象山港打造五处休闲度假旅游区有较大关系. 而 Cd、Cr 和 Pb 这 3 类主要来自当地的农业活动所造成的面源污染.

在流域内,As、Pb、Zn 和 Cd 均有高值和低值出现,总体浓度水平较低,但分布情况复杂,区域之

间污染状况不同. 北仑区的 As、Pb、Zn 和 Cd 的分布状况相似,说明南北两侧 As、Pb、Zn 和 Cd 的高值出现是因为相同的污染源,通过前期对象山港流域的实地调查可以推断可能来自于工业的点源污染. 而在象山港的中部(奉化区和宁海县北部),大片区域中 Cd 和 Pb 出现相似的分布特征,可能来源于当地农业的面源污染<sup>[62]</sup>. 结合当地的土地利用类型,可能是来源于当地海水养殖中饲料的大量使用<sup>[63]</sup>.

#### 4 结论

(1)8 种重金属平均浓度的大小顺序为: Fe > Mn > Zn > Cu > As > Cr > Pb > Cd,对照《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》中的 I 类限值,除 Mn、Fe 超过《集中式生活饮用水地表水源地标准》限值,其他港区内重金属浓度水平较低,6 种重金属均未超标. 与宁波市白溪水库的重金属浓度相比,有沾污现象出现. 象山港内的农业面源污染所带来的 Pb 浓度增加需要引起注意.

(2)北仑区和象山县的北部以工业的点源沾污为主,奉化区和宁海县以农业的面源沾污为主,个别点位出现 Mn 和 Fe 的工业点源污染情况.

(3)单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法和重金属污染指数法多种评价方法的结果显示,象山港流域内河流中的重金属污染水平低,水体环境质量较好,港内流域生态风险小.

(4)港区内重金属的来源复杂,主要分为人为源和自然源. Pb 和 Cd 的主要来源是养殖和农业用地; Mn 主要来自旅游和未利用地; Fe、Zn 和 As 主要来自建设用地和交通运输用地; Cr 主要来自于采矿用地. 其中农业是象山港流域内重金属浓度高于背景值的最主要原因,预防和治理象山港流域重金属污染问题应从流域内的农业面源污染抓起.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Yu R L, Hu G R, Wang L J. Speciation and ecological risk of heavy metals in intertidal sediments of Quanzhou Bay, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **163**(1-4): 241-252.
- [ 2 ] 李传琼,王鹏,陈波,等. 鄱阳湖流域赣江水系溶解态金属元素空间分布特征及污染来源[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(1): 139-149.  
Li C Q, Wang P, Chen B, et al. Spatial distribution and pollution source of dissolved metals in the Ganjiang River of Lake Poyang Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(1): 139-149.
- [ 3 ] 叶艾玲,程明超,张璐,等. 太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3075-3081.  
Ye A L, Cheng M C, Zhang L, et al. Characteristics and sources of dissolved heavy metals in summer precipitation of Taiyuan City, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3075-3081.
- [ 4 ] Cao Q Q, Wang H, Li Y R, et al. The national distribution pattern and factors affecting heavy metals in sediments of water systems in China [J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2018, **27**(2): 79-97.
- [ 5 ] Lu Q Q, Bian Z F, Tsuchiya N. Hydrotransport-oriented Zn, Cu, and Pb behavior assessment and source identification in the river network of a historically mined Area in the Hokuroku Basin, Northeast Japan [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(20): 3907.
- [ 6 ] Fang X H, Peng B, Wang X, et al. Distribution, contamination and source identification of heavy metals in bed sediments from the lower reaches of the Xiangjiang River in Hunan province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **689**: 557-570.
- [ 7 ] Mohammadi M, Darvishan A K, Bahramifar N. Spatial distribution and source identification of heavy metals (As, Cr, Cu and Ni) at sub-watershed scale using geographically weighted regression [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2019, **7**(3): 308-315.
- [ 8 ] Liu B L, Ma X W, Ai S W, et al. Spatial distribution and source identification of heavy metals in soils under different land uses in a sewage irrigation region, northwest China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, **16**(5): 1547-1556.
- [ 9 ] Das B, Nordin R, Mazumder A. Watershed land use as a determinant of metal concentrations in freshwater systems [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, **31**(6): 595-607.
- [ 10 ] Palma P, Ledo L, Alvarenga P. Assessment of trace element pollution and its environmental risk to freshwater sediments influenced by anthropogenic contributions: the case study of Alqueva Reservoir (Guadiana Basin) [J]. *CATENA*, 2015, **128**: 174-184.
- [ 11 ] Dević G, Sakan S, Dorđević D. Assessment of the environmental significance of nutrients and heavy metal pollution in the river network of Serbia [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(1): 282-297.
- [ 12 ] Varol M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **195**: 355-364.
- [ 13 ] Wang J W, Liu R M, Zhang P P, et al. Spatial variation, environmental assessment and source identification of heavy metals in sediments of the Yangtze River Estuary [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **87**(1-2): 364-373.
- [ 14 ] Wang T, Yan J J, Ma J L, et al. A fuzzy comprehensive assessment and hierarchical management system for urban lake health: A case study on the lakes in Wuhan city, Hubei province, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(12): 2617.
- [ 15 ] 杨海君,许云海,刘亚宾,等. 湘江流域衡阳水口山段水环境健康风险评估[J]. *环境化学*, 2018, **37**(9): 2060-2070.  
Yang H J, Xu Y H, Liu Y B, et al. Environmental health risk assessment of Shuikou Mountain Section of Hengyang in Xiangjiang River Basin [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(9): 2060-2070.
- [ 16 ] Giri S, Singh A K. Risk assessment, statistical source identification and seasonal fluctuation of dissolved metals in the Subarnarekha River, India [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **265**: 305-314.
- [ 17 ] Wang X L, Zhang L, Zhao Z H, et al. Heavy metal pollution in

