

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立40周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战	王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)
河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险	王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)
海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展	袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)
环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测	李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)
环境水体中无机砷现场分析方法研究进展	薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)
海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展	黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展	骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)
水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制	王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876)
中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物	史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)
中国油气系统甲烷逸散排放估算	陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)
2015~2020年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征	李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)
九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征	程宏, 陈荣 (4924)
厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征	姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)
九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制	戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)
福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制	杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)
厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制	潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)
改性生物炭固定床对模拟湖水体中 Mn^{2+} 的吸附	赵洁, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)
基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测	徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)
紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯	徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 譙杨 (4992)

研究报告

2019年秋季海南省4次臭氧污染过程特征及潜在源区分析	符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)
伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制	陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)
城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性	齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)
南京北郊 BTESX 特征及健康风险评估	冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)
我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估	孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奔, 马长文, 叶建峰 (5040)
东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析	陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)
长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析	刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)
青藏高原湖泊水环境特征及水质评价	刘智琦, 潘保柱, 韩谔, 李刚, 王韬轶 (5073)
基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水文地球化学特征及控制因素	查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)
丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系	贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)
铜沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能	王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)
基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群	章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍 (5115)
寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析	杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)
中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析	田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾立新 (5131)
硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析	刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)
不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响	邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 张广林 (5149)
不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 NO 和 N_2O 排放的影响	唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)
基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征	刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)
基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析	高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)
基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析	张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)
老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 Cd^{2+} 的影响	王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)
磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响	芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)
牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响	赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)
磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和锌镉累积的影响	帅祖华, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)
重庆开州区农地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估	方林发, 叶萃萃, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)
基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应	侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)
黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征	许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263)
土壤多功能性对微生物多样性降低的响应	陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)
氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响	苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)
碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比	李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)
中国能源消费碳排放的空间化与时空动态	郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颜斌斌, 杜海波 (5305)
京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO_2 协同减排效益评估	杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束轲 (5315)
我国塑料污染防治政策分析与建议	李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)

九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制

戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利*, 陈能汪

(厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361102)

摘要: 痕量金属在海洋系统的一些生物地球化学过程中发挥着重要作用, 河口及近岸海域物理水文条件变化复杂, 且受人为活动影响显著, 因此近海海域中痕量金属的生化行为与影响机制是研究的热点. 九龙江口-厦门湾海域位于福建沿海地区, 受龙岩、厦门和漳州等城市影响较为显著. 分别于 2021 年 7 月、2021 年 11 月和 2022 年 1 月对九龙江口-厦门湾海域的痕量金属铬(Cr)、锰(Mn)、钴(Co)、镍(Ni)、铜(Cu)、镉(Cd)和环境因子[水温、盐度、pH、溶解氧(DO)和悬浮颗粒物(SPM)等]进行了 3 个航次的调查. 结果表明, 九龙江口-厦门湾流域所测痕量金属浓度平均值大小顺序: $Mn > Ni > Cu > Cr > Co > Cd$. $\rho(Cr)$ 、 $\rho(Mn)$ 、 $\rho(Co)$ 、 $\rho(Ni)$ 、 $\rho(Cu)$ 和 $\rho(Cd)$ 在 2021 年 7 月的平均值分别为: 0.159、47.96、0.068、1.56、1.07 和 0.016 $\mu g \cdot L^{-1}$; 2021 年 11 月的平均值分别为: 0.216、8.48、0.030、1.70、1.92 和 0.019 $\mu g \cdot L^{-1}$; 2022 年 1 月平均值分别为: 0.281、32.39、0.062、2.21、1.54 和 0.034 $\mu g \cdot L^{-1}$. 河口区溶解态痕量金属浓度高于海湾区. 主成分分析表明, 影响溶解态痕量金属浓度的主要因素为河口径流和人类活动.

关键词: 近岸海水; 溶解态痕量金属; 分布; 来源; 影响机制

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-4939-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202206001

Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay

QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, WANG Qi, WANG De-li*, CHEN Neng-wang

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: Trace metals play an important role in some biogeochemical processes in the marine system. The physical and hydrological conditions in estuaries and coastal seawater are complicated and significantly affected by human activities. Therefore, the biogeochemical behavior and influencing mechanism of trace metals in nearshore water have become a research hotspot. Jiulong River estuary and Xiamen Bay are located in the coastal areas of Fujian Province, which are significantly influenced by Longyan, Xiamen, and Zhangzhou City. In July 2021, November 2021, and January 2022, the trace metals chromium (Cr), manganese (Mn), cobalt (Co), nickel (Ni), copper (Cu), and cadmium (Cd) and environmental factors (water temperature, salinity, pH, dissolved oxygen (DO), suspended particulate matter (SPM), etc.) in Jiulong River estuary and Xiamen Bay were investigated. The results showed that the order of trace metal concentration average values measured in Jiulong River estuary and Xiamen Bay was $Mn > Ni > Cu > Cr > Co > Cd$. In July 2021, the average values of $\rho(Cr)$, $\rho(Mn)$, $\rho(Co)$, $\rho(Ni)$, $\rho(Cu)$, and $\rho(Cd)$ were 0.159, 47.96, 0.068, 1.56, 1.07, and 0.016 $\mu g \cdot L^{-1}$, respectively. In November 2021, the average values were 0.216, 8.48, 0.030, 1.70, 1.92, and 0.019 $\mu g \cdot L^{-1}$, respectively. The average concentrations in January 2022 were 0.281, 32.39, 0.062, 2.21, 1.54, and 0.034 $\mu g \cdot L^{-1}$, respectively. The concentration of dissolved metals in the estuary was higher than that in the bay area. Principal component analysis showed that the main factors affecting the concentrations of dissolved trace metals were river runoff and anthropogenic activities.

Key words: coastal seawater; dissolved trace metals; distribution; source; influence mechanism

痕量金属的生物地球化学循环是海洋生物地球化学研究中不可或缺的一部分. 痕量金属在海水中的浓度极低, 通常在 $pmol \cdot L^{-1} \sim nmol \cdot L^{-1}$ 范围内, 多数具有生物学功能, 是海洋生物酶系统的辅因子以及蛋白质的组成元素. 适宜浓度的痕量金属能促进浮游植物的生长, 提高海洋初级生产力^[1]. 20 世纪 70 年代, 随着地球化学海洋断面研究计划的进行, 对于痕量金属在海洋中的浓度、分布和化学行为有了初步认识^[2]. 近几十年, 伴随仪器检测技术的发展以及对洁净操作的重视, 痕量金属的研究得到了进一步的拓展^[3].

痕量金属在水体中的迁移转化是一个复杂的过程, 涉及物理、化学和生物等多个方面(图 1). 水体

中的痕量金属可通过吸附、沉淀等物理化学作用, 转移并蓄积在沉积相中. 当水环境条件等因素改变时, 痕量金属又可能通过解吸、溶解等作用再次释放, 重新进入水体. 所以研究其在水体中的迁移规律时, 须综合考虑各过程以及主要影响因素^[4,5].

进入水体的痕量金属难以去除^[6], 海洋系统中痕量金属分布的差异可能会受到诸如盐度、水温、pH、溶解氧和人为来源等变量的具体影响^[7]. 近岸和河口流域, 河海水混合强烈, 同时人类活动密集,

收稿日期: 2022-06-01; 修订日期: 2022-07-24

作者简介: 戚柳倩(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为近岸海水中痕量金属的分布与影响机制, E-mail: qiliuqian@stu.xmu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: deliwang@xmu.edu.cn

有着复杂多变的环境特征^[8,9]. 随着沿海地区经济快速的发展,越来越多人类活动产生的痕量金属通过地下水、河流等形式进入海洋^[10,11]. 近岸和河口流域由于河海水的剧烈混合,导致离子强度、pH、氧化还原条件和常量元素的相对浓度等一系列环境参数有强烈的波动,与痕量金属发生的物理化学反应比较复杂^[12,13]. 并且近岸海域生产力水平高,生物物种丰富,高浓度的痕量金属会对生物甚至人类产生危害^[14]. 因此研究近岸和河口流域的痕量金属元素的生物地球化学循环有着非常重要的意义.

