

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角典型站点冬季大气 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 污染特征	康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)
南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用	于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)
常州夏冬季 $PM_{2.5}$ 中无机组分昼夜变化特征与来源解析	刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)
天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的元素特征	王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)
北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价	张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许晓鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)
山西省武乡县城大气 $PM_{2.5}$ 痕量重金属的生态和健康风险分析	郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)
隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征	李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)
河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征	王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)
城市道路行道树池裸地扬尘排放特征	李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)
DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响	楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)
南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律	黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)
广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险	樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)
西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源	张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)
太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程	李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)
海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价	曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)
天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响	许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)
太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析	查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)
春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性	李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)
不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素	周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)
水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响	孙祥, 朱广伟, 笪文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)
深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替	商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 刘珍芳, 刘彤彤 (1141)
太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素	薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)
分层型水源水库沉积物需氧量特性	苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)
污水氮浓度和 NH_4^+ / NO_3^- 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)
水体氮磷营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响	周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)
化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除	菅之奥, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)
铜铁氧体法处理模拟染料废水	韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)
草酸根对 α -FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验	苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚炯 (1202)
生物质基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性	邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)
铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性	郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)
PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能	刘泽琨, 周少奇, 马福臻 (1233)
二氧化钛对地下水砷的吸附及再生回用	马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)
一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制	李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)
中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征	闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)
硝化耦合 CANON 的铁锰生物净化工艺启动与运行	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)
纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)
DO/ NH_4^+ -N 实现短程硝化过程中生物膜特性	赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)
AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响	成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)
有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响	李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)
中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性	周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)
硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响	吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)
磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响	宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)
好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分	杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)
环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响	戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈吕军 (1333)
CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析	邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)
磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响	王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)
甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征	薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)
城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律	徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀臻, 郭明月 (1365)
氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落	严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)
近 30 年干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素	江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 卞荣禧 (1386)
中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性	王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)
滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系	解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)
青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价	周雯雯, 李军, 胡健, 李兆洲 (1413)
基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤金属源解析	卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)
铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用	费群, 阎秀兰, 李永华 (1430)
我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征	王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)
《环境科学》征订启事 (979) 《环境科学》征稿简则 (996) 信息 (1022, 1064, 1293)	

海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价

曾维特^{1,2,3,4}, 杨永鹏⁴, 张东强^{5*}, 刘兵^{1,3}, 张航飞⁶, 吴多誉⁶, 王晓林⁴

(1. 海南省海洋地质调查局, 海口 570206; 2. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 3. 海南省地质局, 海口 570206; 4. 海南省地质调查院, 海口 570206; 5. 海南省地质综合勘察院, 海口 570206; 6. 海南地质综合勘察设计院, 海口 570206)

摘要: 基于海南岛北部海口湾、铺前湾、东寨港和木兰湾海域 159 站位表层沉积物地球化学测试分析, 查明沉积物中重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb 和 Zn 分布特征。运用数理统计方法研究重金属来源并明确其分布主控因素, 建立主控因素与重金属含量间定性或半定量关系。评价各重金属元素及其总体污染状况和潜在生态风险。结果表明, 研究区海域沉积物重金属中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb 和 Zn 含量平均值分别为 8.40、0.06、32.50、8.32、0.02、18.77 和 35.87 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Cr、Cu、Hg、Pb 和 Zn 含量高值区主要分布于近岸河流入海口及港湾内部, As 由南向北其含量逐渐增加, Cd 主要聚集于海口湾内。沉积物中 Cu、Zn、Hg、Pb、Cr 和 Cd 主要来自陆源输入, 包括人为污染和母岩风化产物运移两方面因素, As 或有海外物质来源。沉积物中 Cu、Zn、Hg、Pb 和 Cr 含量分布主控因素为沉积物粒度, 即沉积物粒度越细, 其所吸附并积累重金属含量越高; As 高含量主要受控于自然地质背景; Cd 含量分布则反映了城市发展进程对地区污染差异性影响。所调查 159 站位表层沉积物中 As、Cr 分别有 3 站位和 6 站位属 II 类海洋沉积物, 污染程度中等, 其余各站位及重金属元素含量均为 I 类沉积物, 污染程度低, 单因子污染影响程度依次为 As > Cr > Pb > Zn > Cu > Cd > Hg。沉积物重金属总体为低程度污染, 总体潜在生态风险低, 研究区海域底质生态环境优良。各重金属元素潜在生态危害程度低, 生态危害影响依次为 As > Hg > Cd > Pb > Cu > Cr > Zn, As 是最主要的生态风险因子。

关键词: 海南岛; 北部海湾; 重金属; 来源; 分布特征; 主控因素; 生态风险评价

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1085-10 DOI: 10.13227/j.hjks.201705159

Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China

ZENG Wei-te^{1,2,3,4}, YANG Yong-peng⁴, ZHANG Dong-qiang^{5*}, LIU Bing^{1,3}, ZHANG Hang-fei⁶, WU Duo-yu⁶, WANG Xiao-lin⁴

(1. Hainan Marine Geological Survey, Haikou 570206, China; 2. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Hainan Bureau of Geology, Haikou 570206, China; 4. Hainan Geological Survey, Haikou 570206, China; 5. Hainan Geological Comprehensive Survey, Haikou 570206, China; 6. Hainan Geological Survey and Designing Institute, Haikou 570206, China)

Abstract: The distribution characteristics of the content of As, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn, and Cd were researched based on the geochemical analysis of 159 surface sediment samples in Haikou Bay, Puqian Bay, Dongzhai Harbor, and Mulan Bay. Mathematical statistics methods were used to interpret the sources of heavy metals, and the main controlling factors for heavy metal distribution were confirmed, having been analyzed qualitatively and semi-quantitatively. The results showed that the average contents of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, and Zn were 8.40, 0.06, 32.50, 8.32, 0.02, 18.77, and 35.87 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. High contents of Cr, Cu, Hg, Pb, and Zn are mainly distributed in estuaries and harbors. The content of As increased gradually from south to north in the research area, while Cd gathered mainly in Haikou Bay. The source of Cu, Zn, Hg, Pb, Cr, and Cd in sediment was terrestrial input, which was controlled by anthropogenic pollution and migration of weathered products from mother rock. The source of As could be overseas material input. The grain size of sediment was the main factor controlling the contents of Cu, Zn, Hg, Pb, and Cr, and it was found that sediments with a finer grain size have more heavy metals adsorbed. The high As content was controlled mainly by the natural geological background factor, while the content of Cd reflected the difference in regional pollution caused by differing development in

收稿日期: 2017-05-16; 修订日期: 2017-07-07

基金项目: 海南省重点科技计划项目(ZDXM2014092); 海南省国土资源厅重点项目(HZ2015-137); 海南自然科学基金项目(417295); 中国-东盟海上合作基金项目; 海南省博士后资助项目