- reservoirs in the hilly area of southern China: Distribution, source apportionment and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **634**: 158-169.
- [18] Vareda J P, Valente A J M, Durães L. Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: a review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **246**: 101-118.
- [19] Perić M S, Kepčija R M, Miliša M, *et al.* Benthos-drift relationships as proxies for the detection of the most suitable bioindicator taxa in flowing waters - a pilot-study within a Mediterranean karst river[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **163**: 125-135.
- [20] 于元赫, 吕建树, 王亚梦. 黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2865-2874.
- Yu Y H, Lü J S, Wang Y M, *et al.* Source identification and spatial distribution of heavy metals in soils in typical areas around the lower Yellow River[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2865-2874.
- [21] Liu S L, Pan G H, Zhang Y Q, *et al.* Risk assessment of soil heavy metals associated with land use variations in the riparian zones of a typical urban river gradient[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **181**: 435-444.
- [22] Yuan G L, Liu C, Chen L, *et al.* Inputting history of heavy metals into the inland lake recorded in sediment profiles: Poyang Lake in China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **185**(1): 336-345.
- [23] Saran L M, Pissarra T C T, Silveira G A, *et al.* Land use impact on potentially toxic metals concentration on surface water and resistant microorganisms in watersheds[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **166**: 366-374.
- [24] El-Tohamy W S, Abdel-Baki S N, Abdel-Aziz N E, *et al.* Evaluation of spatial and temporal variations of surface water quality in the Nile River Damietta Branch[J]. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 2018, **25**(4): 569-580.
- [25] Wang X Y, Zhao L L, Xu H Z, *et al.* Spatial and seasonal characteristics of dissolved heavy metals in the surface seawater of the Yellow River Estuary, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **137**: 465-473.
- [26] Zhang J B, Zhou F X, Chen C L, *et al.* Spatial distribution and correlation characteristics of heavy metals in the seawater, suspended particulate matter and sediments in Zhanjiang Bay, China[J]. *PLoS One*, 2018, **13**(8): e0201414.
- [27] Bo W J, Wang X K, Zhang Q Q, *et al.* Influence of land use and point source pollution on water quality in a developed region: A case study in Shunde, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(1): 51.
- [28] Xu Q Q, Zhang C, Liang L, *et al.* Transport dynamics of mercury in rainfall-runoff after summer drought in a small agricultural watershed in the Three Gorges Reservoir region[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, **102**(5): 679-685.
- [29] Kotková K, Nováková T, Tůmová Š, *et al.* Migration of risk elements within the floodplain of the Litavka River, the Czech Republic[J]. *Geomorphology*, 2019, **329**: 46-57.
- [30] Zhang L X, Zhao B, Xu G, *et al.* Characterizing fluvial heavy metal pollutions under different rainfall conditions: Implication for aquatic environment protection[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **635**: 1495-1506.
- [31] 舒心, 李艳, 李锋, 等. 土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2471-2482.