目前国内大部分的研究热点为近岸和河口流域沉积物中的痕量金属,对于海水中溶解态痕量金属的研究还有很大空间. 有学者在黄河、珠江和长江等流域对海水中溶解态痕量金属进行了相关研究. Wang 等^[15]对黄河流域表层海水中的溶解态痕量金属进行测定,探究其时空分布特征. Wang 等^[16]首次在珠江口将溶解态痕量金属(Cd、Cu 和 Mn)与氧气和无机碳进行系统性地测定. 廖宝淦等^[17]分析了珠江口磨刀门痕量金属污染现状和空间分布特征,探究其迁移转化特点以及盐度等环境因素对痕量金属分配结果的影响. An 等^[18]对长江口及其邻近海域的溶解态痕量金属进行了环境评估. Chu 等^[19]通过主成分分析探究了赣江流域的溶解态痕量金属和营养盐的空间分布特征并进行了风险评估. 李传琼等^[20]分析了赣

江水系 15 种溶解态痕量金属元素的空间分布特征和污染来源的贡献率. Liang 等^[21]探究了九龙江中的溶解态痕量金属的分布和来源,并对水质进行了健康风险评估. 甄晓桐等^[22]采集了渤海和黄海表、底层海水水样,获得了几种痕量金属(Cu、Ni、Co 和 Zn)的空间分布特征,结果显示,黄、渤海海水中痕量金属的空间分布具有近岸高远岸低的特点,体现了人类活动对近岸海域的影响. 任艺君等^[23]对中国黄、渤海海水中溶解态 Cd 浓度较高应与沿岸上升流引起的沉积物再悬浮过程有关.

九龙江位于福建省南部沿海发达地区,是福建省第二大河,是漳州、龙岩和厦门三地沿岸许多城镇的饮用水与工农业用水源,具有重大的生态和经济意义^[24]. 近年来,飞速发展的工业化和城镇化已经严重影响了相关流域和河口的环境质量^[25]. 相关研究显示九龙江流域内各市水体污染源主要表现为:龙岩市水体污染源为生猪养殖业^[26],漳州市和厦门海沧区水体受城区工业废水和生活污水的污染^[27,28]. 本文对九龙江流域水体中的 Cr、Mn、Co、Ni、Cu 和 Cd 的浓度时空分布特征及来源进行了研究. 探讨近岸和河口流域痕量金属的污染特征及其影响因素,对于九龙江流域与河口的环境污染控制与管理具有重要的现实意义.

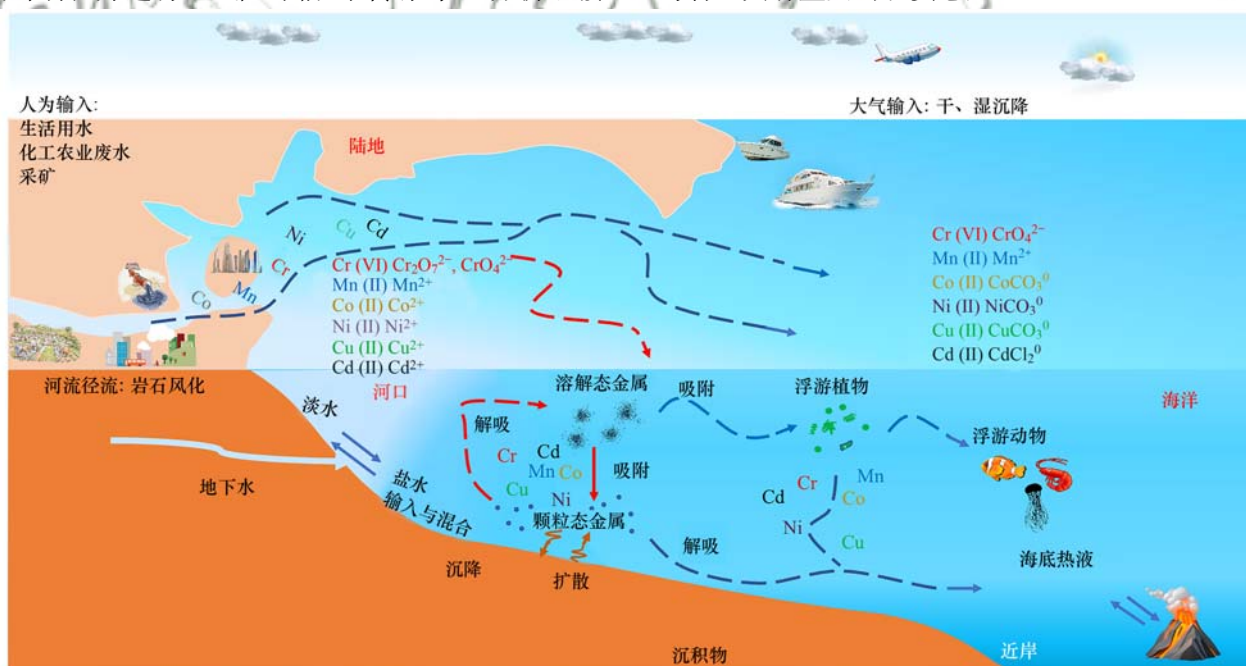


图1 痕量金属的生物地球化学循环

Fig. 1 Biogeochemical cycling of trace metals

1 材料与方法

1.1 样品的采集及前处理

航次采样所需的所有塑料实验器材,包括真空

过滤器、采样瓶和取用滤膜的相应工具等,在使用前全部用 MilliQ 超纯水清洗,酸洗酸泡晾干后装入洁净密封袋中封好保存备用. 过滤膜为 0.20 μm 的聚丙烯膜,酸泡后置于洁净的容器中加入超纯水浸

泡备用. 九龙江口-厦门湾航次的样品采用 Niskin 采水器(卡盖式采水器)进行采集, 采取水样前先用现场海水润洗 3 次, 用采水器接取水样后进行过滤, 酸化处理一个月以上进行后续的预处理. 采集的海水样品使用 Multi 3630 IDS 数字化便携多参数水质分析仪(德国 WTW 公司)测定水温、盐度和 pH 等基本参数. 用重量法测定并计算悬浮颗粒物浓度. 实验从准备到预处理的所有过程都在洁净条件下进行. 实验所用的 Chelex-100 树脂需要进行清洗以及酸的浸泡. 溶解态痕量金属样品的处理全程在洁净的通风橱中进行.

1.2 痕量金属样品的测定与质量控制

标准工作曲线的判定系数 R^2 值能达到 0.999 以上, 证明工作曲线的线性相关性较好. 进行实验预处理时, 用已知浓度的近岸海水标准样品(CASS-6), 经过相同的步骤进行预处理, 评估实验方法的回收率. 在测定过程中, 每隔 10 个样品插入已知浓度的河水标准样品(SLRS-6), 得出仪器测量的回收率, 用于评估仪器测定的稳定性和准确性. 近岸海水标准样品(CASS-6)所测定的回收率均在 $100\% \pm 10\%$ 的范围内; 河水标准样品(SLRS-6)所测定的回收率均在 $100\% \pm 15\%$ 的范围内. 保证了仪器测定的准确性和实验方法操作的可行性.

2021 年 7 月、2021 年 11 月和 2022 年 1 月对九龙江口和厦门湾海域进行调查采样, 采样的站位如图 2 所示. 测定的基本水文参数包括水深、水温、盐度、pH、溶解氧(DO)和悬浮颗粒物(SPM)等, 采样站位包括九龙江口 10 个站位和厦门湾海域 12 个站位, 总计 22 个站位. 航次所乘坐的船只为厦门大学“海洋二号”科考船.

为简便对数据进行分析, 并且结合前人文章, 将采样站位根据地理位置特征分为 5 个区域, 包括河口区(A3~A9-1 站位)、南侧海域(JY1、JY2、X4、

X3、X2 站位)、东侧水道(X1、X13、X12 站位)、同安湾(X11、X9、X8 站位)和厦门西港(X7、X6、X5 站位), 其中后 4 个区域统称为海湾区.

1.3 数据分析

利用电感耦合等离子体质谱分析法(ICP-MS)对溶解态痕量金属进行测定. 利用 Arcgis、Surfer 和 Origin 等软件绘制站位图和痕量金属分布的时空关系. 利用 Excel 和 R Studio 等软件进行数据处理与分析.

2 结果与讨论

2.1 调查期间的基本水温参数

九龙江口-厦门湾海域表层水温、盐度、pH 和 DO 的平面分布如图 3 所示. 水温的季节性变化较为明显, DO 不同季度略有变化, 盐度和 pH 在不同季节的分布较为相似.