作者简介: 曾维特(1986~), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为海洋地质环境, E-mail: zengweite@126.com

* 通信作者, E-mail: zhangdongqiang83@163.com

cities. Three surface sediment samples were evaluated as class II of the National Marine Sediment Standard due to the content of As, while six surface sediment samples were evaluated as class II due to the content of Cr, of which the pollution degree was moderate. The concentrations of Cd, Cu, Hg, Pb, and Zn in all of the 159 sediment samples fall in the I class, of which the pollution degree is low. The degree of pollution for seven heavy metals were arranged in the following order: As > Cr > Pb > Zn > Cu > Cd > Hg. The potential ecological risk assessment results indicated that all heavy metals in surface sediment caused low levels of pollution generally, and that each heavy metal element was at a low ecological risk level. The order for the ecological risk of the seven heavy metals was: As > Hg > Cd > Pb > Cu > Cr > Zn; therefore, As was the main ecological risk factor. In general, the potential ecological risk for heavy metals was low, which illustrated that the marine environment in the study area was excellent.

Key words: Hainan Island; north bay; heavy metal; source; distribution; controlling factors; ecological risk assessment

重金属作为非生物降解累积型污染物,可由地表径流、大气沉降及近海直排等各种途径进入海洋^[1-3],海水中重金属与悬浮颗粒通过吸附、络合和沉淀等作用进而向沉积物中转移并富集^[4-8],当水体环境条件发生变化时,重金属亦可从沉积物中重新释放至上覆水体,造成水体“二次污染”^[9-11],这种“源”和“汇”相互转化,对海域生态系统造成严重危害^[12,13].此外,Hg、Pb和Cd等重金属不能被生物降解,可通过食物链传递直接威胁人体健康^[14-18].沉积物中重金属污染作为重要的环境质量指标之一,蕴含着丰富的海洋地质和环境信息,能够指示污染状况,为评价生态风险提供重要帮助.

海南岛是中国第二大海岛,拥有丰富的海域资源.2009年12月末,海南省国际旅游岛建设经国务院批复正式提升为国家战略,2015年中共海南省委提出,“十三五”期间海南省要实施海洋强省战略,着力打造“一带一路”战略支点.位于海南岛北部海口市的海口湾、文昌市的铺前湾、木兰湾为海南省的重点海湾(图1),近年来由于水产养殖行业迅猛

发展和近岸填海造陆工程加速进行,致使海湾资源过量开发,与此同时农业生产及城镇生活排污导致海湾环境恶化,海湾生态遭受到不同程度的破坏^[19-23].本次研究工作以海口湾、铺前湾、东寨港和木兰湾海域所采集159站位表层沉积物为对象,通过测试沉积物中重金属元素含量查明其分布特征,运用相关性分析、因子分析等数理统计方法研究沉积物中重金属元素来源,进而分析影响其分布主控因素,建立主控因素与重金属含量间定性或半定量关系,分别采用单因子污染指数法和生态风险指数法评价各重金属元素及其总体对研究区海域污染状况和潜在生态风险,揭示人类活动对海洋生态的影响并预测其发展和演变趋势,以期为了保护海湾生态环境,制定海湾经济、资源开发利用与海洋环境保护协调发展决策提供科学依据.

1 研究区概况

本次研究区域位于海南岛北部,西至新海村岬角,东至木兰头,包括海口湾、铺前湾、木兰湾30 m

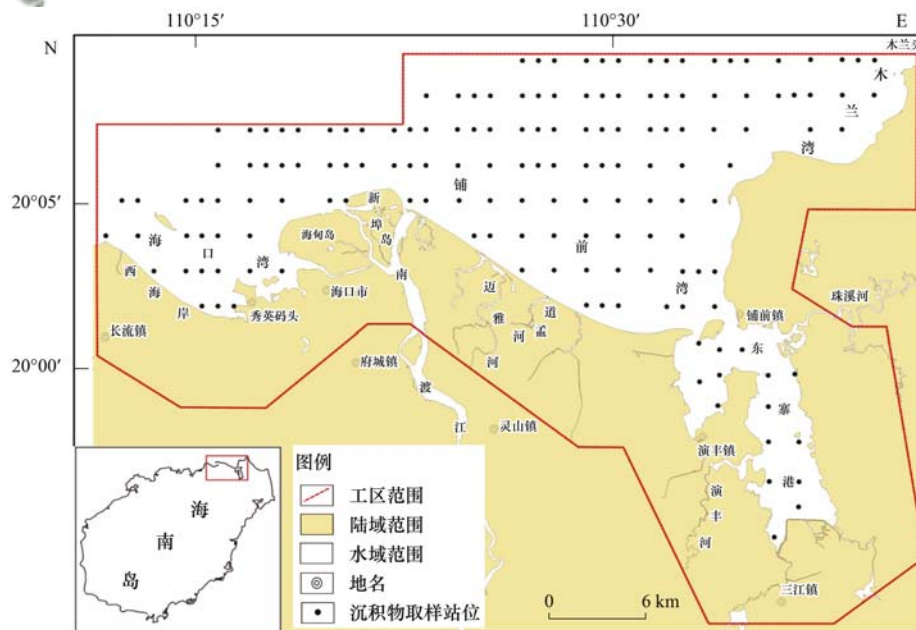


图1 海南岛北部海湾研究区范围

Fig. 1 Location of study areas

以浅海域并向内陆延伸 5 km(图 1),工作区海域面积约 600 km².

研究区跨海口、文昌 2 市,属热带海洋季风气候. 陆域地貌主要发育剥蚀堆积平原、火山岩台地、河海混合堆积三角洲平原、滨海堆积平原^[24,25]. 调查区靠岸一侧海底地形平坦,向海峡中央地势逐渐变陡,东部地势较为平缓,大部分水深在 40 m 以内,西部水深变化大,地形坡度陡倾,海口湾西北角最大水深可达 112 m^[26]. 研究区海湾全年以风浪为主,常浪向为 NEE 向,次常浪向为 NE 向;潮汐属不正规日潮,潮流亦为不正规日潮流,最大涨潮流向大体向东,落潮流向向西,呈往复流性质^[26]. 区内主要河流为南渡江,发源于白沙县南华山,在海口湾东侧和铺前湾西侧的海甸岛、新埠岛地区入海,调查区内流程 5 km. 海口湾海域污染物主要来自沿岸工业废水,生活污水和入海河流径流^[21]. 铺前湾、木兰湾内污染物主要为水产养殖废水排放,无工业污染,生活污染等^[20].

2 材料与方法

2.1 样品采集

工区海域表层沉积物取样站位按网度 2 km×2 km 布设,海口湾及工区北部海域取样网度加密为 1 km×2 km,共采集 159 件表层沉积物样品. 样品采取使用抓斗式取样器,取样深度为 0~10 cm,取样重量不少于 2 kg,将所采集沉积物样品置于聚乙烯袋中进行密封,并立即冷藏于 4℃ 的冷藏箱中. 所有样品的采集、贮存、运输、预处理按《海洋监测规范》(GB 17378-2007)中的相关规定进行^[27].

