

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响	
..... 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)	
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态	黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究	朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究	苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)
重庆市主城区 PM _{2.5} 时空分布特征	刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比	庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征	何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)
北京上甸子站大气 CO ₂ 及 δ ¹³ C(CO ₂) 本底变化	夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布	刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险	刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估	
..... 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)	
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析	王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究	刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价	张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究	薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源	李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价	李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究	刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)
我国北方温排水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性	
..... 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)	
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征	韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析	冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征	程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究	马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算	张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡河道脱氮机制的影响	韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征	高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律	陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响	郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)
铅改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响	章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究	王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用	
..... 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)	
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除	乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)
污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析	牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析	李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良 (1472)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复	王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响	
..... 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)	
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究	
..... 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)	
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响	谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子	崔海, 张亚红 (1507)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性	贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响	刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析	王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素	罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)
高温纤维素降解菌筛选及产酶特性	冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发	
..... 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)	
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价	金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响	王兰君, 王金花, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)
新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应	林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究	李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)
《环境科学》征订启事 (1218) 《环境科学》征稿简则 (1370) 信息 (1352, 1412, 1498)	

海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价

张卫坤^{1,3}, 甘华阳², 闭向阳³, 王家生^{1,3*}

(1. 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 广州海洋地质调查局, 广州 510760; 3. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074)

摘要: 对海南岛东北部滨海湿地 128 个站位表层沉积物中 14 种元素 (Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 Cu 、 Ni 、 Sr 、 Zn 、 V 、 Pb 、 Cr 、 Zr 、 As 、 Cd 和 Hg)、总有机碳(TOC)含量和粒度进行测试分析. 结果表明, 研究区微量元素 V 、 Cr 、 Ni 、 Cu 、 Zn 、 As 、 Pb 、 Cd 和 Hg 平均含量分别为 (40.13 ± 32.65) 、 (35.92 ± 26.90) 、 (13.03 ± 11.46) 、 (11.56 ± 10.27) 、 (48.75 ± 27.00) 、 (5.48 ± 1.60) 、 (18.70 ± 8.66) 、 (0.054 ± 0.045) 和 $(0.050 \pm 0.050) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 相比于珠江口、长江口、渤海湾沉积物和其他地质单元含量普遍偏低, 而 Sr 和 Zr 的平均含量异常分别高达 $(1253.60 \pm 1649.58) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $(372.40 \pm 516.49) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$. 研究区微量元素分布特征(除 As 、 Sr 和 Zr)主要富集在海口湾、南渡江河口、演丰镇东寨港、清澜港文昌/文教河口、万宁小海等海湾和潟湖沉积环境中. 通过研究区元素的相关性分析和因子分析(FA), 结果显示海南岛东北部底质沉积物中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 Cu 、 Ni 、 Zn 、 V 、 Pb 、 Cr 和部分 Hg 主要来自于自然源; Cd 和部分 Hg 来自于生物源, 其分布受控于 TOC; 而 As 和部分 MnO 显然受到了人类活动的干扰, 其来源可能是沿岸水产养殖废水排放. 依据沉积物质量基准 Effect Range-Low(ERL)、Effect Range-Median(ERM) 和 Enrichment Factor(EF) 值, 计算表明研究区生态环境整体良好, 沉积物微量元素污染程度较低, 处于无污染-弱污染的程度. 但是, 22% 的站位中 Ni 可能对海洋底栖生物产生负面影响. 文昌市沿岸的冯家湾和龙马乡沿岸的人类活动已经造成区域局部微量元素整体的富集, 应该引起重视.

关键词: 微量元素; 沉积物; 因子分析; 富集因子; ERM; ERL; 滨海湿地

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1295-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.04.014

Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island

ZHANG Wei-kun^{1,3}, GAN Hua-yang², BI Xiang-yang³, WANG Jia-sheng^{1,3*}

(1. State Key laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences Wuhan, Wuhan 430074, China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China; 3. School of Earth Sciences, China University of Geosciences Wuhan, Wuhan 430074, China)

Abstract: Totally 128 surficial sediments samples were collected from the coastal wetlands, northeastern Hainan Island and analyzed for their concentrations of 14 elements including Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , Cu , Ni , Sr , Zn , V , Pb , Cr , Zr , As , Cd and Hg , TOC and grain sizes. The mean concentrations of trace metals V , Cr , Ni , Cu , Zn , As , Pb , Cd and Hg were (40.13 ± 32.65) , (35.92 ± 26.90) , (13.03 ± 11.46) , (11.56 ± 10.27) , (48.75 ± 27.00) , (5.48 ± 1.60) , (18.70 ± 8.66) , (0.054 ± 0.045) , $(0.050 \pm 0.050) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively, which were much lower than those in Pearl River Estuary, Yangzi River Estuary, Bohai Bay, upper crust and average shale. The average concentrations of Sr and Zr were much higher, reaching up to $(1253.60 \pm 1649.58) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ and $(372.40 \pm 516.49) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. The spatial distribution patterns of Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , Cu , Ni , Zn , V , Pb , Cr , Cd and Hg concentrations were the same as each other except for those of As , Sr and Zr . Generally, relatively high concentrations of these elements only appeared in the Haikou Bay, Nandu estuary, Dongzhai Harbor, Qinglan Harbor and Xiaohai in study area. The factor analysis revealed that the trace elements Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , Cu , Ni , Zn , V , Pb , Cr and part of Hg were mainly originated from the rock material by natural weathering processes, while the Cd and a part of Hg were from the biological source controlled by TOC. As and part of MnO were influenced by anthropogenic source, especially by aquacultures. Zr and some MnO were derived from heavy minerals dominated by the coarse grain of sediments. In contrast to the ERL, ERM and the results of enrichment factors (EF), the environment of study area was good in general and the degree of contamination by trace elements was low on the whole. However, there are still some places where anthropogenic input have caused serious enrichments of trace elements and the occasional adverse effect on benthic

收稿日期: 2015-08-26; 修订日期: 2015-11-18

基金项目: 中国地质调查局项目(1212010914020); 国家自然科学基金项目(41472085)

作者简介: 张卫坤(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋环境地质调查, E-mail: zh_weikun@126.com

* 通讯联系人, E-mail: js-wang@cug.edu.cn

organism induced by Ni could probably occur in 22% areas of all the sampling stations.

Key words: trace element; sediment; factor analysis; enrichment factor; ERM; ERL; coastal wetlands

滨海湿地具有极高的生态价值和有利的生态功能,不仅是一些特殊耐盐植物和鸟类的主要生长、栖息场所,同时还能够维持河口和潮坪系统的生产力,是营养物质最重要的汇. 滨海湿地沉积物是研究海岸带环境变迁的良好载体,可以很好地被用来揭示自然环境的演变过程,同时还可以反映人类活动对这些地区影响的程度^[1, 2]. 在河口和海岸带系统中沉积物的搬运和埋藏过程伴随一些普遍而重要的生物化学过程,微量元素的污染路径、循环过程和最终命运会有很大差异^[3]. 微量元素中的部分重金属元素具有来源广、毒性明显、可累积性和不能被生物所降解等特性,容易被底栖生物吸收进入食物链中,是人类健康的长期隐患^[4~7]. 所以,研究河口和海岸带系统沉积物中的微量元素的来源和分布特征有利于了解微量元素的地球化学行为、迁移沉积机制和污染程度,为环境规划、保护和治理提供科学根据,具有理论和现实的双重意义.

前人对华南西部(包括海南全省)的海岸带微量元素污染的研究较少,多数研究表明海南等滨海区沉积物中的微量元素污染程度很低^[8]. Vane 等^[9]的研究发现,海口与文昌沉积物中 Cr 和 Ni 的含量相对较高,但其来源仍为自然来源. Qiu 等^[10]对海南东寨港红树林国家自然保护区沉积物研究结果显示此区域的重金属元素含量较低,人为干扰所带来的环境压力很小. 随着海南“国际旅游岛”的规划实施,海南吸引游客数量逐年攀升,大批旅游设施的兴建和海产品需求量的增加造成了水产养殖规模不断扩大,使得海南面临着前所未有的发展机遇与生态环境压力. 本文综合了海南岛东北部滨海湿地沉积物中微量元素含量、分布特征和多元统计结果等信息,探讨了沉积物中微量元素来源、累积程度和地球化学行为,以期今后海南省的滨海湿地污染防治与保护提供帮助.

1 区域地质地理概况

研究区位于海南岛东北部 110°09′~111°20′E 和 18°47′~20°10′N 之间的区域(图 1),北部地形为宽广的火山熔岩台地和死火山群,沿海一带主要为滨海沙堤、阶地和河口三角洲. 湿地的水深范围 -0.3~12.7 m,水系发达. 区域地层主要以第四系为主,向内变为新生代火山岩和中生代火山岩,北部

基性火山岩为主,南部为中酸性火山岩. 在研究区北部、东部局部地区、东南部和南部,火山岩临海直接出露. 海南岛气候属于海洋性热带季风气候,平均温度在 22~26℃ 之间,年降水量 1 600 mm 以上. 波浪对研究区海岸影响较大,夏季常有热带气旋侵袭.