总体上河口区水温略高于海湾区. 3 个航次水温范围分别为 $29.6 \sim 33.0$ 、 $20.5 \sim 22.6$ 和 $16.0 \sim 18.2^\circ\text{C}$, 平均水温分别为 31.4 、 21.8 和 17.1°C . 河口区盐度低于海湾区, 2021 年 7 月航次盐度最高, 3 个航次盐度范围分别为 $0.7\text{‰} \sim 33.5\text{‰}$ 、 $2.4\text{‰} \sim 32.8\text{‰}$ 和 $2.7\text{‰} \sim 31.2\text{‰}$. pH 分布与盐度分布较为相似, 河口区 pH 低于海湾区, 2022 年 1 月 pH 最高. 河口区 DO 较低于海湾区流域, 3 个航次均无缺氧现象.

2.2 结果与分析

2.2.1 溶解态 Cr

如图 4 所示, 2021 年 7 月航次溶解态 $\rho(\text{Cr})$ 范围为 $0.012 \sim 0.943 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 最高值位于 A7 站位, 最低值位于 X6 站位. 2021 年 11 月航次溶解态 $\rho(\text{Cr})$ 浓度范围为 $0.040 \sim 0.557 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 浓度最高为 A8 站位, 最低为 X11 站位. 2022 年 1 月航次溶解态 $\rho(\text{Cr})$ 浓度范围为 $0.003 \sim 1.267 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 最高值位于 X1 站位, 最低值位于 X7 站位. 河口区溶解态 Cr 浓度高于海湾区. 2021 年 7 月航次除河口区 A7 站位浓度异常高外, 其余站位浓度均保持在较低水平, 均低于 $0.300 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 2021 年 11 月航次除 A8 站位浓度异常高外, 其余站位浓度均较低且低于 $0.673 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 2022 年 1 月航次除 X1 站位浓度异常高外, 其余站位浓度均较低且低于 $0.670 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

高盐度海水中, 由于阳离子竞争加强, 将被颗粒物吸附的金属离子置换出来, 这在河口环境中尤为突出. 九龙江口-厦门湾海域的盐度变化很大, 河口区上游盐度极低, 在下游与高盐度的厦门湾海水混合, 河海水混合后盐度变化影响溶解态痕量金属的浓度分

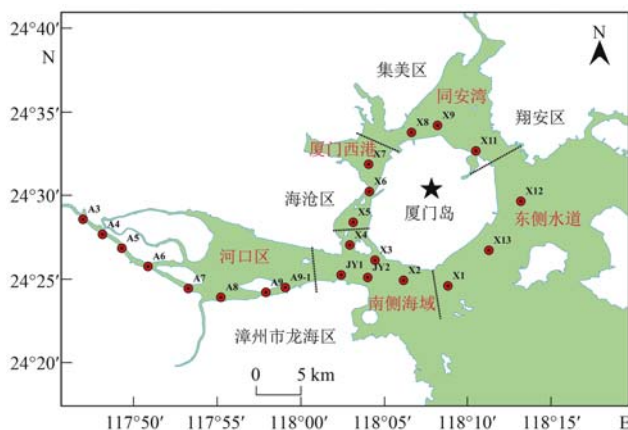


图 2 九龙江口-厦门湾采样站点示意

Fig. 2 Sampling stations in Jiulong River estuary and Xiamen Bay

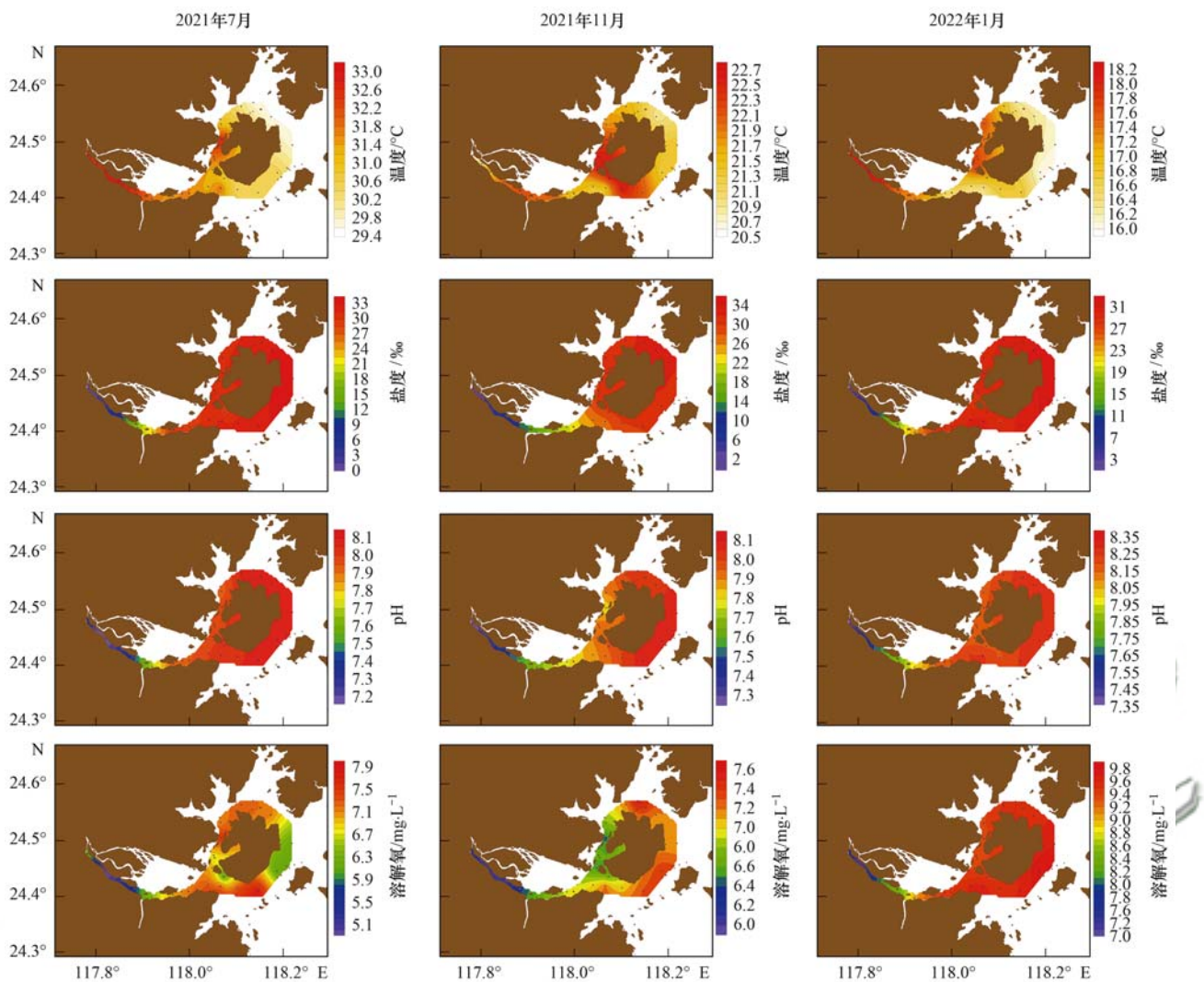


图 3 3 个航次九龙江口-厦门湾表层水温、盐度、pH 和溶解氧的水平分布

Fig. 3 Distribution of surface water temperature, salinity, pH and dissolved oxygen in Jiulong River estuary and Xiamen Bay during three voyages

布,不同种类金属受河海水混合作用影响不同.绘制了3个航次盐度和溶解态痕量金属浓度之间的关系图.如图5所示,溶解态Cr浓度随盐度增加呈现先上升后下降的趋势.2021年7月和11月航次盐度为16‰左右时,溶解态Cr浓度达到极大值.在盐度28‰~32‰区间,大部分站位溶解态 $\rho(\text{Cr})$ 保持在约 $0.100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的较低稳定浓度.2022年1月航次在盐度30.5‰时溶解态Cr浓度有极大值,推测有其他输入源的影响;高盐度区溶解态Cr浓度普遍高于另外两个航次,可能是由于此为冬季航次,调查流域处于枯水期,径流量少且水体交换弱.

Giese^[29]认为盐度是影响表层海水中Cr分布的重要因素之一.低盐度使海水水体相对稳定,阻碍水体的混合过程,故较低盐度表层海水中的Cr浓度高.Cr的分布还取决于其本身的化学形态及其与之相关的pH值等海洋环境参数.随着海水pH值递增,约90%的溶解态Cr将形成胶态 $\text{Cr}(\text{OH})_3$,而胶态 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 与悬浮态 $\text{Cr}(\text{III})$ 发生凝聚、吸附和沉

降作用最终成为底质,从而降低溶解态Cr浓度^[30,31].这也许能够解释本研究河口区呈现的低盐度、低pH和高浓度溶解态Cr现象.