2.2 测试方法

沉积物粒度分析和重金属元素测试在海南省地质测试研究中心完成. 粒度分析首先取适量原样充分混合均匀后在 80℃ 下烘干. 对于粒径小于 2 000 μm 的样品,取干样 2.0 g 左右,用蒸馏水浸泡并滴加 0.05 mol·L⁻¹六偏磷酸钠,在烧杯中静置 24 h,并用超声波振荡仪振荡 15 min,直接用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪器测试,其测量范围为 0.02~2 000 μm,相对误差小于 2%,粒径分辨率为 0.01 φ,重复测量相对误差小于 3%. 对于粒径大于 2 000 μm 的样品,先称重,然后用传统筛法分析称量,两部分数据利用激光衍射粒度分析仪仿真程序合并获得完整的粒度分布.

主要针对 As、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 和 Cd 7 种重金属元素进行质量分数测试. 首先取适量沉积物

样品于烘箱内 60℃ 烘干,冷却后用玛瑙研钵磨成粉末,称取 50 mg 于聚四氟乙烯消解罐中,并滴加 3 mL 浓硝酸、2 mL 浓盐酸和 2 mL 氢氟酸(37%),将沉积物消化溶解. 然后在微波消解器中加热至 200℃,加压至 3 MPa,当酸完全蒸发后,在蒸干的样品中加入 0.5 mL 硝酸和 4.5 mL 超纯水溶解,采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定重金属元素 Cu、Pb、Cd 和 Zn. Al₂O₃ 和元素 Cr 采用 X 荧光光谱法(XRF)测定. 元素 Hg 和 As 测试采用原子荧光光谱法(AFS),用 1:1 王水(1 mL HNO₃、3 mL HCl 和 4 mL 蒸馏水)在热水浴上加热煮沸,消解 1 h,用去离子水稀释定容,As 含量测试前用硫脲和苦杏仁酸预还原,用硼氢化钠氢化法测定,Hg 含量测试采用冷原子吸收法.

2.3 数据处理

使用 SPSS 19.0 软件对 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb 和 Zn 这 7 种重金属元素质量分数进行相关性分析和因子分析. 相关性分析采用 Pearson 相关系数,双尾检验,差异显著性水平设为 $P=0.05$,极显著差异性水平设为 $\alpha=0.01$. 因子分析前对数据进行 Bartlett 球形检验,检验各变量是否独立,当相伴概率 < 0.05 时,说明各变量间具有相关性,因子分析有效.

2.4 评价方法

2.4.1 单因子污染指数法

依据《海洋沉积物质量标准》(GB 18668-2002)中 I 类沉积物标准值^[28],对沉积物中 As、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 和 Cd 这 7 种重金属元素进行单因子污染评价,具体公式如下:

$$C_i^i = \frac{C_i^i}{C_n^i} \tag{1}$$

式中, C_i^i 为重金属 i 的污染指数; C_i^i 为重金属 i 的实测质量分数(μg·g⁻¹); C_n^i 为重金属 i 的评价参比值(μg·g⁻¹)(表 1). 当 $C_i^i \leq 1$,重金属含量符合标准,污染程度为低;当 $C_i^i > 1$,重金属含量超过规定的评价标准,当 $1 < C_i^i \leq 3$,污染程度为中等; $3 < C_i^i \leq 6$,污染程度为重; $C_i^i > 6$,污染程度严重.

表 1 国家海洋沉积物重金属含量参比标准

指标	海洋沉积物质量标准值/μg·g ⁻¹						
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn
I 类	20	0.5	80	35	0.2	60	150
II 类	65	1.5	150	100	0.5	130	350
III 类	93	5.0	270	200	1.0	250	600

2.4.2 生态风险指数法

瑞典学者 Hakanson 基于沉积物中重金属含量、污染物类型和毒性响应特征,针对不同地域环境背景差异性,于 1980 年提出生态风险指数评价方法^[29],被普遍用于综合评价重金属对海域环境的危害程度及其潜在生态风险^[30,31],其计算方法如下:

$$C_d = \sum_i^n C_f^i = \sum_i^n \frac{C_i}{C_n^i} \quad (2)$$

$$RI = \sum_i^n E_r^i = \sum_i^n T_r^i \times \sum_i^n C_f^i = \sum_i^n \frac{C_i}{C_n^i} \quad (3)$$

式中, C_d 为沉积物重金属总体污染指数; C_f^i 为重

属 i 的污染指数; C_i 为重金属 i 的实测质量分数 ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$); C_n^i 为重金属 i 的评价参比值 ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), 采用工业化之前全球沉积物中的最高背景值, As、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 和 Cd 分别为 15、90、50、0.25、70、175 和 $1\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; T_r^i 为重金属 i 的毒性系数, 它反映该重金属的毒性水平及生物对重金属污染的敏感程度, As、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 和 Cd 分别为 10、2、5、40、5、1 和 30; E_r^i 为重金属 i 的潜在生态风险系数; RI 为沉积物中重金属的潜在生态风险指数. 依据 E_r^i 和 RI 对沉积物中重金属潜在生态风险进行等级划分(表 2).

表 2 沉积物重金属污染程度及潜在生态风险等级划分

Table 2 Pollution grades and potential ecological risk levels of heavy metals in marine sediment

C_d	重金属总体 污染程度	E_r^i	单个重金属 潜在生态危害程度	RI	重金属总体 潜在生态危害程度
<8	低	<40	低	<150	低
8~16	中等	40~80	中等	150~300	中等
16~32	重	80~160	较重	300~600	重
≥ 32	严重	160~320	重	≥ 600	严重
—	—	≥ 320	严重	—	—

3 结果与讨论

3.1 重金属分布特征

测试统计结果显示(表 3), 海南岛北部海湾表层沉积物重金属含量总体水平较低. 沉积物中 As 含量范围为 $0.14 \sim 48.60\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均 $8.40\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 变异系数为 0.37, 工区 As 含量分布整体呈“北高南低”的趋势, 高值区主要分布于海口湾北部、铺前湾北部及木兰湾西北部海域; 中值区分布于秀英港内部、南渡江入海口及迈雅河入海口; 低值区主要分布于铺前湾、木兰湾沿岸及东寨港[图 2(a)].

Cd 含量范围在 $0.007 \sim 0.30\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值 $0.06\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 变异系数为 0.78. 工区 Cd 含量分布整体呈“西高东低”的趋势, 高值区主要分布在海口湾秀英港内部、南渡江入海口及铺前湾西部迈雅河入海口一带海域. 低值区主要分布于铺前湾中-东部、木兰湾全区及东寨港内部[图 2(b)].