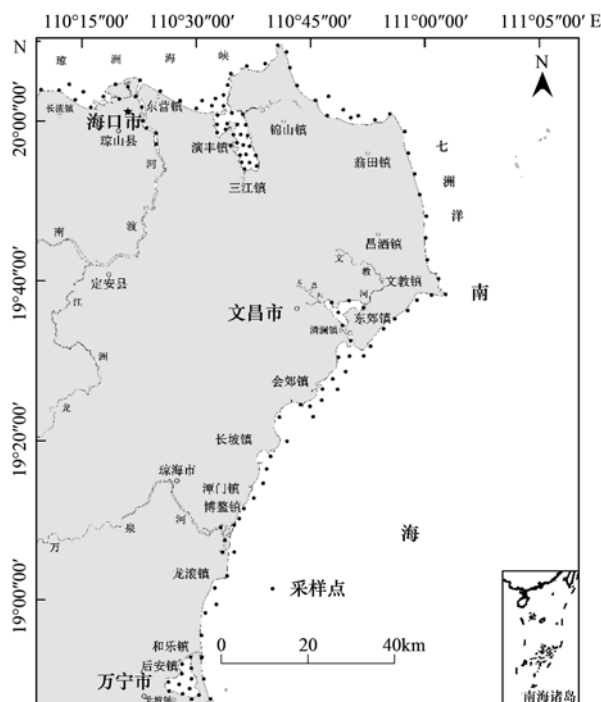


图 1 研究区地理位置及采样站位

Fig. 1 Location of the study area and sampling stations

2 取样与测试手段

沉积物样品于 2013 年利用抓斗取样器采集完成,共采集沉积物表层样品(0~10 cm)128 个(表 1 和图 1),所采样品测试前均冷藏保存. Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、Cr 和 Zr 的含量测试采用 X 荧光光谱仪 Axios XRF 和 X 荧光光谱仪 ZSXmini,方法依据文献^[11]; Cu、Ni、Sr、Zn、V、Pb 检测采用仪器 Perkin Elmer Optima 4300DV 电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-OES),方法采用文献^[12]; As 和 Hg 采用 AFS-9780 型原子荧光光谱仪,测试方法依据文献^[13]; Cd 应用石墨炉原子吸收分光光度法,测试标准依据文献^[14]. TOC 检测方法同文献^[15]一致. 沉积物粒度测试先用筛析法筛选出大于 2 000 μm 的组分,再将小于 2 000 μm 的组分应用 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪进行分析测试,

表 1 海南岛东北部滨海湿地沉积物各站位元素含量及主要特征

Table 1 Concentrations of major, trace elements and general characteristics of sediments from northeastern Hainan Island																	
站位	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	MnO /%	V /μg·g ⁻¹	Cr /μg·g ⁻¹	Ni /μg·g ⁻¹	Cu /μg·g ⁻¹	Zn /μg·g ⁻¹	As /μg·g ⁻¹	Sr /μg·g ⁻¹	Zr /μg·g ⁻¹	Cd /μg·g ⁻¹	Hg /μg·g ⁻¹	Pb /μg·g ⁻¹	TOC /%	中值粒径 (Φ)	(Silt + Clay) /%
D254	4.67	1.03	0.027	15.6	22.2	7.21	8.96	33.7	4.95	77.2	124	0.017	0.058	19.45	0.084	2.26	0.47
D255	15.1	5.91	0.11	109	76.9	34.7	33.7	97.7	9.02	96.1	207	0.079	0.18	35.2	0.94	7.02	97.29
D256	10.37	4.16	0.088	70.9	49	23.8	19.8	70.6	7.15	136	229	0.047	0.117	28.7	0.58	5.41	72.86
D257	15.85	6.29	0.096	109	86.9	35.3	33.1	97.4	7.66	115	251	0.064	0.134	35.95	0.88	6.83	93.26
D258	8.63	3.09	0.053	53.6	45.6	18.8	14.7	57.5	6.37	103	241	0.048	0.081	22.8	0.45	2.88	42.24
D259	17.16	6.54	0.11	119	81.6	38.5	73.6	115	8.78	98.6	245	0.095	0.16	39.6	1.14	7.13	95.69
D260	14.17	5.44	0.078	97.6	78.8	31.6	27.4	89.6	5.98	107	344	0.09	0.118	34	0.87	6.8	91.53
D262	20.05	7.36	0.048	121	102	43.5	53.8	153	7.33	72.6	214	0.257	0.131	48.85	1.98	6.88	91.58
D263	13.1	4.83	0.064	85.5	66.2	28.7	25.4	82.9	6.17	110	224	0.136	0.118	30.7	0.86	6.75	93.05
D265	3.9	0.61	0.014	10.5	14.8	6.05	7.4	28	5.01	41.9	86.5	0.029	0.042	14.1	0.046	0.32	0.04
D266	15.11	5.91	0.052	91.8	76.1	31.7	23.1	89.3	8.75	78	269	0.139	0.099	28.6	1.7	6.35	93.58
D267	10.02	3.27	0.04	54.7	38.1	20.3	15.8	58.4	8.8	71.5	231	0.082	0.099	22.6	0.77	4.96	68.51
D268	12.19	4.29	0.035	75.6	84.4	28.5	19.8	72.8	8.48	74.5	309	0.149	0.096	28.4	2.36	6.44	88.76
D269	20.06	7.42	0.065	125	88.9	43.7	31.9	120	6.62	69	249	0.181	0.098	46.8	1.54	6.98	93.27
D270	18.15	4.65	0.056	106	88.6	37.5	28.9	104	6.02	82.8	273	0.283	0.165	35.7	4.46	7.21	93.67
D271	2.49	0.92	0.026	12.9	21.8	6.19	7.61	29.5	5.17	77.2	457	0.011	0.139	11.9	0.075	1.42	0.01
D272	13.68	4.52	0.064	53	39.1	13.5	12.4	75	7.09	96.3	495	0.071	0.142	28.9	1.31	5.83	80.78
D274	8.82	2.98	0.047	57.6	44.5	20.6	17.7	61.7	7.28	66.5	163	0.072	0.093	23.85	0.44	6.51	83.02
D275	17.61	10.12	0.12	82.5	63.1	22.1	15.9	108	7.19	123	383	0.106	0.144	38	1.78	6.86	94.98
D276	13.18	5.99	0.076	56.1	43.1	15.9	12.6	81.2	6.92	129	456	0.079	0.08	30.4	1.09	4.99	68.37
D277	10.26	3.07	0.041	37.8	30.6	9.09	11.1	56.5	5.99	196	576	0.069	0.065	22.1	0.72	4.07	49.11
D278	12.54	5.4	0.081	53	48.7	12.9	12	76.4	5.62	127	734	0.085	0.066	27.3	1.33	5.07	71.12
D279	14.8	5.65	0.066	67.3	51.3	18.7	14	86.6	7.04	102	289	0.064	0.084	30.2	1.44	6.17	74.12
D280	17.2	5.44	0.06	72.7	48.7	19.4	19.1	98.3	8.29	176	415	0.075	0.093	32.6	1.65	5.88	83.70
D281	6.95	1.95	0.032	23.1	25	7.07	8.38	43.2	3.59	87.1	361	0.049	0.042	17.8	0.36	2.62	22.16
D282	13.37	6.13	0.071	59.4	40.6	15.2	12.5	78.8	7.31	90	396	0.066	0.076	28.4	1.18	5.4	74.21
D283	9.13	3.05	0.049	38.9	39.5	12	10.8	58.8	4.34	112	569	0.104	0.07	22.5	1.02	3.71	44.67
D284	8.64	3.17	0.051	53.7	47.5	17	14.3	55.6	5.69	138	391	0.028	0.04	19.6	0.41	5.16	66.86
D285	5.3	1.25	0.025	18.9	18.3	6.02	8.39	35.8	6.25	58.5	499	0.072	0.025	15.8	0.36	2.1	7.81
D286	6.41	2.27	0.043	43	42.6	16.2	13.7	48.6	6.77	106	171	0.052	0.045	17.7	0.35	2.11	28.21
D287	6.95	1.27	0.032	21.7	3.9	6.65	7.2	35.5	5.52	676	606	0.043	0.015	19.5	0.097	1.87	0.18
D289	7.2	0.8	0.021	16	15.1	4.58	5.06	32.3	5.62	626	163	0.047	0.018	20	0.087	1.54	0.02
D290	6.99	3.02	0.079	46.2	39.9	7.98	5.66	53.8	5.4	1160	2601	0.035	0.01	20.3	0.19	3.41	7.96
D291	4.59	1.32	0.028	25.7	26.1	8.22	7.35	36.4	5.06	64.6	118	0.016	0.02	13.1	0.18	-0.93	9.45
D292	7.97	1.04	0.025	21	9.6	4.1	4.68	37.8	4.76	704	216	0.027	0.009	22.7	0.086	2.3	0.08
D293	2.73	0.79	0.024	13.3	20.7	3.77	5.66	28.5	5.4	80.3	388	0.009	0.007	11.8	0.06	1.29	0.03
D294	6.64	2.27	0.056	37.2	29.9	6.63	5.42	45.4	5.89	927	1664	0.033	0.009	19.4	0.12	3.03	8.96
D295	7.18	2.19	0.024	45.8	43.7	13.5	9.73	47.2	5.15	77.8	678	0.042	0.03	17.8	0.93	4.27	54.07
D296	5.66	1.07	0.02	20.7	32.8	7.79	8.09	35.1	3.49	59.2	523	0.022	0.02	13.95	0.19	3.16	9.14
D297	7.74	2.79	0.072	41.9	42.2	8.71	5.41	52.7	4.64	1330	3317	0.037	0.012	21.3	0.059	3.45	16.33
D299	9.14	1.58	0.022	22.2	19.4	7.69	7.08	43.5	4.91	143	129	0.063	0.029	21.9	0.19	0.91	14.56
D300	3.27	0.48	0.019	3.14	12.3	5.01	5.34	28.3	4.91	31.9	202	0.024	0.025	10.9	0.029	1.75	0.41
D301	2.71	0.45	0.016	6.63	16.7	4.2	5.68	27.5	5.9	69.6	143	0.015	0.012	11.25	0.054	1.67	0.09
D302	5.37	3.77	0.043	31.5	55.6	9.73	8.33	66	8.53	62.5	769	0.132	0.06	16.2	0.5	1.66	22.69
D303	13.41	5.9	0.1	101	80.5	37.6	22.1	88.4	5.21	95.9	314	0.043	0.078	27.1	1.07	6.01	89.08
D304	11.9	4.41	0.037	81.7	56	15.7	17.5	77.2	6.42	108	409	0.172	0.068	24.4	1.34	5.6	78.40
D306	6.66	3.48	0.049	49	38.2	14.3	10.1	51.4	7.36	542	351	0.031	0.04	19.1	0.34	2.5	32.24
D307	7.13	3.28	0.098	43.9	43.7	6.33	7.84	49.5	7.42	681	3875	0.052	0.018	21.9	0.072	2.43	0.71
D308	17.1	6.1	0.064	74.8	60.1	19.5	16.8	106	8.07	175	411	0.057	0.072	35	1.69	5.85	80.51
D309	3.06	0.98	0.049	12.3	7.8	4.9	5.59	29.1	6.38	298	110	0.02	0.01	12.1	0.006	1.9	0.06
D310	2.8	1.04	0.032	8.61	14.7	6.59	5.25	31.1	6.65	40.3	79.7	0.008	0.018	13.5	0.003	1.68	0.07
D312	7.26	2.46	0.03	39.4	54.5	13.7	9.98	47.6	2.99	100	420	0.047	0.026	20.9	0.28	3.65	33.42
D313	5.4	2.11	0.062	27.2	21.7	4.32	6.36	36.6	5.54	330	413	0.035	0.021	16.8	0.036	0.96	0.12