- Shu X, Li Y, Li F, *et al.* Impacts of land use and landscape patterns on heavy metal accumulation in soil[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2471-2482.
- [32] Fernandes A C P, Fernandes L F S, Cortes R M V, *et al.* The role of landscape configuration, season, and distance from contaminant sources on the degradation of stream water quality in urban catchments[J]. *Water*, 2019, **11**(10): 2025.
- [33] Gholizadeh M H, Melesse A M, Reddi L. Water quality assessment and apportionment of pollution sources using APSC-MLR and PMF receptor modeling techniques in three major rivers of South Florida[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **566-567**: 1552-1567.
- [34] Simeonov V, Stratis J A, Samara C, *et al.* Assessment of the surface water quality in Northern Greece[J]. *Water Research*, 2003, **37**(17): 4119-4124.
- [35] Feng B X, Li J L, He G L, *et al.* Research on changes of coastal land use intensity in bay area during past 30 years—A case study of Xiangshan Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 2018, **20**(2): 28-43.
- [36] Liu Q, Xu X Q, Zeng J N, *et al.* Heavy metal concentrations in commercial marine organisms from Xiangshan Bay, China, and the potential health risks[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **141**: 215-226.
- [37] Grimm N B, Foster D, Groffman P, *et al.* The Changing landscape: ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2008, **6**(5): 264-272.
- [38] Gessner M O, Hinkelmann R, Nitzmann G, *et al.* Urban water interfaces[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, **514**: 226-232.
- [39] Zhao B F, Wang X M, Jin H B, *et al.* Spatiotemporal variation and potential risks of seven heavy metals in seawater, sediment, and seafood in Xiangshan Bay, China (2011-2016)[J]. *Chemosphere*, 2018, **212**: 1163-1171.
- [40] 曹欣中, 唐龙妹, 张月秀. 象山港水文特征及纳污能力的分析[J]. *东海海洋*, 1995, (1): 10-19.
- Cao X Z, Tang L M, Zhang Y X. Analyses of the hydrography features and the ability for containing contaminator for port Xiangshan[J]. *Donghai Marine Science*, 1995, (1): 10-19.
- [41] 袁麒麟, 李加林, 徐琼慧, 等. 象山港流域河流形态特征定量分析[J]. *海洋学研究*, 2014, **32**(3): 50-57.
- Yuan Q X, Li J L, Xu L H, *et al.* Quantitative analysis of river morphological features in Xiangshan Bay Basin[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2014, **32**(3): 50-57.
- [42] Ye C, Xu Q J, Kong H N, *et al.* Eutrophication conditions and ecological status in typical bays of Lake Taihu in China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, **135**(1-3): 217-225.
- [43] Zeng X X, Liu Y G, You S H, *et al.* Spatial distribution, health risk assessment and statistical source identification of the trace elements in surface water from the Xiangjiang River, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(12): 9400-9412.
- [44] Li J L, Liu Y C, Pu R L, *et al.* Coastline and landscape changes in bay areas caused by human activities: A comparative analysis of Xiangshan Bay, China and Tampa Bay, USA[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, **28**(8): 1127-1151.
- [45] 黄秀清, 陈琴, 姚炎明, 等. 港湾海洋环境监测站位布设方法研究——以象山港为例[J]. *海洋学报*, 2015, **37**(1): 158-170.
- Huang X Q, Chen Q, Yao Y M, *et al.* The setting method of harbour marine environment monitoring station—A case study in