Cr、Cu、Hg、Pb 和 Zn 分布趋势相似[图 2(c)~2(g)], 其中 Cr 含量范围在 $3.60 \sim 106.00\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值 $32.50\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 变异系数为 0.67; Cu 含量范围在 $0.02 \sim 35.00\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值 $8.32\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 变异系数为 0.87; Hg 含量范围在 $0.0017 \sim 0.15\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值 $0.02\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 变异系数为 0.89; Pb 含量范围在 $2.44 \sim 56.60\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值

$18.77\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 变异系数为 0.58; Zn 含量范围在 $0.31 \sim 147.00\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值 $35.87\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 变异系数为 0.81. 上述元素含量高值区主要分布于海口湾五源河入海口、秀英港内部、铺前湾迈雅河入海口、南渡江入海口、东寨港内部及木兰湾西部. 中值区分布于铺前湾中部, 低值区分布于工区北部及铺前湾东部湾顶海域.

对比中国浅海^[32]、海南岛近岸^[33]和琼州海峡^[23]表层沉积物, 海南岛北部海湾表层沉积物中 7 种重金属元素含量均高于海南岛近岸表层沉积物, 而 As、Cd、Hg 含量与中国浅海和琼州海峡表层沉积物相近, Cr、Cu、Pb 和 Zn 含量低于中国浅海和琼州海峡表层沉积物(表 3). 说明海南岛北部海湾表层沉积物中重金属元素相比较海南岛近岸沉积物整体情况, 呈现一定程度富集.

3.2 重金属含量相关性分析

表层沉积物中的重金属含量主要受环境背景、海洋理化性质、生物作用以及人类活动等多方面影响. 通过分析沉积物各重金属含量之间的相关性, 可以对重金属的来源进行初步判断. 本次重金属相关性分析加入 Al_2O_3 含量及沉积物中值粒径, 其中 Al_2O_3 为陆源碎屑风化产物, 其性质稳定, 可作为陆源指示成分. 中值粒径反映沉积物粗、细组分分布的总趋势, 也可反映搬运介质的平均动能.

重金属含量相关性分析结果(表 4)显示, Cu、

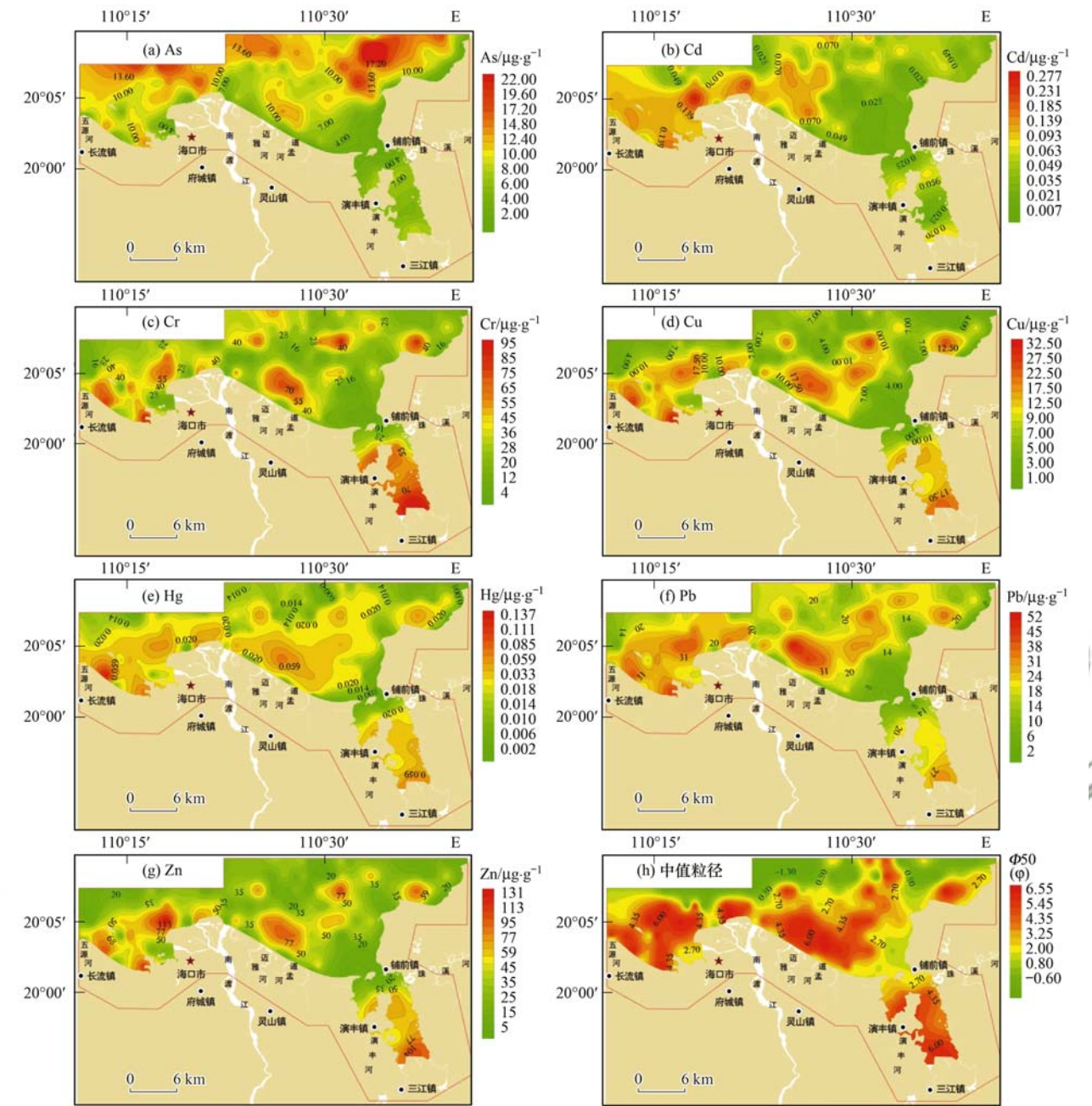


图 2 沉积物重金属含量及中值粒径分布

Fig. 2 Distribution of heavy metal content and median diameter in surface sediments

表 3 沉积物重金属含量测试结果统计/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 3 Statistics for heavy metal content in sediments/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

统计量	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn
最小值	0.14	0.007	3.60	0.02	0.001 7	2.44	0.31
最大值	48.60	0.30	106.00	35.00	0.153	56.60	147.00
平均值	8.40	0.06	32.50	8.32	0.02	18.77	35.87
标准差	5.87	0.05	21.67	7.24	0.02	10.86	28.92
变异系数	0.37	0.78	0.67	0.87	0.89	0.58	0.81
I 类/II 类沉积物	156/3	159/0	153/6	159/0	159/0	159/0	159/0
中国浅海沉积物	7.70	0.07	60.00	15.00	0.03	20.00	65.00
海南岛近岸沉积物	5.50	0.03	16.05	4.48	0.012	16.09	21.89
琼州海峡沉积物	10.09	0.05	50.05	10.60	0.02	25.36	54.55