续表 1

站位	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	MnO /%	V /μg·g ⁻¹	Cr /μg·g ⁻¹	Ni /μg·g ⁻¹	Cu /μg·g ⁻¹	Zn /μg·g ⁻¹	As /μg·g ⁻¹	Sr /μg·g ⁻¹	Zr /μg·g ⁻¹	Cd /μg·g ⁻¹	Hg /μg·g ⁻¹	Pb /μg·g ⁻¹	TOC /%	中值粒径 (Φ)	(Silt + Clay) /%
D315	9.8	5.84	0.055	77.9	70.1	27.1	15.8	72.6	6.43	139	398	0.043	0.046	19.4	0.6	4.99	60.41
D316	3.4	1.87	0.065	33.1	16.8	6.52	1.66	34.3	5.9	3 750	179	0.026	0.022	16	0.11	0.47	0.10
D317	12.87	7.49	0.052	102	91.8	37.4	19.5	86.8	8.63	120	274	0.038	0.063	31.2	1.99	6.36	80.55
D318	11.11	4.81	0.052	71.5	73.3	26.6	16.7	74.6	5.54	135	326	0.058	0.091	27.05	0.86	5.21	66.96
D319	14.96	6.69	0.051	113	106	44.6	24.6	97.6	6.4	93.3	294	0.121	0.078	31.8	1.57	6.05	87.24
D320	8.19	2.71	0.027	45.3	50.8	15.2	10.6	53.8	4.06	111	571	0.082	0.043	19	0.67	4.31	54.48
D321	11.09	4.14	0.054	71	62.7	25	15.6	67.9	3.89	99.3	318	0.048	0.048	21.65	0.63	4.86	67.42
D322	11.34	4.93	0.067	80	63.1	28.9	16.1	72	7.05	104	382	0.074	0.052	22.8	0.78	5.67	72.28
D323	3.48	0.73	0.04	17	9	5.23	1.94	27.8	5.35	4 560	217	0.042	0.016	13	0.11	1.85	3.65
D324	9.13	2.85	0.054	40.4	32.8	10.8	9.07	49.1	4.42	890	174	0.053	0.046	20.1	0.28	5.88	67.04
D325	8.97	3.3	0.039	52.7	60.6	18.6	12.9	58	6.01	107	372	0.051	0.04	19.75	0.52	1.72	39.99
D326	10.72	4.49	0.05	71.9	62.4	24.8	14.8	68.5	5.92	183	381	0.079	0.053	22.6	0.7	5.5	74.40
D328	13.22	5.07	0.049	90.5	89.2	32	18.3	76.4	5.36	102	328	0.057	0.069	23.6	0.93	6.25	86.20
D329	14.97	6.68	0.066	106	90.3	38.8	23.4	85.2	6.54	90.7	284	0.065	0.082	26.15	1.46	6.2	86.05
D330	3.05	0.56	0.022	12.2	9	2.55	1.63	26.1	6.78	4 700	192	0.02	0.022	9.7	0.16	2.62	1.76
D331	9.79	3.69	0.044	59.7	56	20.7	11.4	54.9	5.73	100	228	0.064	0.047	18.5	0.43	4.93	62.76
D332	3.73	0.96	0.01	10.2	17.2	4.07	5.45	25.3	4.75	49.4	74	0.02	0.017	10.7	0.072	0.1	2.65
D333	2.79	0.28	0.031	14	14.7	3.06	2.22	23.4	4.63	3 865	119	0.053	0.013	10.475	0.11	0.28	1.30
D334	2.84	0.2	0.024	12.2	17.3	2.64	1.74	21.5	4.31	3 800	124	0.029	0.017	9.82	0.14	-0.2	1.71
D335	3.28	0.63	0.044	14.8	12.5	3.73	2.22	27.4	4.1	4 650	153	0.035	0.021	13.2	0.14	0.45	1.45
D336	2.54	0.22	0.025	11.5	11.7	3.53	2.78	25.7	4.55	4 365	133	0.03	0.017	10.73	0.2	0.37	1.61
D337	4.66	2.98	0.068	38.9	36.2	7.12	6.78	37.8	4.08	2 100	859	0.058	0.019	16.3	0.13	-1.25	0.91
D338	5.67	1.97	0.045	30.3	30.1	9.72	5.49	41.5	5.54	2 070	194	0.047	0.021	17.4	0.23	3.49	9.05
D339	2.73	0.17	0.019	10.7	11.4	2.16	0.737	22.8	4.84	4 130	122	0.033	0.012	9.95	0.16	0	1.30
D340	2.57	0.59	0.026	8.99	25.5	4.68	6.42	29.3	4.72	475	336	0.011	0.018	12.45	0.056	1.41	1.89
D341	2.51	0.48	0.015	7.63	15.6	4.02	5.36	25.3	5.1	1 380	194	0.01	0.017	9.25	0.056	2.48	2.37
D342	3.3	0.49	0.022	7.87	13.5	3.2	4.87	23.4	5.05	2 410	153	0.019	0.009	10.1	0.056	2.56	3.31
D344	2.92	0.65	0.05	18.5	13.4	5.69	3.35	25.5	4.78	4 175	133	0.037	0.016	11.515	0.12	0.64	1.14
D346	3.06	0.33	0.033	13.9	15.1	4.99	3.37	23.6	5.07	4 300	146	0.042	0.016	9.4	0.2	0.83	2.32
D347	2.74	0.64	0.04	15.1	15.1	3.19	3.04	23.5	5.21	4 680	158	0.036	0.015	10.5	0.13	1.43	2.00
D348	3.43	0.68	0.027	15	8.4	3.06	3.52	24.5	6.31	4 610	147	0.032	0.025	8.78	0.3	0.62	2.30
D349	3.7	0.78	0.025	16.3	11.1	4.18	4.69	29.8	2.49	3 785	284	0.035	0.019	11.95	0.14	3.57	11.71
D350	2.87	0.3	0.018	8.47	4.1	2.16	3.25	22.6	4.28	4 130	139	0.019	0.011	8.56	0.19	1.94	0.94
D352	2.93	0.32	0.031	14.2	3.7	3.05	2.73	22.3	3.23	4 550	140	0.059	0.022	8.25	0.16	0.57	1.72
D353	3.23	3.33	0.03	25.4	43.7	8.78	8.68	44	4.11	97	379	0.017	0.034	10.75	0.2	2.04	1.59
D354	3.11	0.44	0.031	14	13.9	2.55	2.96	24.6	4.86	4 690	167	0.03	0.021	11.1	0.12		
D355	3.74	1.12	0.025	16.3	15.9	5.89	5.35	30.7	5.35	2 240	165	0.017	0.029	11.6	0.11	3.04	1.65
D356	10.31	4.33	0.043	69.9	59.6	27.3	22.8	73.5	7.71	471	260	0.07	0.035	21.6	1.29	4.83	64.70
D358	2.44	0.28	0.027	12.1	12.5	2.81	2.78	23.5	5.88	4 535	138	0.044	0.024	9.495	0.22	-0.07	0.00
D359	4.66	1.37	0.034	22.2	20.9	7.29	6.02	33.5	6.23	1 580	206	0.02	0.023	12.7	0.13	3.18	1.11
D361	5.81	3.26	0.047	52.1	55.1	15.3	13.5	51.1	5.6	1 150	149	0.04	0.039	17.7	0.56	1.12	4.48
D362	2.84	0.33	0.02	10.9	6	3.26	3.11	25.3	5.12	4 770	154	0.027	0.03	10.6	0.16	2.51	22.36
D363	2.61	0.46	0.02	11.8	4.7	2.74	3.64	23.8	5.06	3 700	131	0.02	0.014	10.3	0.1	1.98	1.29
D364	2.95	0.31	0.025	13.5	11.1	3.37	2.86	23	4.91	4 410	138	0.026	0.016	10.4	0.16	0.62	1.00
D365	9.1	3.88	0.025	50.9	49.7	18.1	14.6	58.4	6.34	69.1	386	0.104	0.041	18.8	1.65	5.43	1.46
D366	3.7	0.33	0.018	13	7.1	3.31	3.29	26.4	4.84	5 680	193	0.051	0.021	8.825	0.73		65.75
D367	3.39	0.33	0.021	11.5	5.5	2.98	3.51	23.7	4.74	4 070	159	0.036	0.032	8.71	0.24	0.64	0.00
D368	3.87	1.28	0.035	21.2	30.8	4.63	5.99	31.6	4.44	1 490	1212	0.014	0.016	11.7	0.093	2.94	2.64
D369	2.69	0.35	0.02	9.49	9.8	2.68	4.35	24.3	4.69	2 490	119	0.018	0.011	11.365	0.11	1.93	1.90
D370	3.04	0.43	0.028	13.8	24.5	2.61	3.2	23.3	5.27	3 900	203	0.026	0.011	9.08	0.13	1.42	1.08
D371	2.38	0.26	0.014	5.37	12.2	2.94	5.63	24	5.22	1 080	224	0.01	0.009	8.51	0.056	2.19	1.16
D372	3.43	0.5	0.051	18.9	15.6	2.32	2.9	22	5.13	3 230	173	0.039	0.027	2.29	0.14	0.39	0.93
D373	5.64	1.03	0.024	21.8	22.5	6.53	7.42	33.3	5.86	963	222	0.018	0.017	14.15	0.11	1.36	0.96
D374	2.37	0.31	0.015	8.00	10.4	2.64	4.87	23	4.94	964	163	0.013	0.009	8.93	0.027	2.33	1.81