- Xiangshan Bay [J]. Haiyang Xuebao, 2015, **37** (1): 158-170.
- [46] 孙清展, 臧淑英. 水体重金属污染评价方法对比研究——以扎龙湿地湖水为例[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31** (11): 2242-2248.
- Sun Q Z, Zang S Y. Pollution evaluation and forecast of heavy metal in lake of Zhalong Wetland, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31** (11): 2242-2248.
- [47] Prasad B, Bose J. Evaluation of the heavy metal pollution index for surface and spring water near a limestone mining area of the lower Himalayas[J]. Environmental Geology, 2001, **41** (1-2): 183-188.
- [48] 马明真, 高扬, 宋贤威, 等. 鄱阳湖地区多尺度流域水体重金属输送特征及其污染风险评价[J]. 生态学报, 2019, **39** (17): 6404-6415.
- Ma M Z, Gao Y, Song X W, *et al.* Transport characteristics and risk assessment of heavy metals in multi-scale watersheds in the Poyang Lake area, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39** (17): 6404-6415.
- [49] 李健, 曾北危, 姚岳云, 等. 洞庭湖水系水体环境背景值调查研究[J]. 环境科学, 1986, **7** (4): 62-68, 104.
- Li J, Zeng B W, Yao Y Y, *et al.* Studies on environmental background levels in water of Dongting Lake system [J]. Environment Science, 1986, **7** (4): 62-68, 104.
- [50] Li S Y, Zhang Q F. Spatial characterization of dissolved trace elements and heavy metals in the upper Han River (China) using multivariate statistical techniques [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **176** (1-3): 579-588.
- [51] 李冬玲. 象山港海域水质与沉积物主要污染因子及污染源分析[A]. 见: 浙江省地理学会2016年学术年会暨浙江省第三届地理名师名校长联盟高峰论坛: 论文摘要集[C]. 金华: 浙江省地理学会, 2016.
- [52] 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 等. 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[J]. 环境科学, 2019, **40** (2): 590-602.
- Lü W W, Yao X, Zhang B H, *et al.* Temporal-spatial distribution of nitrogen and phosphorus nutrients in lake Taihu based on geostatistical analysis [J]. Environmental Science, 2019, **40** (2): 590-602.
- [53] Zhang Y N, Chu C L, Li T, *et al.* A water quality management strategy for regionally protected water through health risk assessment and spatial distribution of heavy metal pollution in 3 marine reserves[J]. Science of the Total Environment, 2017, **599-600**: 721-731.
- [54] Kang J H, Lee S W, Cho K H, *et al.* Linking land-use type and stream water quality using spatial data of fecal indicator bacteria and heavy metals in the Yeongsan river basin [J]. Water Research, 2010, **44** (14): 4143-4157.
- [55] 廖建波. 流域复合环境系统中重金属的归趋与综合风险评价[D]. 广州: 华南理工大学, 2016. 111-116.
- [56] Liao J B, Chen J, Ru X, *et al.* Heavy metals in river surface sediments affected with multiple pollution sources, South China: distribution, enrichment and source apportionment [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2017, **176**: 9-19.
- [57] Wang C, Wang J H, Zhao Y P, *et al.* The vertical migration and speciation of the Pb in the paddy soil: a case study of the Yangtze River Delta, China [J]. Environmental Research, 2019, **179**: 108741.
- [58] Springborn M, Singer M B, Dunne T. Sediment-adsorbed total mercury flux through yolo bypass, the primary floodway and wetland in the Sacramento Valley, California [J]. Science of the Total Environment, 2011, **412-413**: 203-213.
- [59] 陈蕾. 水库沉积物—水界面锰迁移与转化行为研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015. 106-129.
- [60] Sarangi A, Krishnan C. Comparison of in vitro Cr(VI) reduction by CFEs of chromate resistant bacteria isolated from chromate contaminated soil [J]. Bioresource Technology, 2008, **99** (10): 4130-4137.
- [61] Aykol A, Budakoglu M, Kumral M, *et al.* Heavy metal pollution and acid drainage from the abandoned Balya Pb-Zn sulfide Mine, NW Anatolia, Turkey [J]. Environmental Geology, 2003, **45** (2): 198-208.
- [62] Murray K S, Rogers D T, Kaufman M M. Heavy metals in an urban watershed in southeastern Michigan [J]. Journal of Environmental Quality, 2004, **33** (1): 163-172.
- [63] 张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 等. 三峡库区沉积物中镍污染特征评价[J]. 环境科学, 2018, **39** (12): 5464-5472.
- Zhang W J, Yin S H, Xu D Y, *et al.* Pollution characteristic of Ni in sediments in the Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2018, **39** (12): 5464-5472.

## CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China .....	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change .....	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM <sub>2.5</sub> Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou .....	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter .....	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province .....	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan .....	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu .....	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou .....	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan .....	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode .....	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer .....	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language .....	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou .....	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode .....	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO <sub>x</sub> Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process .....	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City .....	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter .....	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain .....	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin .....	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin .....	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohu Estuary and the Related Influencing Factors .....	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake .....	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed .....	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China .....	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang .....	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin .....	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir .....	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes .....	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet .....	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater .....	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River .....	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo .....	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir .....	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems .....	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water .....	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar .....	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe <sup>0</sup> /WMF) .....	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite .....	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter .....	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater .....	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge .....	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature .....	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China .....	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network .....	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N <sub>2</sub> O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil .....	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China .....	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils .....	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil .....	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai .....	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings .....	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)