表 4 沉积物重金属、 Al_2O_3 和中值粒径相关系数Table 4 Correlation of heavy metals, Al_2O_3 , and median diameter

	Al_2O_3	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Zn	中值粒径
Al_2O_3	1								
As	0.383	1							
Cd	0.604	0.334	1						
Cr	0.858	0.383	0.473	1					
Cu	0.953	0.395	0.554	0.886	1				
Pb	0.892	0.584	0.650	0.772	0.895	1			
Hg	0.902	0.360	0.595	0.778	0.912	0.828	1		
Zn	0.950	0.405	0.593	0.905	0.963	0.887	0.885	1	
中值粒径	0.742	0.058	0.407	0.540	0.702	0.574	0.705	0.688	1

Zn、Hg、Pb、Cr 和 Cd 之间呈明显正相关,且均与 Al_2O_3 呈高度正相关,相关系数分别达 0.953、0.950、0.902、0.892、0.858、0.604。As 仅与 Pb 呈正相关(相关系数 0.584),与其它各重金属元素及 Al_2O_3 无明显相关性,相关系数均低于 0.41。表明 Cu、Zn、Hg、Pb、Cr 和 Cd 具有同源性,其物质来源主要为陆源输入,而 As 则具有其他物质来源。

中值粒径分别与 Hg、Cu、Zn 呈显著正相关,相关系数分别为 0.705、0.702、0.688,与 Pb、Cr 和 Cd 呈一定程度正相关,相关系数分别为 0.574、0.540 和 0.407,即 Hg、Cu、Zn、Pb、Cr 和 Cd 分布受沉积物粒度控制,且主要赋存于细粒沉积物中。As 与中值粒径相关系数仅为 0.058,其分布趋势不受沉积物粒度影响。

3.3 重金属来源与主控因素分析

为进一步确定重金属来源与分布主控因素,对沉积物中重金属含量进行因子分析,当初始特征值大于 0.5 时,可提取 3 个初始因子,经过最大方差旋转,可分别解释总因子的 72.85%、11.32% 和 6.77%,累积贡献率达 90.93% (表 5)。

Cu、Zn、Hg、Pb、Cr、Cd、 Al_2O_3 和中值粒径在因子 1 上具有很高载荷(图 3),该重金属元素组合高值区主要分布于海口湾西海岸五源河入海口、秀英港内部、南渡江入海口、铺前湾迈雅河入海口及木兰湾西部海域。海口市主城区人类活动频繁,大量生活污水、洗涤污水和工业废水分别经五源河与秀英港工业排污沟向海口湾直接排放,造成海域环境重金属元素聚集。南渡江分三支流入海,北向入海支流与海甸岛白沙门污水处理厂相邻,西向入海支流紧邻海甸岛美丽沙填海造陆区,生活污水排放与高重金属含量围填料向外海扩散应为该海域沉积物重金属汇聚主因,其次南渡江径流量大、携沙能力强,内含大量陆源碎屑物质,物源区母岩风化产物

运移亦有贡献。遥感解译发现铺前湾西部沿岸及木兰湾西部沿岸一带有大量高位养虾池,养殖污水通过迈雅河或自行挖暗管直排入海,导致迈雅河入海口海域表层沉积物重金属元素呈现富集。结合重金属元素相关性分析,因子 1 可解释上述重金属元素来源为河流陆源输入,包括人为排污和母岩风化产物搬运两方面因素。

表 5 沉积物重金属因子提取信息

Table 5 Factors information for heavy metals

元素	因子载荷		
	因子 1	因子 2	因子 3
Al_2O_3	0.973	-0.097	-0.042
As	0.474	0.819	-0.141
Cd	0.672	0.166	0.708
Cr	0.884	-0.011	-0.242
Cu	0.972	-0.076	-0.127
Pb	0.933	0.203	0.016
Hg	0.930	-0.105	0.005
Zn	0.972	-0.052	-0.090
中值粒径	0.727	-0.500	0.052
特征值	6.556	1.018	0.609
贡献率/%	72.85	11.32	6.77
累积贡献率/%	72.85	84.16	90.93

Cu、Zn、Hg、Pb 和 Cr 于东寨港内部有大量聚集。中值粒径分布显示[图 2(h)]东寨港、海口湾及铺前湾东部海域表层沉积物粒度细,中值粒径范围 $4.35 \sim 7.07\phi$,以粉砂质、淤泥质为主,其中东寨港为半封闭海湾,水动力条件较弱,对外交换能力不强,秀英港因位于海口湾顶部,港口内潮流影响小,其次因码头遮挡 N(强浪向)、NEE(常浪向)向浪从而形成波影区,水动力条件弱,易于淤积,河流注入物质因絮凝作用在上述海域内发生沉淀,同时淤泥底质对重金属元素不断吸附、累积,更加剧重金属元素的富集。可见因子 1 亦能解释沉积物粒度对 Cu、Zn、Hg、Pb 和 Cr 分布的控制作用,主要体现为细颗粒淤泥底质的吸附作用,即沉积物粒度越细,其

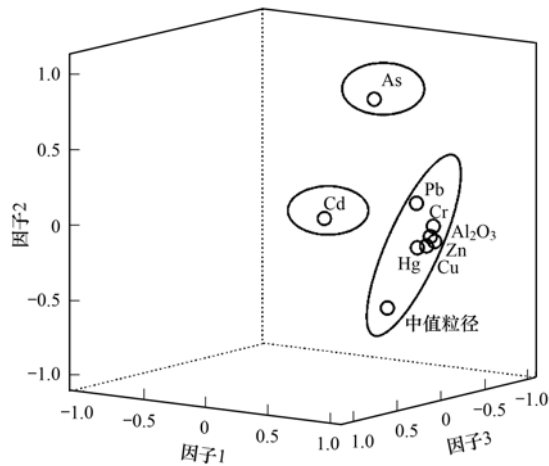


图3 沉积物重金属因子载荷
Fig. 3 Factor load of heavy metals

重金属元素含量越高。

在因子2中仅As具有高载荷,As属于亲硫元素,其富集常受低温热液成矿影响,再次为生活排污、残留农药通过河流注入,同时开放式网箱鱼类养殖也易造成As污染^[30]。As含量由近岸向远海逐渐增加,高值区主要集中在工区北部水深较大海域[图2(a)]。在因子1中As载荷数为0.474,表明近岸As的来源仍为陆源输入,而远岸沉积物中As高含量则主要受控于自然地质背景因素^[30,31,33],其次或与外海物质来源有关。