2.2.2 溶解态Mn

如图4所示,2021年7月航次溶解态Mn浓度最高,范围为 $0.23 \sim 360.11 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,浓度最高值位于A5站位,最低值位于X12站位.2021年11月航次溶解态Mn浓度最低,范围为 $0.13 \sim 115.14 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,浓度最高值为A3站位,最低值为X12站位.2022年1月航次溶解态Mn浓度较高,范围为 $0.01 \sim 429.69 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,最高值位于A3站位,最低值位于X13站位.季节变化上看,海域溶解态Mn浓度大小为:夏季>冬季>秋季.河口区溶解态Mn浓度高于海湾区,河口区溶解态Mn浓度最高,东侧水道浓度最低.如图5所示,2021年7月航次河口区表层溶解态Mn浓度随盐度增加呈现先上升后下降的趋势,浓度最高站位位于河口区中上游,沿九龙江到达厦门湾后保持稳定较低浓度.2021年11月和

2022 年 1 月航次, 表层溶解态 Mn 浓度最高站位位于河口区最上游, 沿九龙江到达厦门湾浓度呈现下降的趋势, 在九龙江中下游浓度迅速降低后保持稳定较低浓度。

水体 pH 值降低可使碳酸盐和氢氧化物溶解, H^+ 的竞争吸附作用可增加痕量金属离子的解吸量, 造成溶解态痕量金属浓度的增加^[5]; pH 变化还会影响悬浮沉积物表面吸附特性和各种吸附反应, 因此水体 pH 值的变化会影响痕量金属的浓度。陈能汪等^[32]研究发现 pH 变化是锰在水环境中迁移转化的重要调控机制。提高 pH 值能促进锰的吸附, 降低水体 pH 值能促进锰的解吸。这与测定结果中河口区低 pH 和高浓度溶解态 Mn 的现象一致。

2.2.3 溶解态 Co

如图 4 所示, 2021 年 7 月航次溶解态 Co 浓度最高, 范围为 $0.004 \sim 0.596 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 最高值位于 A3 站位, 最低值位于 X12 站位。2021 年 11 月航次溶解态 Co 浓度最低, 范围为 $0.003 \sim 0.137 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 最高值位于 A3 站位, 最低值位于 X12 站位。2022 年 1 月航次流域内溶解态 Co 浓度较低, 范围为 $0.001 \sim 0.231 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 最高值位于 A3 站位, 最低值位于 X13 站位。从季节变化上看, Co 在河口区和 Mn 规律类似, 海域溶解态 Co 浓度大小为: 夏季 > 冬季 > 秋季。河口区溶解态 Co 浓度高于海湾区。3 个航次变化趋势相近, 河口区 A3 站位浓度最高, 沿流域方向逐渐降低, 在南侧海域达到稳定低值。厦门西港和同安湾站位浓度略有上升, 可能是有人为输入的影响, 东侧水道浓度达到最低值。如图 5 所示, 除河口区大部分站位溶解态 Mn 和 Co 浓度极低, 即盐度较高区域内痕量金属浓度较低, 表明流域内清除效应显著, 推测与流域内生物利用较高和 SPM 的吸附清除有关。

2.2.4 溶解态 Ni

如图 4 所示, 2021 年 7 月航次溶解态 $\rho(\text{Ni})$ 范围为 $0.23 \sim 5.55 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 最高值位于 A7 站位, 最低值位于 X12 站位。2021 年 11 月航次溶解态 $\rho(\text{Ni})$ 范围为 $0.18 \sim 8.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 最高值位于 A8 站位, 最低值位于 X12 站位。2022 年 1 月航次流域内溶解态 Ni 浓度较高, 范围为 $0.29 \sim 6.72 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 最高值位于 A7 站位, 最低值位于 X7 站位。从季节变化看, 秋冬季表层海水中溶解态 Ni 浓度高于夏季。河口区 Ni 浓度高于海湾区。2021 年 11 月航次的分布规律最为显著, 在河口区上游 A3 ~ A8 站位溶解态 Ni 浓度逐渐升高并达到最高值, 在进入厦门湾后 Ni 浓度明显降低并保持稳定的低浓度。

2.2.5 溶解态 Cu

如图 4 所示, 2021 年 7 月航次溶解态 Cu 浓度

最低, 范围为 $0.38 \sim 2.87 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 最高值位于 A7 站位, 最低值位于 X6 站位。2021 年 11 月航次溶解态 Cu 浓度最高, 范围为 $0.88 \sim 6.18 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 最高值位于 A9 站位, 最低值位于 X4 站位。2022 年 1 月航次流域内溶解态 Cu 浓度较低, 除去 X12 站位的异常高值, 范围为 $0.47 \sim 3.43 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 最高值位于 A9-1 站位, 最低值位于 X13 站位。从季节变化看, 秋冬季表层海水中溶解态 Cu 浓度高于夏季。河口区 Cu 浓度高于海湾区。海水具有自净的能力, 表层海水中溶解态 Cu 在从近岸向外海迁移的过程中, 伴随着盐度和 pH 值的升高, 不断与海水、海水中的其它痕量金属离子以及 SPM 等发生混合稀释、离子交换和吸附沉降等理化作用, 其浓度也在表层海水向深层水柱或沉积物转移过程中降低, 与本研究的测定结果一致。近岸海水中溶解态 Cu 的主要来源是陆源物质, 其浓度主要受入海排污及径流的影响。九龙江干流支流等携带的大量地壳岩石风化产物以及沿江的污染物质是造成沿岸海水中溶解态 Cu 浓度高的主要原因, 测定结果也表明河口区 Cu 浓度高于海湾区。从季节变化看, 夏季表层海水中溶解态 Cu 浓度低于秋冬季。冬季, 九龙江口-厦门湾入海径流量减少, 对入海污染物的稀释能力减弱, 高浓度的含 Cu 废水使枯水期近岸 (尤其湾内) 表层海水中溶解态 Cu 的含量明显高于丰水期。此外, Cu 为浮游植物的营养要素, 夏季海洋生物生长旺盛, 因此需要摄入相对较多的 Cu 以满足繁殖的需要^[33], 若仅考虑生物作用的影响, 推测是由于浮游植物的摄食, 导致夏季测定的溶解态 Cu 浓度最低, 故而导致溶解态 Cu 浓度在季节上的差异。

如图 5 所示, 大部分站位溶解态 Ni 和 Cu 浓度随盐度增加浓度先上升后下降。2021 年 7 月和 11 月航次盐度为 $15\text{‰} \sim 20\text{‰}$ 时, 溶解态 Ni 和 Cu 浓度达到最高值。2022 年 1 月航次 Ni 在盐度为 11.9‰ 和 18.7‰ 有极大值, Cu 在盐度为 11.9‰ 和 31.2‰ 有极大值, 推测有其他输入源的影响。在盐度为 $25\text{‰} \sim 35\text{‰}$ 的区间, 溶解态 $\rho(\text{Ni})$ 和 $\rho(\text{Cu})$ 保持约 $1.00 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的较低稳定浓度。

2.2.6 溶解态 Cd

如图 4 所示, 2021 年 7 月航次溶解态 $\rho(\text{Cd})$ 范围为 $0.004 \sim 0.097 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 最高值位于 A7 站位, 最低值位于 X6 站位。2021 年 11 月航次溶解态 $\rho(\text{Cd})$ 范围为 $0.006 \sim 0.076 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度最高为 A6 站位, 最低为 X4 站位。2022 年 1 月航次溶解态 $\rho(\text{Cd})$ 范围 $0.017 \sim 0.082 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 最高值位于 A8 站位, 最低值位于 X1 站位。季节变化表明冬季表层