续表 1

站位	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	MnO /%	V /μg·g ⁻¹	Cr /μg·g ⁻¹	Ni /μg·g ⁻¹	Cu /μg·g ⁻¹	Zn /μg·g ⁻¹	As /μg·g ⁻¹	Sr /μg·g ⁻¹	Zr /μg·g ⁻¹	Cd /μg·g ⁻¹	Hg /μg·g ⁻¹	Pb /μg·g ⁻¹	TOC /%	中值粒径 (Φ) /%	(Silt + Clay) /%
D375	3.57	1.28	0.04	22.3	33.2	5.93	6.16	32.9	4.68	1 890	1 363	0.041	0.024	13.9	0.15	3.01	0.95
D377	2.93	0.41	0.018	9.96	10.8	3.83	5.09	26.6	5.00	1 275	109	0.011	0.009	11.615	0.045	2.58	4.59
D378	3.3	0.41	0.022	10.9	10.4	2.97	4.5	23.5	5.08	1 590	215	0.007	0.011	10.1	0.072	2.63	1.24
D379	3.0	0.45	0.023	11	10.2	2.86	4.2	23.5	5.25	1 570	124	0.017	0.011	2.97	0.072	2.43	1.12
D380	6.42	1.11	0.04	23.1	17.7	6.87	6.98	35.4	5.4	2 120	924	0.049	0.041	17.2	0.39	2.04	1.34
D381	3.93	0.68	0.026	12.3	13.6	4.25	4.78	27.4	5.28	1 555	173	0.016	0.015	12.75	0.087	2.35	12.63
D382	3.55	0.64	0.024	11.6	7.4	3.52	4.92	26.5	5.38	1 380	189	0.018	0.046	11.1	0.061	2.41	1.28
Z261	2.12	0.58	0.014	8.94	9.00	5.54	9.18	22	1.31	51	34	0.025	0.008	18.6	0.059	0.47	1.36
Z264	4.78	1.02	0.024	20.7	6.3	7.6	17.6	32.3	1.39	101	335	0.042	0.032	22.6	0.086	2.19	2.76
Z273	8.27	1.93	0.037	25.3	22.4	9.85	15.2	53.2	0.995	122	618	0.096	0.113	23	0.68	3.46	2.23
Z288	4.51	0.37	0.013	7.61	8.6	6.98	15.2	21.7	3.97	166	24.2	0.026	0.023	17.5	0.038	0.26	12.11
Z298	5.09	1.51	0.018	33.3	32.6	9.84	12.4	36.1	0.511	126	390	0.031	0.095	17.3	0.52	4.00	0.02
Z305	5.39	3.59	0.022	62.0	86.1	25.8	24.9	59.3	3.57	52.1	482	0.073	0.21	21.5	1.1	4.73	47.47
Z311	5.55	0.89	0.023	16.8	6.2	6.01	13.6	29	4.00	712	166	0.032	0.02	21.5	0.2	1.58	62.99
Z314	6.37	2.81	0.018	72.4	58.4	23.9	30.1	60.9	6.53	85.9	244	0.151	0.198	22.1	13.76	5.94	0.67
Z327	9.15	3.93	0.027	74.2	74.2	23.5	13.7	46.1	2.66	94.6	310	0.04	0.041	22.9	0.55	5.32	89.48
Z343	0.67	0.52	0.028	8.86	13.3	11.6	5.72	23.8	3.87	4 450	108	0.065	0.029	14.8	0.14	1.45	83.00
Z345	2.37	0.6	0.025	15.6	15	6.33	6.24	25	2.79	3 270	152	0.045	0.043	13.3	0.15	2.59	0.05
Z351	12.75	6.64	0.039	119	97	43.5	27.3	80.7	5.02	82.4	295	0.099	0.089	25.1	3.54	5.32	2.26
Z360	7.94	3.39	0.023	58.6	45.7	21.3	28.4	58.7	8.99	69.8	116	0.128	0.169	20.3	3.77	4.5	75.06
Z376	0.56	0.33	0.022	12	17.8	5.55	13.5	21	3.93	1 910	77.7	0.041	0.048	14.1	0.12	1.89	23.63

仪器可分析沉积物粒径 0.2 ~ 2 000 μm, 测试依据文献[16]。实验过程对每批实验样品均加入标准样、设置重复样以及空白样, 来进行严格的质量监控。实验所得结果相对偏差均小于 10%, 符合质量要求。