Cd同时在因子1和因子3中具有高载荷,其主要用于电镀业、化工业、杀虫剂、杀菌剂和制造充电电池,通过河流排污入海并聚集于沉积物中。据琼北车管所统计数据 displays 海口市主要交通工具电动自行车,截止2015年10月其保有量已超过50万辆,大量废旧铅酸电池如发生泄漏可造成Pb、Cd和Hg污染,其次海口市具有一定的电镀业和化工业,使得海口湾表层沉积物Cd含量远高于铺前湾、木兰湾和东寨港[图2(b)]。因此因子3反映了城市发展进程导致地区污染差异性影响。

3.4 重金属污染评价

3.4.1 单因子污染评价

依据《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002),对海湾沉积物中重金属含量进行单因子污染评价(表3),结果显示研究区海域所调查159站位表层沉积物中Cd、Cu、Hg、Pb和Zn含量均低于I类沉积物标准,评价为海洋I类沉积物,As和Cr含量分别有156、153站位属I类沉积物,污染程度低,可适用于海洋渔业水域,海洋自然保护区,珍稀与濒危生物自然保护区,海水养殖区,海水浴场,人体直接接触沉

积物的海上运动或旅游区,与人类食用直接有关的工业用水区。As含量属II类海洋沉积物有3站位,分布于海口湾北部与铺前湾北部,Cr含量属于II类海洋沉积物有6站位,分布于海口湾西海岸、秀英港内部、铺前湾中部、木兰湾西部和东寨港(图2)。II类海洋沉积物适用于一般工业用水区、滨海风景旅游区。研究区无III类及以上沉积物。

研究区表层沉积物中重金属单因子污染影响程度依次为As>Cr>Pb>Zn>Cu>Cd>Hg(表6),污染影响程度最高为As,其次为Cr,其重金属污染指数最高分别可达2.430、1.325,污染程度中等(图4)。海湾近岸As聚集主要为含As工业废水排放和农药使用。秀英工业排污沟工业污水排放以及秀英港内淤泥底质的吸附作用不利于As向外海迁移,另一方面,迈雅河和道孟河上游沿岸两侧有大量农田,下游沿海一带高位养虾池较多,含As农药的使用及水产养殖污水直接排放是导致铺前湾局部海域As含量偏高主因。Cr污染主要来自于工业排污,天然来源为岩石风化,风化作用多形成Cr³⁺,对人体健康危害不大,工业废水中主要为Cr⁶⁺,是吸入性极毒物。因此,须对调查区As和Cr的潜在生态风险给予高度重视,对其他重金属的污染状况也应给予关注。总体而言,海南岛北部海湾表层沉积物单因子污染评价总体显示为低污染状态,海域生态环境优秀。

表6 沉积物重金属污染指数
Table 6 Pollution index of heavy metals

元素	C _f ⁱ		
	最大值	最小值	平均值
As	2.430	0.007	0.420
Cd	0.600	0.014	0.128
Cr	1.325	0.045	0.406
Cu	1.000	0.001	0.238
Pb	0.943	0.041	0.313
Hg	0.765	0.009	0.118
Zn	0.980	0.002	0.239

3.4.2 潜在生态风险评价

各重金属元素潜在生态风险系数(E_rⁱ)均小于40(图5),潜在危害程度低,沉积物重金属元素潜在生态危害影响依次为As>Hg>Cd>Pb>Cu>Cr>Zn,与单因子污染影响程度排序有较大差异,因为重金属元素潜在生态风险系数计算考虑了重金属生物毒性,能更准确反映研究区海域表层重金属含量所产生的潜在生态危害。单因子污染和潜在生态风险评价结果均显示As对海域环境污染及潜在危

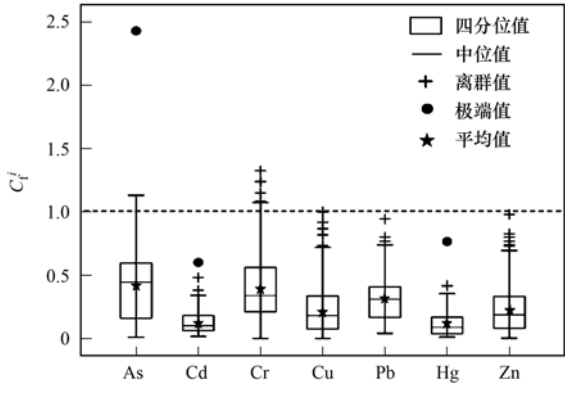


图 4 沉积物重金属污染指数分布
Fig. 4 Pollution index distribution of heavy metals

害影响程度最高,应将 As 作为今后重点环境监测与海域生态研究对象. Hg 毒性响应系数与其他重金属元素相比较,导致其值相应增加.

海南岛北部海湾表层沉积物潜在生态风险评价结果表明(表 7),沉积物重金属总体污染程度指数(C_d)范围在 0.32 ~ 5.21,均值为 1.72(图 6),其最大值和平均值均小于 8,评价为低程度污染. 沉积物重金属的潜在生态风险指数(RI)范围 2.35 ~ 47.18,均值 14.40,其最大值远低于 150,重金属总体潜在生态危害属低程度范畴,反映了研究区海域优良的底质生态环境,然而沉积物重金属总体污染程度系数与潜在生态风险指数高值分布区(图 6 和图 7)也应引起足够警惕.

表 7 重金属潜在生态风险评价参数

Table 7 Parameters for potential ecological risk assessment

元素	E_r^i		
	最大值	最小值	平均值
As	32.40	0.09	5.60
Cd	9.00	0.21	1.92
Cr	2.36	0.08	0.72
Cu	3.50	0.07	0.83
Pb	4.04	0.17	1.34
Hg	24.48	0.27	3.78
Zn	0.84	0.02	0.20
C_d	5.21	0.32	1.72
RI	47.18	2.35	14.40

海口作为省会滨海城市,化工业发展受到较为严格控制,城市污染源主要为生活排污,如五源河与海甸岛白沙门污水处理厂生活污水排放,秀英港内部除工业废水排放外,来往船只亦会造成船舶污染. 与海口湾不同,铺前湾、东寨港与木兰湾海域重金属污染来源则主要为水产养殖和农产品污染,包括饵料过量投放、杀菌剂、杀虫剂、鱼药和农药的大量使用,特别是东寨港沿岸分布有全国面积最大、

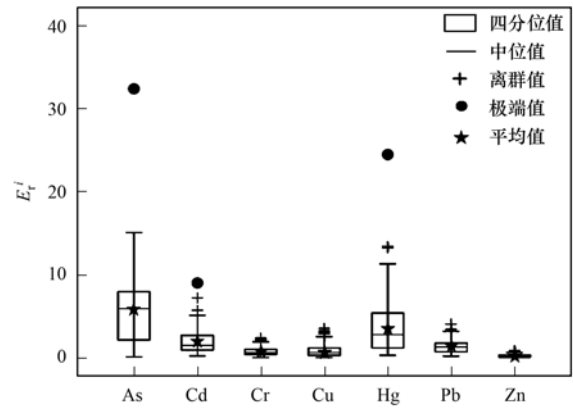


图 5 沉积物重金属生态风险系数(E_r^i)分布
Fig. 5 Distribution of potential ecological risk coefficient

种类最齐全、保存最完整的红树林,应作为研究区重点环境保护对象. 此外亦不能忽略近岸填海造陆工程对海域生态环境的潜在危害影响,如海甸岛美丽沙、南海明珠等.