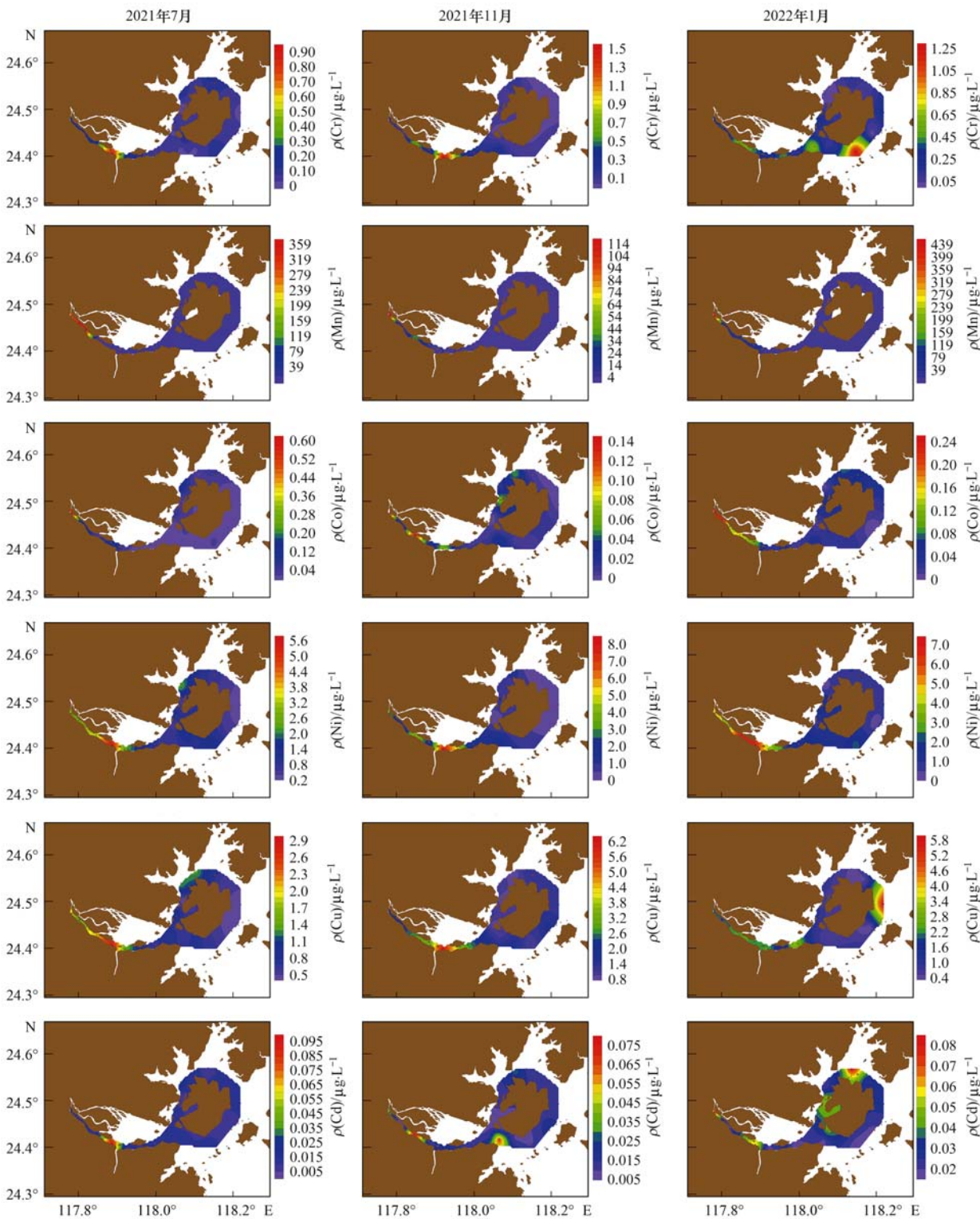


图 4 3 个航次九龙江口-厦门湾表层溶解态痕量金属 (Cr、Mn、Co、Ni、Cu 和 Cd) 的水平分布

Fig. 4 Horizontal distribution of dissolved trace metals (Cr, Mn, Co, Ni, Cu, and Cd) in the surface of Jiulong River estuary and Xiamen Bay during three voyages

海水中溶解态 Cd 浓度高于夏季. 溶解态 Cd 浓度的平面分布规律性不明显. 2021 年 7 月航次除 A7 站点浓度异常高外, 其余站点浓度均保持在较低水平, 均低于 $0.020 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 2021 年 11 月航次除 A6 和 JY2 站点 $\rho(\text{Cd})$ 高于 $0.068 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 外, 其余站点均较低且低于 $0.035 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 2022 年 1 月航次除 A3、

A7 和 X9 站点 $\rho(\text{Cd})$ 高于 $0.062 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 外, 其余站点均较低且低于 $0.050 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

沿岸江河的径流以及排污口废水的排放, 是表层海水中溶解态 Cd 浓度向外海降低的主要影响因素. 同时, 海水盐度的变化也是不可忽略的影响因素之一. 文献[30]认为 Cd 在海水中的分布主要受 Cl^{-}

的支配. 从近岸向外海, 随着盐度的升高, 海水中 Cl^- 的含量也升高, 从而促进了其与海水中溶解态 Cd 形成络合物, 络合物的絮凝或吸附沉降等去除机制使海水中溶解态 Cd 浓度降低. 如图 5 所示, 在 2021 年 7 月和 11 月航次的低盐度和高盐度区域,

大部分站位溶解态 Cd 浓度较低, 2022 年 1 月航次盐度 28‰~32‰ 区间, 溶解态 Cd 浓度较高. 3 个航次的中盐度区域溶解态 Cd 都出现了较高值, 推测有其他输入源的影响, 可能是因为河口中下游工业废水排放的干扰.

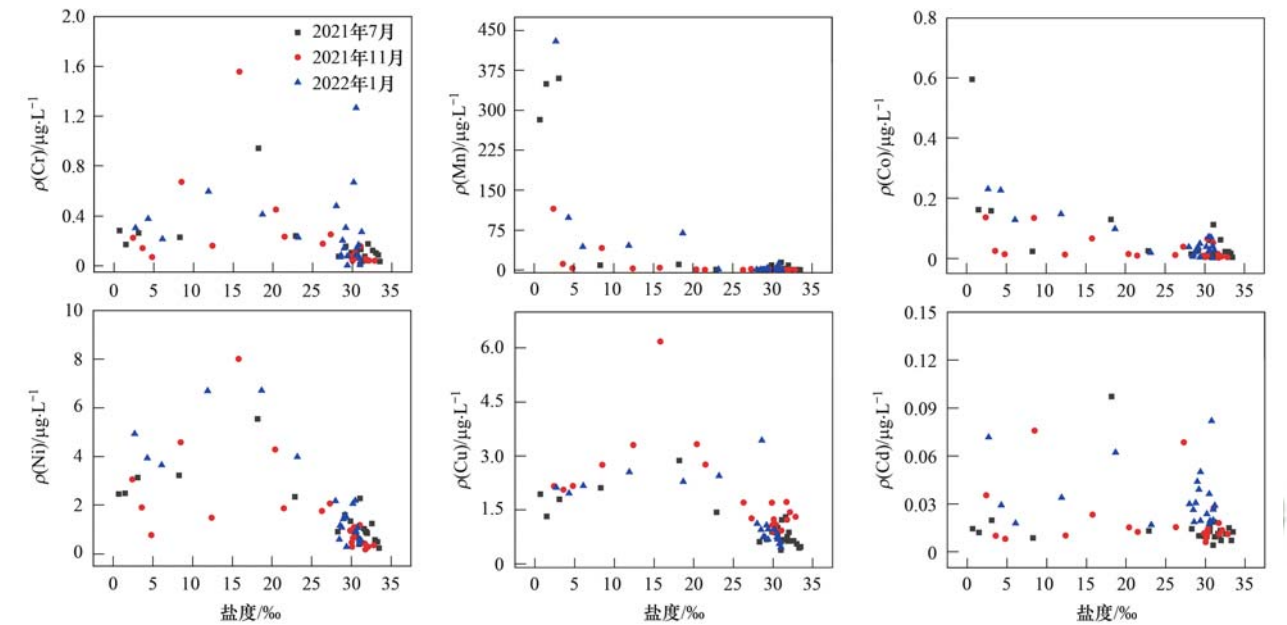


图 5 3 个航次九龙江口-厦门湾表层盐度与溶解态痕量金属 (Cr、Mn、Co、Ni、Cu 和 Cd) 的关系

Fig. 5 Relationship between surface salinity and dissolved trace Metals (Cr, Mn, Co, Ni, Cu, and Cd) in Jiulong River estuary and Xiamen Bay during three voyages

如图 6 所示, 2021 年 7 月航次九龙江口-厦门湾流域所测溶解态痕量金属浓度平均值大小顺序: $\text{Mn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Co} > \text{Cd}$. 河口区溶解态痕量金属浓度平均值大小顺序: $\text{Mn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Co} > \text{Cd}$, 海湾区溶解态痕量金属浓度平均值大小顺序: $\text{Mn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Co} > \text{Cd}$. 2021 年 11 月航次九龙江口-厦门湾流域所测溶解态痕量金属浓度平均值大小顺序: $\text{Mn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Co} > \text{Cd}$. 河口区溶解态痕量金属浓度平均值大小顺序: $\text{Mn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Co} > \text{Cd}$, 海湾区溶解态痕量金属浓度平均值大小顺序: $\text{Mn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Co} > \text{Cd}$. 2022 年 1 月航次九龙江口-厦门湾流域所测溶解态痕量金属浓度平均值大小顺序: $\text{Mn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Co} > \text{Cd}$. 河口区溶解态痕量金属浓度平均值大小顺序: $\text{Mn} > \text{Ni} > \text{Cu}$