数据的分析处理应用 SPSS 20 软件, 元素等值线图运用 Golden Software 公司的 Surfer 软件进行绘制。

3 结果与讨论

3.1 微量元素含量与污染程度

研究区表层沉积物中主量元素 Al₂O₃、Fe₂O₃、MnO 的平均含量(质量分数)分别为(7.15 ± 4.70)%、(2.51 ± 2.21)%和(0.04 ± 0.02)% (表 2)。微量元素中 Sr、Zr 的含量最高, 平均含量均超过 100 μg·g⁻¹, 分别为(1 253.60 ± 1 649.58) μg·g⁻¹和(372.40 ± 516.49) μg·g⁻¹。Cd 和 Hg 的含量最低, 平均含量仅为(0.054 ± 0.045) μg·g⁻¹和(0.050 ± 0.050) μg·g⁻¹, 而二者在样品中的最大浓度也不超过 0.3 μg·g⁻¹。V、Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb 的平均含量分别为(40.13 ± 32.65)、(35.92 ± 26.90)、(13.03 ± 11.46)、(11.56 ± 10.27)、(48.75 ± 27.00)、(5.48 ± 1.60)和(18.70 ± 8.66) μg·g⁻¹。微量元素平均含量由大到小的顺序为 Sr > Zr > Zn > V > Cr > Pb > Ni > Cu > As > Cd = Hg。

本研究所得到的微量元素含量与前人在此区域所做的研究结果具有一定相似性, 与中国其他沿海区域、地质单元相比显示明显的亏损现象。文献[17~19]分别对海口湾东部、海南北部红树林地区和万宁小海的表层沉积物进行了微量元素的研究。对比此次研究后发现(表 3), 本研究表层沉积物中的微量元素含量与前人研究结果相差不大, 大部分元素平均值介于三者之间, 说明本研究所得结果具有一定的可信性, 但林钟扬等^[19]在小海的研究中 Zn 和 Pb 的含量略微偏高, 其认为小海沉积物中 Zn、Pb 已经受到了周围人类活动因素的干扰。珠江口^[20]、长江口^[21]以及渤海湾^[22]地区是中国人口密集、工业最发达、城市化程度高的区域, 受人类活动影响较为明显, 是重金属环境污染研究的重点、热点区域。通过对比海南岛东北部滨海湿地表层沉积物中微量元素的含量与上述区域前人研究, 结果显示研究区底质沉积物中 Cr、Ni 和 Zn 的含量不及珠江口、长江口和渤海湾沉积物中含量的 1/2, Cu 和 As 的含量约为 1/3, Pb 的含量与长江口底质沉积物含量最接近, 而与珠江口和渤海湾相比也仅为二者的 1/2。研究区 Cd 和 Hg 的含量与珠江口、长江口和渤海湾含量差距巨大, Cd 含量仅为珠江口的 1/7、长江口的 1/71、渤海湾的 1/4; Hg 的含量也只是珠江口的 1/4 和长江口的 1/13。海南岛东北部底质沉积物微量元素的含量明显低于上述地区说明

人类活动给海南岛东北部海岸带所带来的生态环境压力还相当有限. 此外,研究区微量元素相比于各自在上地壳中的含量^[23],全球页岩均值^[24]和中国浅海沉积物^[25]均呈现出亏损的现象. 赵一阳等^[26]研究认为南海沉积物中微量元素的亏损现象与这一地区的气候条件有关,由于南海湿热多雨,化学风化

强度大,微量元素在风化过程中淋失较多造成南海底质沉积物中微量元素的亏损现象.

沉积物粒度与矿物组成对微量元素的含量具有重要的影响,为了消除这两种因素带来的影响,富集因子(enrichment factor,EF)是一个较为行之有效的方法,能够很好地反映沉积物中微量元素富集程

表 2 研究区 128 个表层沉积物元素含量统计

Table 2 Statistics of the element concentrations in 128 surface sediment samples from the study area								
元素	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	MnO /%	TOC /%	V /μg·g ⁻¹	Cr /μg·g ⁻¹	Ni /μg·g ⁻¹	Cu /μg·g ⁻¹
最小值	0.56	0.17	0.01	0.003	3.14	3.7	2.16	0.737
最大值	20.06	10.12	0.12	13.76	125	106	44.6	73.6
平均值	7.15	2.51	0.04	0.67	40.13	35.92	13.03	11.56
标准差	4.70	2.21	0.02	1.39	32.65	26.90	11.46	10.27
变异系数	0.66	0.88	0.56	2.06	0.81	0.75	0.88	0.89
元素	Zn /μg·g ⁻¹	As /μg·g ⁻¹	Sr /μg·g ⁻¹	Zr /μg·g ⁻¹	Cd /μg·g ⁻¹	Hg /μg·g ⁻¹	Pb /μg·g ⁻¹	中值粒径 (Φ)
最小值	21	0.511	31.9	24.2	0.007	0.007	2.29	-1.25
最大值	153	9.02	5 680	3 875	0.283	0.21	48.85	7.21
平均值	48.75	5.48	1253.60	372.40	0.054	0.050	18.70	3.16
标准差	27.00	1.60	1649.58	516.49	0.045	0.050	8.66	2.18
变异系数	0.55	0.29	1.32	1.39	0.83	0.91	0.46	0.69

表 3 海南岛东北部滨海湿地表层沉积物微量元素含量与其他研究比较/μg·g⁻¹

Table 3 Comparison of results from other researches and this study/μg·g ⁻¹												
元素	本研究	海口湾 ^[17]	琼北红树林 ^[18]	小海 ^[19]	珠江口 ^[20]	长江口 ^[21]	渤海湾 ^[22]	上地壳 ^[23]	全球页岩均值 ^[24]	中国浅海沉积物 ^[25]	ERL ^[30]	ERM ^[30]
V	40.13	—	—	—	—	—	—	60	130	70	—	—
Cr	35.92	31.65	41	38.46	82.3	—	101.4	35	90	60	81	370
Ni	13.03	—	—	—	39.1	27.6	40.7	20	68	24	20.9	51.6
Cu	11.56	12.41	16.57	8.21	46.7	32.9	38.5	25	45	25	34	270
Zn	48.75	27.53	37.2	81.86	110.2	87.5	131.1	71	95	65	150	410
As	5.48	8.9	9.41	6.43	26.36	14.5	—	1.5	13	7.7	8.2	70
Sr	1 253.60	—	—	—	108.7	—	—	350	300	230	—	—
Zr	372.40	—	—	—	134.7	—	—	190	160	210	—	—
Cd	0.054	0.29	0.04	0.115	0.37	3.83	0.22	0.098	0.3	0.065	1.2	9.6
Hg	0.05	0.019	0.047	0.047	0.19	0.68	—	—	0.4	25	0.15	0.71
Pb	18.70	16.7	14.57	36.52	40.9	20.6	34.7	20	20	20	46.7	218

度^[27]. 计算方式为:

$$EF = (S_m / S_{ref}) / (B_m / B_{ref})$$

式中,EF 为沉积物中元素的富集因子; S_m 为沉积物中元素含量; S_{ref} 为沉积物中参比元素的含量; B_m 为研究区元素的背景值; B_{ref} 为参比元素的背景值. 因为研究区沉积物中 Al 与绝大部分元素都呈强的相关性,所以本次研究采用 Al 作为参比元素. 研究区背景值采用赵一阳等^[25]发表的中国浅海沉积物中元素的含量.

箱型图能提供有关数据位置和分散情况的关键信息. 图 2 显示,研究区微量元素 Cu、Ni、Zn、V、Pb、Cr、As、Cd 和 Hg 绝大多数站位 EF 值在 2(图 2

中虚线)之下,按照 Southerland^[28] 的研究划分标准:

① EF < 2 为无~弱污染; ② 2 < EF < 5 为中污染; ③ 5 < EF < 20 为显著污染; ④ 20 < EF < 40 为高度污染; ⑤ EF > 40 为极度污染,研究区总体底质沉积物中 Cu、Ni、Zn、V、Pb、Cr、As、Cd 和 Hg 属于无~弱污染,表明海南岛东北部沿海生态环境状况良好. 然而图 2 中仍有许多 EF 值异常点(“+”符号),通过对这些元素富集因子异常的样品站位进行统计发现样品 Z343 中 Cu、Ni、Zn、As 的 EF 值都介于 2~5,呈中污染; Pb、Cd 的 EF 值大于 5 小于 20,达到显著污染的程度; Z376 站位中 Ni、Zn、Cr 的 EF 值大于 2 小于 5,属中污染; Cu、Pb、As、

Cd 的 EF 值均大于 5 小于 20,呈显著污染. Z343 和 Z376 站位沉积物样品几乎所有微量元素相对于中国浅海沉积物表现富集. Z343 毗邻文昌市会文镇,是享誉全国的“虾谷”,水产养殖业发达. 水产养殖业对海岸带底质沉积物中重金属含量有很大影响^[29]. 尤其在养殖过程中含有重金属的消毒剂广泛使用,能够使区域底质沉积物中的重金属含量明显增加. Z376 文昌市龙马乡是海南有名的锆钛矿产区,采矿活动中污水排放可能是沿岸沉积物中重金属富集的重要因素. 除此之外,南渡江河口三角洲的 Z261 中 Pb,东寨港演丰镇 D302 和 Z314 的 Cd,EF 值大于 2,同样呈中污染,这些站位也应值得关注. 海南岛东北部滨海湿地沉积物中 Sr、Zr 呈现出异常富集,可能是因为底质中存在相对较多的生物钙质介壳和重矿物锆石的缘故.