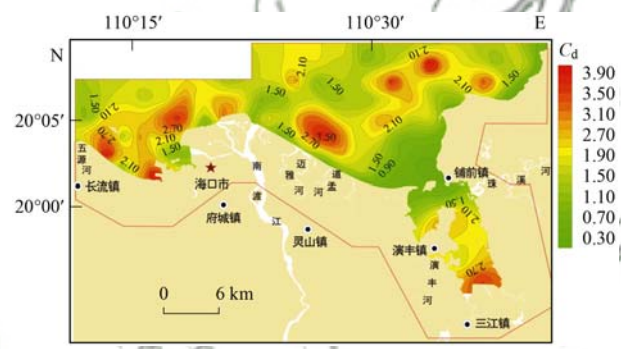


图 6 沉积物重金属总体污染指数分布
Fig. 6 Distribution of heavy metals total pollution index

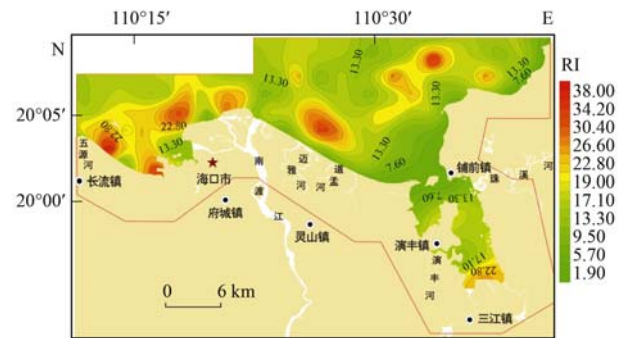


图 7 沉积物重金属潜在生态风险指数分布
Fig. 7 Distribution of heavy metals potential ecological risk index

综上所述,随着琼北地区城市化不断扩展,居住人口不断增加,化工业进程趋势加快、水产养殖业大力发展以及大量围填海工程的施工,局部海域环境潜在危害程度也将不断增加. 因此需要相应高效且及时地环保预防措施并对已污染的海洋环境进行修复,以达到生态环境的可持续发展,如严格管理生活污水、工农业废水超标直接排放,提高城镇排污

处理能力,发展清洁能源技术,推广电动自行车无铅电瓶的使用,控制含重金属鱼药投放,合理使用农药、杀菌剂和杀虫剂等。

4 结论

(1) 海南岛北部海湾表层沉积物中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb 和 Zn 含量平均值分别为 8.40、0.06、32.50、8.32、0.02、18.77 和 35.87 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Cr、Cu、Hg、Pb 和 Zn 分布趋势相似,其含量高值区主要分布于海口湾五源河入海口、秀英港内部、南渡江入海口、铺前湾迈雅河入海口、东寨港内部及木兰湾西部。As 含量由南向北逐渐增加,Cd 集中分布于海口湾。研究区沉积物中重金属元素含量均高于海南岛近岸表层沉积物整体水平,呈现一定程度富集。

(2) 研究区海域表层沉积物中 Cu、Zn、Hg、Pb、Cr 和 Cd 主要来自陆源输入,包括人为污染和母岩风化产物运移两方面因素,As 除陆源输入外还有海外物质来源。沉积物中 Cu、Zn、Hg、Pb 和 Cr 含量分布主控因素为沉积物粒度,体现为沉积物粒度越细,所吸附并积累重金属含量越高;As 高含量则主要受控于自然地质背景因素;Cd 于海口湾沉积物中的富集则反映了城市发展进程对地区污染差异性影响。

(3) 研究区海域所调查 159 站位表层沉积物中 Cd、Cu、Hg、Pb 和 Zn 含量均符合 I 类沉积物标准,As 和 Cr 分别有 156 站位、153 站位属 I 类沉积物,属低程度污染;剩余 3 站位 As 和 6 站位 Cr 被评定为 II 类海洋沉积物,污染程度中等。沉积物中重金属单因子污染影响程度依次为 As > Cr > Pb > Zn > Cu > Cd > Hg。

(4) 研究区海域表层沉积物重金属总体为低程度污染,重金属总体潜在生态危害属低程度范畴,反映了研究区海域优良的底质生态环境。各重金属元素潜在生态危害程度低,生态危害影响依次为 As > Hg > Cd > Pb > Cu > Cr > Zn,As 对海域环境污染及潜在危害影响程度最高。海口湾城市污染源主要为生活排污和工业废水排放,铺前湾、东寨港与木兰湾海域重金属污染来源则主要来自于水产养殖和农产品污染。

参考文献:

- [1] Li X D, Poon C S, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. Applied Geochemistry, 2001, **16**(11-12): 1361-1368.
- [2] Jacoby J M, Lynch D D, Welch E B, et al. Internal phosphorus loading in a shallow eutrophic lake[J]. Water Research, 1982, **16**(6): 911-919.
- [3] Dauvalter V, Rognerud S. Heavy metal pollution in sediments of the Pasvik river drainage[J]. Chemosphere, 2001, **42**(1): 9-18.
- [4] Mucha A P, Vasconcelos M T S D, Bordalo A A. Macrobenthic community in the Douro estuary: relations with trace metals and natural sediment characteristics[J]. Environmental Pollution, 2003, **121**(2): 169-180.
- [5] McCready S, Birch G F, Long E R. Metallic and organic contaminants in sediments of Sydney Harbour, Australia and vicinity—a chemical dataset for evaluating sediment quality guidelines[J]. Environment International, 2006, **32**(4): 455-465.
- [6] Chen C W, Kao C M, Chen C F, et al. Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan[J]. Chemosphere, 2007, **66**(8): 1431-1440.
- [7] Zheng N, Wang Q C, Liang Z Z, et al. Characterization of heavy metal concentrations in the sediments of three freshwater rivers in Huludao city, Northeast China[J]. Environmental Pollution, 2008, **154**(1): 135-142.
- [8] 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清. 艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 490-496.
Zhang Z Y, Abuduwalli J L L, Jiang F Q. Sources, pollution status and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Aibi Lake, Northwest China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 490-496.
- [9] 张伟, 张洪, 单保庆. 北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4284-4290.
Zhang W, Zhang H, Shan B Q. Characteristics of heavy metal pollution in the sediments from Shahe reservoir, the upper reach of the North Canal river[J]. Environmental Science, 2012, **33**(12): 4284-4290.
- [10] Almeida C M R, Mucha A P, Vasconcelos M T S D. Influence of the sea rush *Juncus maritimus* on metal concentration and speciation in estuarine sediment colonized by the plant[J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(11): 3112-3118.
- [11] Feng H, Cochran J K, Lwiza H, et al. Distribution of heavy metal and PCB contaminants in the sediments of an urban estuary: the Hudson river[J]. Marine Environmental Research, 1998, **45**(1): 69-88.
- [12] Hossain M A, Ali N M, Islam M S, et al. Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soils of Gebeng industrial city, Malaysia[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **73**(1): 115-126.
- [13] Soriano A, Pallarés S, Pardo F, et al. Deposition of heavy metals from particulate settleable matter in soils of an industrialised area[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, **113**: 36-44.
- [14] 邱海健, 吴艳宏, 刘恩峰, 等. 长江中下游不同湖泊沉积物中重金属污染物的累积及其潜在生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(5): 675-683.
Bing H J, Wu Y H, Liu E F, et al. The accumulation and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the sediment of different lakes within the middle and lower reaches of Yangtze river[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(5): 675-