$> \text{Cr} > \text{Co} > \text{Cd}$, 海湾区溶解态痕量金属浓度平均值大小顺序: $\text{Mn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Cd} > \text{Co}$. 在 3 个航次调查范围内, 九龙江口-厦门湾流域所测溶解态痕量金属浓度平均值大小顺序: $\text{Mn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Co} > \text{Cd}$. 河口区痕量金属浓度一般高于海湾区. 2022 年 1 月是冬季航次, 流域处于枯水期, 对痕量金属的稀释作用减弱, 故多数痕量金属冬季浓度高于夏季. 调查区域内 Mn 浓度最高, 可能是因为它主要受控于自然因素, 通过风化岩石和城市土地带来的背景值较高. Cd 的颗粒活性较大, 容易吸附在颗粒物表面沉降后从水体迁出, 因而可能导致浓度最低. 与国内其他流域进行比较 (表 1), 研究区域的痕量金属浓度水平正常, 未见异常高值, 污染情况不严重.

表 1 国内其他流域中溶解态痕量金属的浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Concentrations of dissolved trace metals in other river basins in the country/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$								文献
海域	年份	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Cd	
九龙江口	2021	0.003 ~ 1.557	0.01 ~ 360.11	0.001 ~ 0.596	0.18 ~ 8.01	0.38 ~ 6.18	0.004 ~ 0.097	本研究
珠江口	2009	—	2.1 ~ 1 660	—	—	7 ~ 17	0.09 ~ 0.81	[16]
长江	2010	—	—	—	—	2.89 ~ 3.66	0.08 ~ 0.09	[18]
黄河	2017	—	—	2.36 ~ 17.7	0.198 ~ 0.703	2.8 ~ 15.0	—	[34]
九龙江	2013	0.683 ~ 38.105	—	—	0.000 ~ 38.376	0.580 ~ 118.792	0.000 ~ 0.616	[35]
天然淡水		0.5	—	0.05	0.3	1.8	0.07	[36]
天然海水		0.08	—	0.04	0.2	0.04 ~ 0.1	0.01	[36]

1) “—”表示文章中没有相关数据

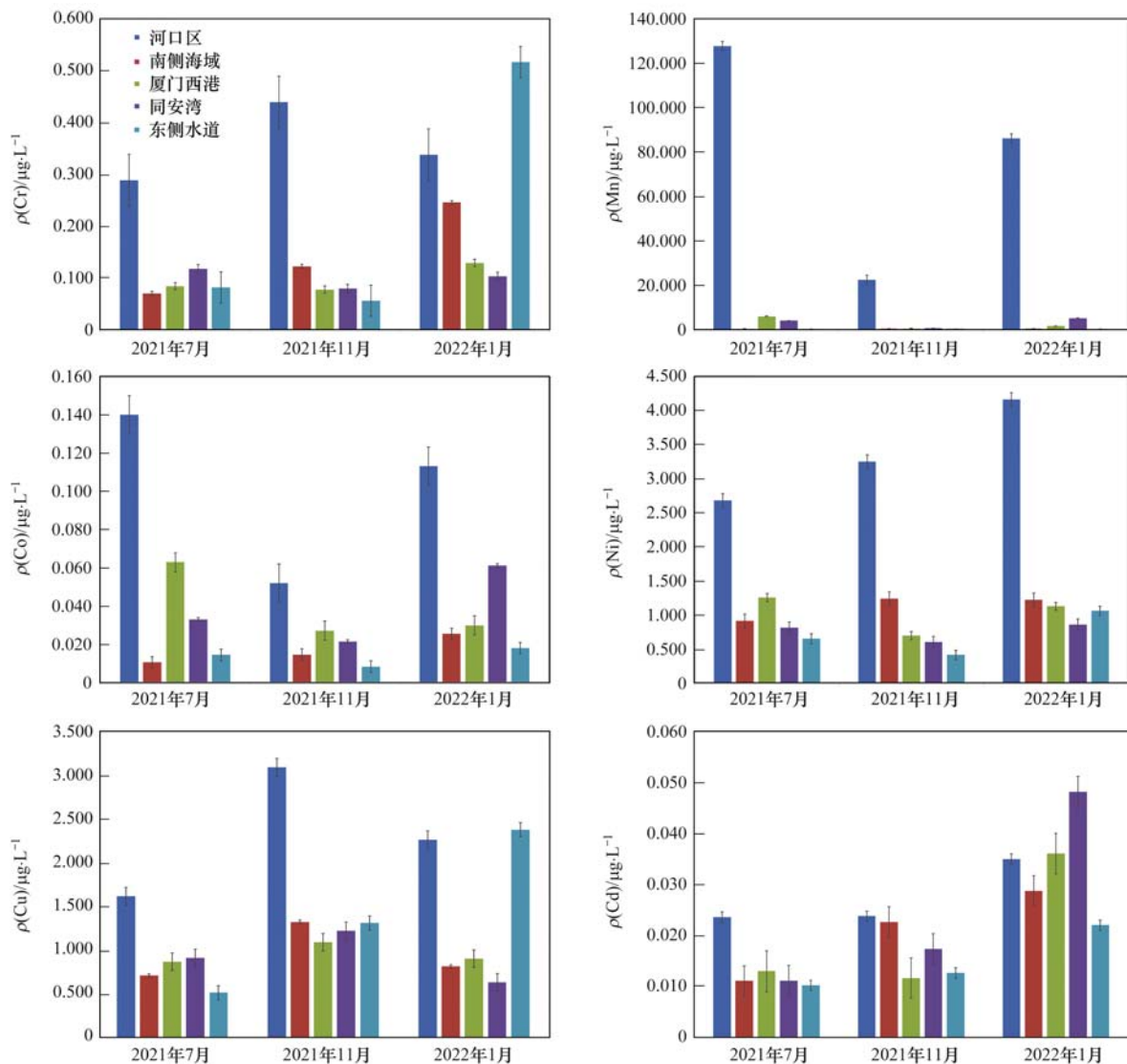


图6 3个航次九龙江口-厦门湾表层溶解态痕量金属(Cr、Mn、Co、Ni、Cu和Cd)不同区域的浓度平均值

Fig. 6 Average concentrations of dissolved trace metals (Cr, Mn, Co, Ni, Cu, and Cd) in different areas at the surface of Jiulong River estuary and Xiamen Bay during three voyages

2.3 来源分析

痕量金属污染源可以归为4个主要类型:自然排放、农业排放、工业排放和生活排放.其中,自然排放是指岩石等由于气候等非人为因素引起的风化作用,主要排放Mn、Co、Ni和Cu等痕量金属^[37];农业排放是指农业活动中产生的农业废弃物,主要排放痕量金属包括农药化肥中的Cd和Cu^[38,39];工业排放是指矿产开采冶炼、金属和非金属等加工制造过程中产生的工业废弃物,其排放的痕量金属种类很多,如Cd和Cu等^[40];生活排放是指人类生活中产生的废弃物,包含痕量金属Cd、Cr、Ni和Cu等^[41,42].

以2021年7月航次已经确定的参数为例进行相关性分析,痕量金属元素与温度和SPM呈正相关关系,与盐度、pH和DO呈负相关关系(表2),结果表明痕量金属的吸附解吸过程在九龙江口-厦门湾

区域表现明显.痕量金属元素可以通过吸附到 FeO_x 与浮游植物表面结合^[43].pH和盐度会影响溶解态痕量金属元素在海水中的存在形态^[44]以及生物丰度,进而影响吸附过程.对于河口系统,SPM对痕量金属吸附解吸也是形态转换的重要途径之一^[45].