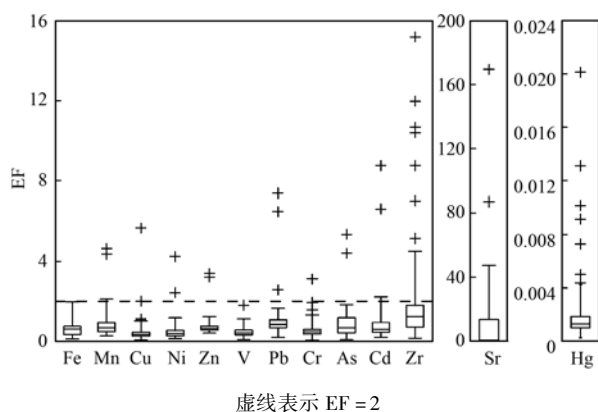


图 2 海南岛东北部滨海湿地沉积物元素富集因子(EF)箱线图

Fig. 2 Boxplot of trace elements enrichment factor (EF) in the study area

为了评价东北部滨海湿地沉积物中微量元素可能对底栖生物带来的负面影响本次研究采用 Long 等^[30]建立的沉积物质量基准 ERL (effects range-low) 和 ERM (effects range-median). 当沉积物中微量元素含量小于 ERL 基准值时,沉积物几乎不会对底栖生物带来负面影响;当含量超过 ERM 时对底栖生物的负面影响则会经常发生;微量元素含量介于两者之间生物危害则偶有发生^[22, 30]. 研究区沉积物微量元素的统计结果显示各采样点元素含量均小于 ERM 基准值,且全部站位的 Cd 含量低于 ERL 基准值. 其他金属中 Cu、Pb、Zn、Cr、As、Hg 分别有 98%、99%、99%、91%、93%、95% 的站位相应元素含量在 ERL 基准值之下,表明绝大部分站位 Cu、Pb、Zn、Cr、As、Hg 含量几乎不会对底栖生物造成潜在的负面影响. 然而存在 22% 的沉积物样品中 Ni 含量介于 ERL 和 ERM 之间,说明 22% 的站位

所在的区域底质沉积物中 Ni 的含量会对底栖生物带来偶然的负面影响,应该引起相关部门的重视.

3.2 元素的分布特征与沉积环境

研究区 14 种元素、TOC、沉积物粉砂 + 黏土 (silt + clay) 的 Pearson 相关系数计算结果 (双尾检验、显著性水平见表 4) 表明,大部分元素之间存在显著的相关关系且水平分布特征也具有很大程度上的相似性. Al_2O_3 与 Fe_2O_3 、 MnO 、Ni、Zn、V、Pb、Cr、Cu、Cd、Hg 相互间相关关系显著 ($P > 0.01$),相关系数都大于 0.6,呈现出强-极强的相关性,表明它们可能存在着相同的来源. 水平分布趋势 (本研究仅列出 Al 加以解释说明,图 3),主要以南渡江、海口湾,文昌/文教河,万泉河等河口区和东寨港,万宁小海等海湾、潟湖区含量较高,而在文昌市与琼海市沿岸元素含量较低. 南渡江、万泉河和文昌/文教河径流丰富,年均输沙量分别为: 37.305×10^4 、 392×10^4 和 $10 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[31,32]. 陆地风化作用所产生的物质随地表径流搬运,其中小部分沉积于河床,大部分随搬运介质运移至入海口. 当河流接近或到达入海口时,河道加宽,流速减弱,加之潮流顶托会使部分以碎屑态搬运的物质由于搬运动力条件不足等物理条件的改变而沉淀下来. 由于河口区咸淡水混合作用,离子强度的增加,一些以离子状态被搬运的元素同时因河口地区化学条件 (pH、Eh) 改变以凝絮或共沉淀的方式沉积下来. 东寨港为铺前湾的内湾,处于陆域环抱的隐蔽环境,波浪对湾内的影响很小,主要受潮流控制,长期受陆域泥沙输入和涨潮流挟带悬浮泥沙的淤积. 万宁小海是海南岛最大的潟湖湾,周围水系发达,沿岸漂沙作用使口门束窄,使其内仅受潮流作用影响^[33]. 海口湾则由于南渡江外泄泥沙,加之河口三角洲由东向西的沿岸输沙和河口支流弱的喷射流受涨潮作用使该区域成为泥沙的主要沉积环境^[34]. 综上,有利的沉积环境、稳定的物质来源保障使得元素在南渡江、海口湾、文昌/文教河、万泉河等河口区和东寨港、万宁小海等潟湖环境区含量较高. 文昌市和琼海市沿岸直面南海,水动力条件强,经常受热带气旋侵扰,沉积物类型主要以残留沉积物为主,是微量元素含量低的重要原因.

Sr 与大部分元素都有显著的负相关关系,相关程度弱到中等,水平分布特征与上述元素大致“互补”即: Sr 主要在文昌市和琼海市沿岸呈现高值,在海湾和河口区呈现较低的含量. 其分布特征主要受其物源影响. Sr 主要来源于海洋生物碎屑沉积^[35],

表 4 海南岛东北部滨海湿地表层沉积物元素间相关系数矩阵¹⁾

Table 4 Correlation matrix of trace elements in surficial sediments of the coastal wetlands of northeastern Hainan Island

	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	Cu	Ni	Sr	Zn	V	Pb	Cr	Zr	As	Cd	Hg	TOC	Silt + Clay
Al ₂ O ₃	1.00															
Fe ₂ O ₃	0.93	1.00														
MnO	0.69	0.75	1.00													
Cu	0.76	0.73	0.50	1.00												
Ni	0.86	0.88	0.57	0.85	1.00											
Sr	-0.57	-0.57	-0.29	-0.52	-0.53	1.00										
Zn	0.97	0.95	0.71	0.82	0.90	-0.57	1.00									
V	0.92	0.93	0.68	0.83	0.97	-0.52	0.94	1.00								
Pb	0.94	0.88	0.68	0.81	0.83	-0.59	0.94	0.87	1.00							
Cr	0.84	0.90	0.58	0.77	0.95	-0.57	0.89	0.95	0.80	1.00						
Zr	0.08	0.13	0.36	-0.06	-0.04	-0.13	0.10	0.08	0.12	0.12	1.00					
As	0.53	0.55	0.49	0.43	0.47	-0.26	0.57	0.51	0.45	0.45	0.04	1.00				
Cd	0.70	0.62	0.34	0.66	0.67	-0.31	0.74	0.69	0.70	0.65	0.02	0.37	1.00			
Hg	0.67	0.67	0.46	0.77	0.71	-0.46	0.73	0.71	0.71	0.68	-0.07	0.40	0.66	1.00		
TOC	0.38	0.39	0.11	0.48	0.47	-0.25	0.43	0.47	0.39	0.45	-0.04	0.29	0.57	0.60	1.00	
Silt + Clay	0.91	0.90	0.61	0.76	0.90	-0.55	0.90	0.93	0.84	0.88	-0.03	0.48	0.67	0.75	0.50	1.00

1) 黑体数据显著性水平 $P > 0.05$; 其余数据显著性水平 $P < 0.01$

Sr 与 Ca 元素化学性质相似,在生物成因的碳酸盐中 Sr 常常会取代其中 Ca 离子在晶体中的位置,能够以类质同象的形式出现在碳酸盐中^[20]. 海南岛地理位置和气候环境得天独厚,为珊瑚的生长发育及珊瑚礁的形成提供了优越的条件. 东岸的万泉河口以北的琼海、文昌两市沿岸珊瑚礁连续分布,形成长达 30 km,平均宽度达 4 km 的礁区^[35]. 这恰与研究区 Sr 元素的富集区域吻合,大量的珊瑚以及其他钙质生物碎屑沉积造成 Sr 的异常. As 的分布特征相比其他元素分布比较均匀,从 As 的变异系数(0.29)也可看出各采样点间 As 的含量差异相对其他元素较小. 产生这种分布特征的原因有两方面:一是由研究区底质沉积物中 As 的含量可能受其他来源影响. 种植业与水产养殖在研究区沿岸分布广泛,尤以文昌市沿岸为甚. 农业生产中杀虫剂,除草剂等农药的使用是 As 的重要来源. As 与其他元素的相关系数均小于 0.6,呈现中等到弱的相关关系,也说明 As 的来源有别于其他微量元素,很可能受人为来源影响. 二是因为文昌市、琼海市沿岸生物钙质碎屑沉积对 As 的沉积影响. 生物钙质碎屑能吸引 As 与其他元素(Al、Fe、Mn 等)凝絮和共沉淀反应产生的胶体物质,使其“被覆”在钙质矿物的表面. 沉积物颗粒越粗,颗粒间的碰撞频率越高,胶体的聚合更快速,进而促进 As 的凝絮和共沉淀的过程,将 As 保留在沉积物中^[36]. Zr 与大部分微量元素呈不相关关系,仅与 MnO 呈弱相关,主要在海南岛东部海岸龙滚镇附近富集. 龙滚镇附近区域酸性

火山岩发育为 Zr 提供了良好的物源,海岸基岩受海水冲击破裂风化,较重的锆石水迁移系数较小,搬运距离不远而以残留沉积物沉积下来. Zr 与 MnO 呈弱相关可能是因为锆石主要集中在颗粒较粗的沉积物中,沉积物孔隙度高,水体含氧量大,海水 pH 偏碱性,形成自生的 $\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 沉积.