- 683.
- [15] Chabukdhara M, Nema A K. Assessment of heavy metal contamination in Hindon river sediments: a chemometric and geochemical approach[J]. *Chemosphere*, 2012, **87**(8): 945-953.
- [16] 陈江麟, 刘文新, 刘书臻, 等. 渤海表层沉积物重金属污染评价[J]. *海洋科学*, 2004, **28**(12): 16-21.
Chen J L, Liu W X, Liu S Z, *et al.* An evaluation on heavy metal contamination in the surface sediments in Bohai sea[J]. *Marine Sciences*, 2004, **28**(12): 16-21.
- [17] Frignani M, Bellucci L G. Heavy metals in marine coastal sediments: assessing sources, fluxes, history and trends[J]. *Annali Di Chimica*, 2004, **94**(7-8): 479-486.
- [18] 干爱华, 于斌, 刘军, 等. 海河干流、大沽排污河沉积物中重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *安全与环境学报*, 2006, **6**(5): 39-41.
Gan A H, Yu B, Liu J, *et al.* Evaluation on the potential ecological risks of heavy metal pollution in sediments in the main course of Haihe river and Dagou drainage outlet[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, **6**(5): 39-41.
- [19] 刘建波, 刘洁, 陈春华, 等. 海口湾东部表层沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. *安徽农业科学*, 2012, **40**(17): 9416-9418, 9472.
Liu J B, Liu J, Chen C H, *et al.* Contamination characteristic and potential ecological risk of heavy metals in the surface sediment from East Haikou bay [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, **40**(17): 9416-9418, 9472.
- [20] 李鹏山, 林国尧, 谢跟踪, 等. 海口湾近岸海域水质状况分析与评价[J]. *海南师范大学学报(自然科学版)*, 2010, **23**(1): 108-114.
Li P S, Lin G Y, Xie G Z, *et al.* Evaluation of water quality status of coastal water in Haikou bay [J]. *Journal of Hainan Normal University (Natural Science)*, 2010, **23**(1): 108-114.
- [21] 陈春华, 谷尚莉, 王道儒. 海口湾水质污染监测可比性问题的初步探讨[J]. *海洋环境科学*, 2003, **22**(4): 30-33.
Chen C H, Gu S L, Wang D R. Discussion on comparability of water polluting monitor in Haikou bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2003, **22**(4): 30-33.
- [22] 张家友, 吴国爱, 傅杨荣, 等. 海口湾重金属富集与评价[J]. *国土资源科技管理*, 2012, **29**(5): 43-48.
Zhang J Y, Wu G A, Fu Y R, *et al.* Enrichment and evaluation of heavy metals in Haikou bay[J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 2012, **29**(5): 43-48.
- [23] 刘华峰, 傅杨荣, 杨奕, 等. 琼州海峡表层沉积物重金属元素分布特征与生态风险评价[J]. *安全与环境工程*, 2010, **17**(4): 33-36, 54.
Liu H F, Fu Y R, Yang Y, *et al.* Distribution of heavy metals in the sediments of Qiongzhou strait and the assessment of potential ecological risk [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2010, **17**(4): 33-36, 54.
- [24] 汪啸风, 马大铨, 蒋大海. 海南岛地质[M]. 北京: 地质出版社, 1991. 1-68.
- [25] 丁式江, 陈颖民, 李志忠, 等. 海南省(岛)国土环境资源遥感应用研究[M]. 北京: 地质出版社, 2008. 1-101.
- [26] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志: 第十一分册, 海南省海湾[M]. 北京: 海洋出版社, 1999. 1-79.
- [27] GB 17378-2007 海洋监测规范[S].
- [28] GB 18668-2002 海洋沉积物质量[S].
- [29] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [30] 罗昆, 李亮, 龙根元, 等. 海南岛南部海域沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *上海海洋大学学报*, 2017, **26**(1): 85-93.
Luo K, Li L, Long G Y, *et al.* Heavy metal pollution and their ecological risk assessment in sediments from southern Hainan Island[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2017, **26**(1): 85-93.
- [31] 何海军, 甘华阳, 何金先, 等. 海南岛南部滨海沉积物中重金属分布特征及生态风险评价[J]. *海洋地质前沿*, 2017, **33**(3): 47-55.
He H J, Gan H Y, He J X, *et al.* Distribution pattern of heavy metals in the coastal sediment of southern Hainan Island and ecological risk assessment[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, **33**(3): 47-55.
- [32] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物化学元素丰度[J]. *中国科学(B辑)*, 1993, **23**(10): 1084-1090.
- [33] 夏南, 薛桂澄, 傅杨荣, 等. 海南岛近岸海域表层沉积物中重金属元素含量状况及生态风险分析[J]. *资源环境与工程*, 2011, **25**(3): 244-247.
Xia N, Xue G C, Fu Y R, *et al.* Analysis of ecological risk and the content situation of heavy metals in surface sediments of Hainan Island's inshore [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2011, **25**(3): 244-247.

CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i>	(980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i>	(990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xinxiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i>	(997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i>	(1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	(1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i>	(1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i>	(1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang	(1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i>	(1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i>	(1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i>	(1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i>	(1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i>	(1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i>	(1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i>	(1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i>	(1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i>	(1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i>	(1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i>	(1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria natans</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i>	(1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i>	(1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i>	(1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i>	(1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i>	(1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen	(1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng	(1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Floc-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i>	(1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i>	(1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i>	(1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i>	(1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LU Yu-feng, <i>et al.</i>	(1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i>	(1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i>	(1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i>	(1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i>	(1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i>	(1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i>	(1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i>	(1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i>	(1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i>	(1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i>	(1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i>	(1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i>	(1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i>	(1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i>	(1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua	(1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i>	(1438)