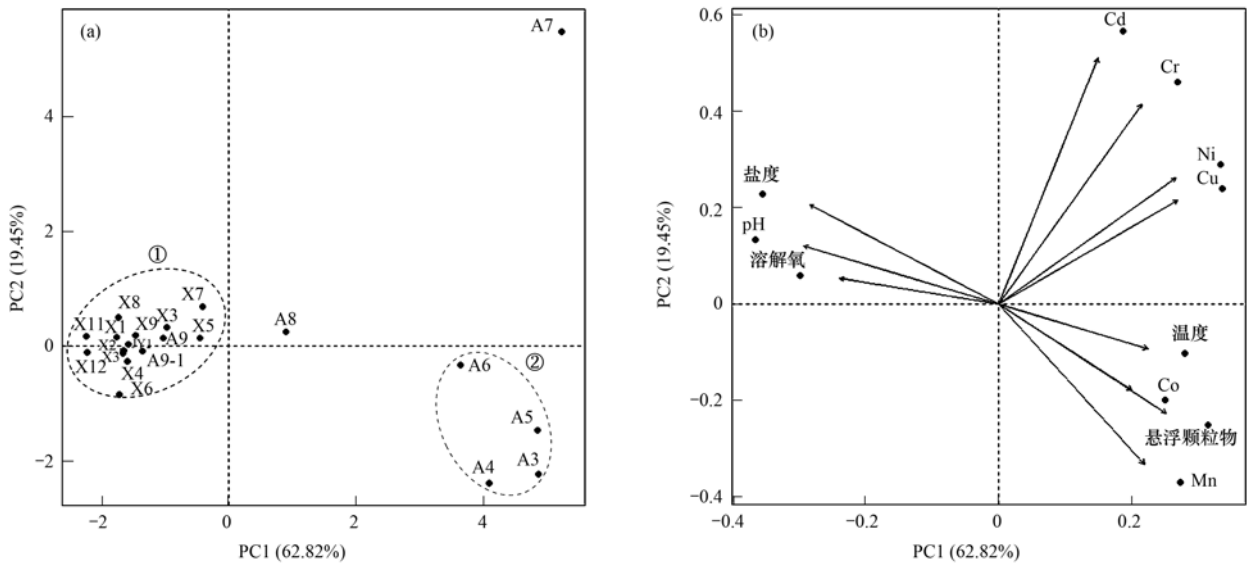
为了进一步揭示九龙江口-厦门湾痕量金属元素和环境因素的区域动态,进行主成分分析,以推测其分布来源.采用Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)和Bartlett's球状检验计算,KMO统计值为0.762,Bartlett's球状检验结果小于0.05,表明数据适用于PCA分析.前两个主成分分别解释了方差62.82%(PC1)和19.45%(PC2),累积方差为82.27%(图7).

九龙江样本集中于PC1正轴分组,厦门湾样本则在负轴集中,河口区与海湾不同水文环境对溶解态痕量金属元素存在显著影响[图7(a)].厦门

表 2 痕量金属元素与环境因素之间的相关性¹⁾
Table 2 Correlation between trace metal elements and environmental factors

	Cr	Mn	Cu	Co	Ni	Cd	温度	盐度	pH	溶解氧	悬浮颗粒物
Cr	1										
Mn	0.179	1									
Cu	0.840 **	0.402	1								
Co	0.349	0.687 **	0.513 *	1							
Ni	0.892 **	0.391	0.940 **	0.417	1						
Cd	0.924 **	0.008	0.679 **	0.170	0.750 **	1					
温度	0.371	0.497 *	0.579 **	0.433 *	0.587 **	0.240	1				
盐度	-0.440 *	-0.854 **	-0.717 **	-0.697 **	-0.682 **	-0.195	-0.726 **	1			
pH	-0.529 *	-0.784 **	-0.783 **	-0.585 **	-0.774 **	-0.308	-0.770 **	0.976 **	1		
溶解氧	-0.467 *	-0.597 **	-0.619 **	-0.328	-0.641 **	-0.276	-0.498 *	0.769 **	0.817 **	1	
悬浮颗粒物	0.347	0.727 **	0.632 **	0.600 **	0.588 **	0.060	0.612 **	-0.893 **	-0.873 **	-0.645 **	1

1) * 表示 0.05 水平的相关性显著(双尾), ** 表示 0.01 水平的相关性显著(双尾)



(a) 为站位主成分分析载荷结果,圈①内为厦门湾采集站位,圈②内为九龙江采集站位,
(b) 为痕量金属元素与环境因素主成分分析载荷结果

图 7 2021 年 7 月航次两个主成分上溶解态痕量金属的载荷结果

Fig. 7 Load results of dissolved trace metals on two principal components during the July 2021 voyage

湾区域低浓度溶解态痕量金属元素与该区域高盐度、高 pH 和较高 DO 特点有关.受九龙江南溪支流和南港入海口影响,A7 站位在 PC2 正轴上载荷较高.A8 站位因远离九龙江南港入海口,受海湾区影响较大.痕量金属元素和环境因素的主成分分析结果在 PC1 组分上与相关性分析结果一致[图 7 (b)],温度和 SPM 的吸附解吸过程对溶解态痕量金属元素具有直接影响.SPM 的吸附解吸对 Mn 和 Co 具有显著影响,表明自然排放占主要因素. Cu 和 Ni 在 PC2 距离较近,表明二者来源相似,除自然排放因素外,二者与生活污染排放有关. Cd 污染源一般划定为农业或工业污染,在分析结果上具有独立性. Cr 主要来源于生活污染排放,与 Cu 和 Ni 来源具有一定相似性,因此其载荷结果与 Cu 和 Ni 相近但又不同于二者.

3 结论

- (1) 九龙江口-厦门湾流域所测溶解态痕量金属浓度平均值大小顺序: Mn > Ni > Cu > Cr > Co > Cd. 可能是因为流域内 Mn 背景值较高导致 Mn 浓度最高;可能是由于 Cd 的颗粒活性相对较大,容易从水体迁出,导致其浓度最低.
- (2) 九龙江口-厦门湾流域水体中溶解态痕量金属浓度的时空分布表明:河口区溶解态痕量金属浓度高于海湾区. Mn 夏季浓度高于冬季, Ni、Cu 和 Cd 冬季浓度高于夏季. 河口区受到陆源输入和人为影响较大.
- (3) 与痕量金属浓度分布有关的各个参数对其影响并非单一,是较为复杂的耦合作用. 对 2021 年 7 月航次表层水中溶解态痕量金属及影响因素进行

相关性分析和主成分分析评估,结果表明,PC1 的主要影响因素为河口径流,PC2 的主要影响因素为人类活动。

参考文献:

- [1] Morel F M M, Price N M. The biogeochemical cycles of trace metals in the oceans[J]. *Science*, 2003, **300** (5621): 944-947.
- [2] Spencer D W, Robertson D E, Turekian K K, *et al.* Trace element calibrations and profiles at the Geosecs Test Station in the northeast Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, **75**(36): 7688-7696.
- [3] Bruland K W, Middelg R, Lohan M C. Controls of trace metals in seawater[J]. *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*, 2014, **8**: 19-51.
- [4] 张正斌. 海洋化学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2004.
- [5] 李莉, 张卫, 白娟, 等. 重金属在水体中迁移转化过程分析[J]. *山东水利*, 2010, (S1): 31-33, 36.
- Li L, Zhang W, Bai J, *et al.* Process analysis of transportation and conversion of heavy metals in water[J]. *Shandong Water Resources*, 2010, (S1): 31-33, 36.
- [6] Liu X B, Li D L, Song G S. Assessment of heavy metal levels in surface sediments of estuaries and adjacent coastal areas in China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2017, **11**(1): 85-94.
- [7] Harmesa, Wahyudi A J. Two approaches to measure trace metals fluxes at the sediment-water interface: sediment porewater profile and benthic incubation[J]. *ASEAN Journal on Science & Technology for Development*, 2020, **37**(3): 135-143.
- [8] Bastami K D, Neyestani M R, Shemirani F, *et al.* Heavy metal pollution assessment in relation to sediment properties in the coastal sediments of the southern Caspian Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **92**(1-2): 237-243.
- [9] Suresh G, Ramasamy V, Sundarajan M, *et al.* Spatial and vertical distributions of heavy metals and their potential toxicity levels in various beach sediments from high-background-radiation area, Kerala, India[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **91**(1): 389-400.
- [10] Hu B Q, Li J, Zhao J T, *et al.* Heavy metal in surface sediments of the Liaodong Bay, Bohai Sea: distribution, contamination, and sources[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(6): 5071-5083.
- [11] Pan K, Wang W X. Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **421-422**: 3-16.
- [12] Krishnakumar P, Lakshumanan C, Jonathan M P, *et al.* Trace metal in beach sediments of Velanganni Coast, South India: application of autoclave leach method[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, **7**(7): 2655-2665.
- [13] Venkatraman S, Ramkumar T, Anithamary I, *et al.* Heavy metal distribution in surface sediments of the Tirumalairajan river estuary and the surrounding coastal area, east coast of India[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, **7**(1): 123-130.
- [14] Emam A, Saad-Eldin M. Distribution and environmental geochemistry of some heavy metals in stream sediments of Wadi Allaqi, south eastern desert of Egypt[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, **6**(5): 1325-1332.
- [15] 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.
- [16] Wang D L, Lin W F, Yang X Q, *et al.* Occurrences of dissolved trace metals (Cu, Cd, and Mn) in the Pearl River estuary (China), a large river-groundwater-estuary system[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, **50-51**: 54-63.
- [17] 廖宝淦, 刘秋辛, 贾珍珍, 等. 珠江口磨刀门水体中重金属分布、分配特征及其影响因素[J]. *海洋环境科学*, 2021, **40**(1): 8-15.
- Liao B G, Liu Q X, Jia Z Z, *et al.* Heavy metal distribution patterns and their influence factors in Modaomen estuary of the pearl river[J]. *Marine Environmental Science*, 2021, **40**(1): 8-15.
- [18] An Q, Wu Y Q, Wang J H, *et al.* Assessment of dissolved heavy metal in the Yangtze River estuary and its adjacent sea, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **164**(1-4): 173-187.
- [19] Chu X D, Wu D S, Wang H, *et al.* Spatial distribution characteristics and risk assessment of nutrient elements and heavy metals in the Ganjiang River basin[J]. *Water*, 2021, **13**(23), doi: 10.3390/w13233367.
- [20] 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.
- [21] Liang B, Han G L, Liu M, *et al.* Distribution, sources, and water quality assessment of dissolved heavy metals in the Jiulongjiang River water, Southeast China[J]. *Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(12), doi: 10.3390/ijerph15122752.
- [22] 甄晓桐, 李力, 王小静, 等. 黄、渤海几种溶解态痕量金属(Cu、Ni、Co、Zn)分布特征及其影响因素[J]. *海洋与湖沼*, 2019, **50**(5): 1022-1032.
- Zhen X T, Li L, Wang X J, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of several dissolved trace metals (Cu, Ni, Co, Zn) in the Yellow Sea and the Bohai Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2019, **50**(5): 1022-1032.
- [23] 任艺君, 李力, 王小静, 等. 中国黄、渤海海水中溶解态镉的形态研究[J]. *海洋科学进展*, 2020, **38**(2): 263-275.
- Ren Y J, Li L, Wang X J, *et al.* Cd speciation of seawater in the Yellow Sea and the Bohai Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, **38**(2): 263-275.
- [24] 黄金良, 黄亚玲, 李青生, 等. 流域水质时空分布特征及其影响因素初析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1098-1107.
- Huang J L, Huang Y L, Li Q S, *et al.* Preliminary analysis of spatiotemporal variation of water quality and its influencing factors in the Jiulong river watershed[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1098-1107.
- [25] Huang J L, Li Q S, Pontius R G Jr, *et al.* Detecting the dynamic linkage between landscape characteristics and water quality in a subtropical coastal watershed, southeast China[J]. *Environmental Management*, 2013, **51**(1): 32-44.
- [26] 李太清. 九龙江流域龙岩段水环境整治情况调查及对策建议[J]. *山东省农业管理干部学院学报*, 2012, **29**(5): 44-46.
- [27] 蔡志伟. 漳州市水资源的开发利用与对策[J]. *水利规划与设计*, 2005, (3): 23-24, 49.
- Cai Z W. Development, utilization of water resources and countermeasures in Zhangzhou City[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2005, (3): 23-24, 49.
- [28] 郑建华. 厦门市饮用水水源地环境保护的现状和建议[J]. *厦门科技*, 2007, (3): 31-34.

- [29] Giese H. Investigations of the specification of chromium in sea water, sea ice and snow in selected areas of the Arctic [R]. Berlin: EPA, 1997.
- [30] Gaillardet J, Viers J, Dupré B. Trace elements in river waters [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2014, **7**: 195-235.
- [31] 陈国珍. 海水痕量元素分析[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [32] 陈能汪, 王德利, 鲁婷, 等. 九龙江流域地表水锰的污染源和迁移转化机制[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(8): 2955-2964.
- Chen N W, Wang D L, Lu T, *et al.* Manganese pollution in the Jiulong River watershed: sources and transformation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(8): 2955-2964.
- [33] 孙维萍, 潘建明, 吕海燕, 等. 2006 年夏冬季长江口、杭州湾及邻近海域表层海水溶解态重金属的平面分布特征[J]. *海洋学研究*, 2009, **27**(1): 37-43.
- Sun W P, Pan J M, Lv H Y, *et al.* Distribution of dissolved trace metals in summer and winter of 2006 in Changjiang River Estuary and Hangzhouwan Bay [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2009, **27**(1): 37-43.
- [34] Li L, Wang X J, Liu J H, *et al.* Dissolved trace metal (Cu, Cd, Co, Ni, and Ag) distribution and Cu speciation in the southern Yellow Sea and Bohai Sea, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, **122** (2): 1190-1205.
- [35] 张莉, 祁士华, 瞿程凯, 等. 福建九龙江流域重金属分布来源及健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(8): 2133-2139.
- Zhang L, Qi S H, Qv C K, *et al.* Distribution, source and health risk assessment of heavy metals in the water of Jiulong River, Fujian [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(8): 2133-2139.
- [36] 王长友, 王修林, 孙百晔, 等. 东海主要重金属生态基准浓度初步研究[J]. *海洋环境科学*, 2009, **28**(5): 544-548.
- Wang C Y, Wang X L, Sun B Y, *et al.* Primary study on ecological criterion of heavy metals in East China Sea [J]. *Marine Environmental Science*, 2009, **28**(5): 544-548.
- [37] 朴河春, 袁芷云, 洪业汤. 碳及重金属在岩石风化过程中释放规律的初步研究[J]. *地球化学*, 1987, (3): 269-273.
- Piao H C, Yuan Z Y, Hong Y T. A preliminary study of the rule of release of carbon and heavy metals during weathering of rocks [J]. *Geochimica*, 1987, (3): 269-273.
- [38] 王起超, 麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险[J]. *农村生态环境*, 2004, **20**(2): 62-64.
- Wang Q C, Ma Z W. Heavy metals in chemical fertilizer and environmental risks [J]. *Rural Eco-Environment*, 2004, **20**(2): 62-64.
- [39] Atafar Z, Mesdaghinia A, Nouri J, *et al.* Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **160**(1-4): 83-89.
- [40] 张家旗. 我国省域工业废水重金属排放绩效研究[D]. 开封: 河南大学, 2014.
- Zhang J Q. Research on the performance of heavy metal emissions from industrial wastewater in China [D]. Kaifeng: Henan University, 2014.
- [41] 孙玉焕, 骆永明, 吴龙华, 等. 长江三角洲地区城市污水污泥重金属含量研究[J]. *环境保护科学*, 2009, **35**(4): 26-29, 37.
- Sun Y H, Luo Y M, Wu L H, *et al.* Heavy metals concentration in sewage sludge of Yangtze River delta [J]. *Environmental Protection Science*, 2009, **35**(4): 26-29, 37.
- [42] 李娟英, 陈洁芸, 沈燕萍, 等. 污水污泥及其浸出液重金属污染的化学分析与评价[J]. *安全与环境学报*, 2013, **13**(3): 115-121.
- Li J Y, Chen J Y, Shen Y P, *et al.* Chemical analysis and assessment of the heavy metal pollution in the sewage sludge and leaching solution [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2013, **13**(3): 115-121.
- [43] Tang D G, Morel F M M. Distinguishing between cellular and Fe-oxide-associated trace elements in phytoplankton [J]. *Marine Chemistry*, 2006, **98**(1): 18-30.
- [44] Zirino A, Yamamoto S. A pH-dependent model for the chemical speciation of copper, zinc, cadmium, and lead in seawater [J]. *Limnology and Oceanography*, 1972, **17**(5): 661-671.
- [45] Batley G E, Gardner D. A study of copper, lead and cadmium speciation in some estuarine and coastal marine waters [J]. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 1978, **7**(1): 59-70.

CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University	HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review	LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary	CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach	YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay	QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province	YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen	PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn ²⁺ by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters	ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS	XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes	XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019	FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley	CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM _{2.5} Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas	QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing	FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China	SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed	CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season	LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau	LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope	ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir	HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation	WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems	ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions	DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis	TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis	LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China	SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N ₂ O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions	TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis	LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model	GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS	ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd ²⁺ Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area	WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils	LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil	ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L.	SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing	FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios	HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity	CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes	SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction	LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China	HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings	YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China	LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)