3.3 元素的来源与影响因素

因子分析方法已经被许多研究证实能够在分析沉积物中元素的来源和影响元素富集的主要因素方面提供明确的信息^[27, 37]. 根据本研究因子分析前的 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin 检验) = 0.898, Bartlett 球度检验结果显示(df = 120, Sig. < 0.001),样品数据适合用于因子分析. 分析过程采用主成分提取方法,共提取出初始特征值大于 0.8 的 4 个公因子,这 4 个公因子可以解释 16 个变量中 85.486% 的方差信息;其中公因子 1(F1)所解释的比重最大,达到方差的 65.989%;公因子 2、3 和 4(F2 ~ F4)分别解释了方差的 8.509%、5.373% 和 5.214%,说明在沉积物中公因子 1 对各研究变量的影响占据主导地位. 经过最大方差法旋转后的因子载荷结果如表 5.

Zn、V、Fe₂O₃、Al₂O₃、Pb、Ni、Cr、Cu、Silt + Clay 在公因子 1 中具有很高的因子载荷,全部在 0.7 以上,说明这一公因子对这些元素含量的影响非常显著. Al 在风化作用中的地球化学行为比较保守,风化的岩石及碎屑中 Al 主要包含在晶格内,所以这一因子主要代表了研究区侵蚀搬运作用对微量

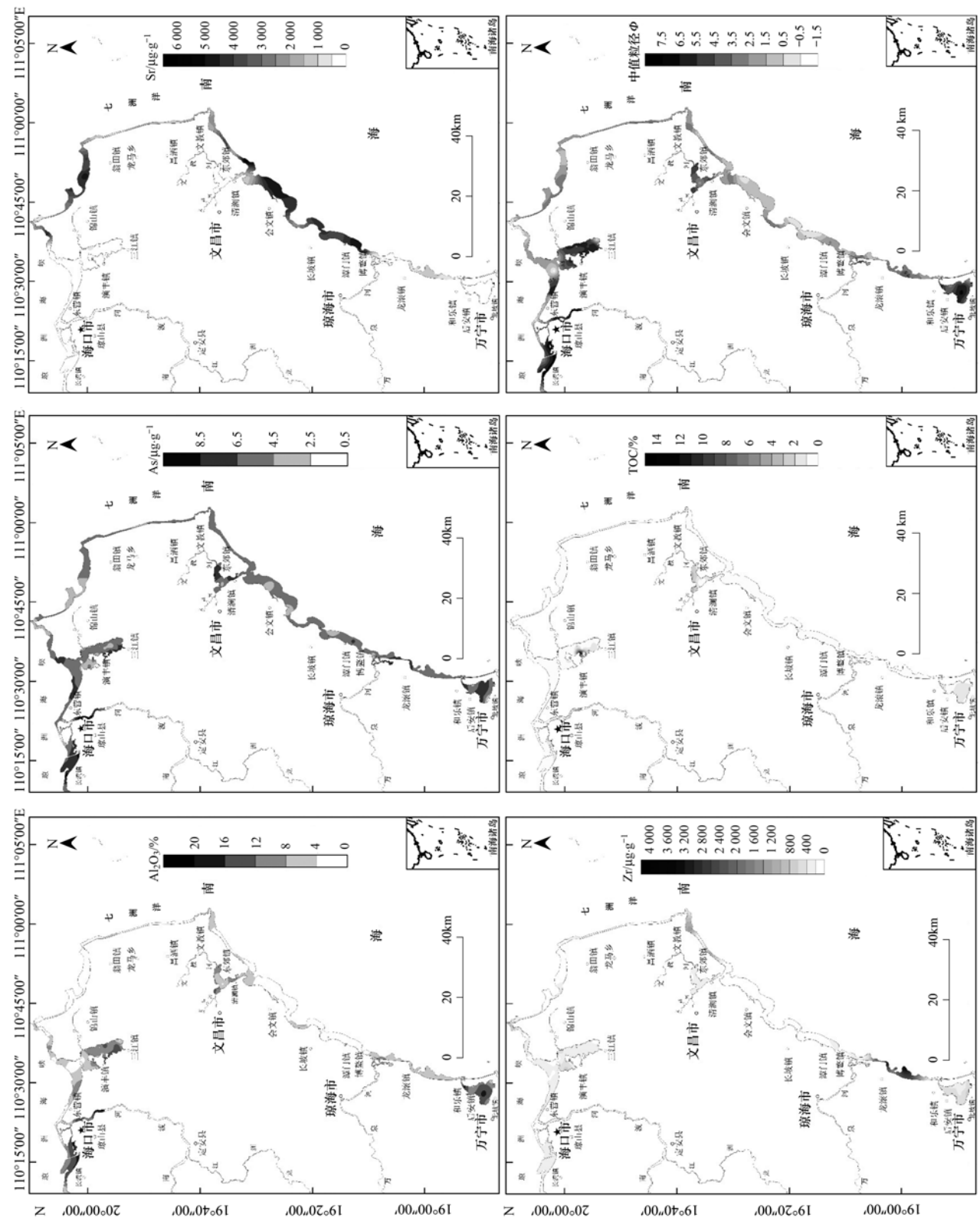


图3 海南岛东北部滨海湿地表层沉积物粒度 Φ_{50} 、微量元素和 TOC 含量等值线图
Fig. 3 Contour maps of trace element concentrations, percentage of TOC and Φ_{50} of surficial sediments from the coastal wetlands, northeastern Hainan Island

元素的影响,同时反映了微量元素的来源主要是自然风化产物. 通过表4各元素的相关性可以看出,

Al 与 MnO、As、Cd 和 Hg 具有显著相关关系,可以说明因子1控制着这些元素的部分来源. 而 Sr 在这

一公因子的因子载荷为 -0.795 , 可能是因为富 Sr 的海洋生物钙质介壳以及珊瑚碎屑常作为沉积物中微量元素的“稀释剂”, “稀释”了微量元素在沉积物中的浓度。

表 5 因子分析结果

Table 5 Results of factor analysis

元素	F1	F2	F3	F4
Al ₂ O ₃	0.825	0.242	0.424	0.047
Fe ₂ O ₃	0.822	0.212	0.452	0.098
MnO	0.522	-0.046	0.658	0.352
Cu	0.742	0.416	0.228	-0.110
Ni	0.830	0.336	0.312	-0.099
Sr	-0.795	-0.072	0.229	-0.161
Zn	0.819	0.308	0.440	0.056
V	0.819	0.329	0.407	0.025
Pb	0.831	0.270	0.329	0.090
Cr	0.829	0.315	0.280	0.066
Zr	0.027	-0.025	0.066	0.983
As	0.210	0.213	0.785	-0.021
Cd	0.473	0.671	0.238	0.002
Hg	0.583	0.599	0.204	-0.087
TOC	0.175	0.915	0.042	0.002
silt + clay	0.806	0.349	0.343	-0.067
初始特征值	10.558	1.425	0.860	0.834
解释方差/%	65.989	8.909	5.373	5.214

TOC 在第二个公因子中有最强的因子载荷 0.915. 这一公因子还包括 Cd 和 Hg, 且 TOC 与 Cd、Hg 的相关系数最高 (0.57、0.6, $P < 0.01$), 说明 Cd、Hg 和 TOC 有相同的来源, 可能为生物来源. 研究区东寨港是 TOC 主要富集区域 (图 3), 是我国唯一一个红树林国家级保护区. 前人研究表明红树植物对 Cd 和 Hg 具有明显的富集能力, 不仅能够从根系吸收这两种微量元素, Hg 还能通过红树叶子进入其植物体内^[38~40]. 随着红树植物的死亡、降解, 参与生物内循环的 Cd 和 Hg 能够以有机结合态保存在沉积物中. 有机质对 Cd、Hg 通过表面吸附、阳离子交换和螯合等作用形成金属络合物并与悬浮沉积物共沉淀于表层沉积物之中, 能够有效控制 Cd、Hg 的分布.

公因子 3 包括了 MnO 和 As, 其中 As 具有较高的因子载荷 0.758. 将这一因子解释为人为来源的一对元素组. As 是农业生产中杀虫剂和除草剂的重要成分, 而 Mn 在水产养殖中是重要的消毒剂. 在研究区表层沉积物中, Mn 与 As 具有显著的相关关系 (0.49, $P < 0.01$) 表明 As 和 Mn 可能来自人类生产活动的排放. As 在水体中通常以阴离子的砷酸和亚砷酸的形式出现, 而 Mn 的氢氧化物容易吸引此类阴离子并通过凝絮或共沉淀的方式形成难溶物

质, “被覆”在粗颗粒的沉积物表面^[36,41,42]. 海南岛东北部 Mn 和 As 的相关性 Hu 等^[27,43] 在海南西部昌化江口以及辽东湾也有报道.

因子 4 主要以 Zr 为主, 研究区残留沉积物中富含重矿物锆石, 以 Zr 为主要载荷的因子 4 代表的是粗粒沉积物对元素的富集作用, 而这个因子也对部分 Mn 起着微弱的控制作用.

4 结论

(1) 海南岛东北部滨海湿地底质沉积物中微量元素的含量 (除 Sr、Zr) 较低, 污染程度处于无 ~ 弱的程度, 且大部分元素对于区域底栖生物不会带来负面的影响, 生态环境整体良好. 但是在文昌市冯家湾和龙马乡沿岸站位微量元素均呈现中度 ~ 显著污染, 应该引起监管部门重视.

(2) 由于物源以及沉积环境的影响微量元素 Ni、Zn、V、Pb、Cr、Cu、Cd、Hg 分布主要集中于南渡江、海口湾、文教河/文昌河、万泉河等河口区和东寨港、万宁小海等海湾、潟湖区. As 的含量分布比较均匀可能受到了沿岸人类活动的干扰.

(3) 通过因子分析以及相关分析表明, 微量元素 Zn、V、Pb、Ni、Cr、Cu 和部分 Hg 的主要来源为自然风化作用的产物; Cd 和部分 Hg 来自于生物源. 虽然研究区微量元素的含量较低, 但是 As 和 Mn 依然受到了人类活动的干扰, 主要来源于人类排放.

致谢: 感谢海南省地质调查院在野外工作中提供的帮助和广州海洋地质调查局对本研究的资助.

参考文献:

- [1] Wang A J, Chen J. Spatial variations in depth-distribution of trace metals in coastal wetland sediments from Quanzhou Bay, Fujian Province, China [J]. Chinese Geographical Science, 2009, **19**(1): 62-68.
- [2] Valdés J, Vargas G, Sifeddine A, et al. Distribution and enrichment evaluation of heavy metals in Mejillones Bay (23°S), Northern Chile: Geochemical and statistical approach [J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, **50**(12): 1558-1568.
- [3] Dassenakis M, Scoullou M, Gaitis A. Trace metals transport and behaviour in the Mediterranean estuary of Acheloos river [J]. Marine Pollution Bulletin, 1997, **34**(2): 103-111.
- [4] Dou Y G, Li J, Zhao J T, et al. Distribution, enrichment and source of heavy metals in surface sediments of the eastern Beibu Bay, South China Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, **67**(1-2): 137-145.
- [5] Gao X L, Li P M, Chen C T A. Assessment of sediment quality in two important areas of mariculture in the Bohai Sea and the northern Yellow Sea based on acid-volatile sulfide and simultaneously extracted metal results [J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, **72**(1): 281-288.

- [6] Yang Y Q, Chen F R, Zhang L, *et al.* Comprehensive assessment of heavy metal contamination in sediment of the Pearl River Estuary and adjacent shelf[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, **64**(9): 1947-1955.
- [7] Förstner U, Wittmann G T W. *Metal pollution in the aquatic environment* [M]. (2nd ed.). Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1981. 17-18.
- [8] 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.
- [9] Vane C H, Harrison I, Kim A W, *et al.* Organic and metal contamination in surface mangrove sediments of South China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, **58**(1): 134-144.
- [10] Qiu Y W, Lin D, Liu J Q, *et al.* Bioaccumulation of trace metals in farmed fish from South China and potential risk assessment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, **74**(3): 284-293.
- [11] GB/T 14506. 28-2010, 硅酸盐岩石化学分析方法 16 个主次成分测定[S].
- [12] GB/T 20260. 8-2006, 海底沉积物化学分析方法 主量、次量成分分析 电感耦合等离子体原子发射光谱法[S].
- [13] NY/T 1121. 10、11-2006, 土壤检测 土壤总汞、总砷的测定[S].
- [14] GB 17378. 5-2007, 海洋监测规范 沉积物分析[S].
- [15] Gan H Y, Lin J Q, He H J, *et al.* Deposition history and ecological risk assessment of heavy metals in sediments from Xuwen Coral Reef Reserve, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(9): 6819-6830.
- [16] GB/T 12763. 8-2007, 海洋调查规范: 海洋地质地球物理调查规范[S].
- [17] 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.
- [18] 鲁双凤, 王鹏, 王军广, 等. 琼北红树林湿地表层沉积物重金属含量及环境质量评价[J]. *江苏农业科学*, 2011, **39**(4): 431-435.
- [19] 林钟扬, 倪建宇, 时连强, 等. 海南小海表层沉积环境及重金属污染综合评价[J]. *海洋学研究*, 2011, **29**(2): 12-23.
- [20] 甘华阳, 梁开, 郑志昌. 珠江口表层沉积物中微量元素地球化学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, **30**(4): 131-139.
- [21] 方明, 吴友军, 刘红, 等. 长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(2): 563-569.
- [22] Gao X L, Chen C T A. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay[J]. *Water Research*, 2012, **46**(6): 1901-1911.
- [23] Wedepohl K H. The composition of the continental crust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, **59**(7): 1217-1232.
- [24] Turekian K K, Wedepohl K H. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1961, **72**(2): 175-192.
- [25] 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): 地学*, 1993, **23**(10): 1084-1090.
- [26] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994. 194-197.
- [27] Hu B Q, Cui R Y, Li J, *et al.* Occurrence and distribution of heavy metals in surface sediments of the Changhua River Estuary and adjacent shelf (Hainan Island) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, **76**(1-2): 400-405.
- [28] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. *Environmental Geology*, 2000, **39**(6): 611-627.
- [29] Zhang W F, Liu X P, Cheng H F, *et al.* Heavy metal pollution in sediments of a typical mariculture zone in South China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, **64**(4): 712-720.
- [30] Long E R, Macdonald D D, Smith S L, *et al.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments [J]. *Environmental Management*, 1995, **19**(1): 81-97.
- [31] 杨志宏, 贾建军, 王欣凯, 等. 近 50 年海南三大河入海水沙通量特征及变化[J]. *海洋通报*, 2013, **32**(1): 92-99.
- [32] 辛成林, 任景玲, 张桂玲, 等. 海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1315-1323.
- [33] 刘兴健, 葛晨东. 海南岛小海潟湖沉积环境演变研究[J]. *海洋通报*, 2007, **26**(4): 71-79.
- [34] 谢华亮, 戴志军, 吴莹, 等. 海南岛南渡江河口动力沉积模式[J]. *沉积学报*, 2014, **32**(5): 884-892.
- [35] 吴钟解, 陈石泉, 陈敏, 等. 海南岛造礁石珊瑚资源初步调查与分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2013, (2): 44-50.
- [36] Song S X, Gallegos-Garcia M. Arsenic removal from water by the coagulation process [A]. In: Fanun M (Ed.). *The Role of Colloidal Systems in Environmental Protection* [M]. Elsevier B. V., 2014. 261-277.
- [37] Selvaraj K, Mohan V R, Szefer P. Evaluation of metal contamination in coastal sediments of the Bay of Bengal, India: geochemical and statistical approaches [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, **49**(3): 174-185.
- [38] 王鹏, 赵志忠, 马荣林, 等. 海南岛北部潮间带红树林对重金属的累积特征[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(5): 842-846.
- [39] Bei H, Li R L, Chai M W, *et al.* Threat of heavy metal contamination in eight mangrove plants from the Futian mangrove forest, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2014, **36**(3): 467-476.
- [40] 丁振华, 刘金铃, 李柳强, 等. 中国主要红树植物中汞含量特征与沉积物汞形态之间的关系[J]. *环境科学*, 2010, **31**(9): 2234-2239.
- [41] Shih Y J, Huang R L, Huang Y H. Adsorptive removal of arsenic using a novel akhtenskite coated waste goethite [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, **87**: 897-905.
- [42] Tu Y J, You C F, Chang C K, *et al.* Adsorption behavior of As(III) onto a copper ferrite generated from printed circuit board industry [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **225**: 433-439.
- [43] 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.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)$ Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caoheidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppes	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources: Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行