

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单	梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)
上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征	高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)
京津冀地区主要排放源减排对 PM _{2.5} 污染改善贡献评估	吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)
北京冬季 PM _{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析	乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)
2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析	路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)
利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染来源	刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)
南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析	迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)
喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性	张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)
生物滴滤塔净化含硫混合废气	叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)
西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析	房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)
城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力	秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)
三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征	王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)
隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素	赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)
白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析	王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)
唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价	吴婷婷, 王明猛, 陈旭峰, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)
三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征	邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)
电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)
九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险	林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)
厦门筼筮湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价	杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)
龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价	李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)
碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村高铁锰地下水效能与机制	孙楠, 湛燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)
高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势	张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)
预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验	杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)
Cu-Al ₂ O ₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物	徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)
过硫酸钾氧化去除 Cu(CN) ₂ 中的氰污染物	王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)
微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能	全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)
桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征	李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)
基于 A ² /O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)
污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)
全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性	齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)
饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响	李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曙 (1109)
快速启动厌氧氨氧化工艺	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)
一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式	完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)
侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响	马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)
厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究	陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)
有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响	戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)
过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制	白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)
不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果	董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)
全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤	杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)
纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应	衣俊, 程金平 (1173)
血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)
纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)
利用 <i>in vitro</i> 方法研究不同铁矿对土壤砷生物可给性的影响	钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)
不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制	温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)
施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变	刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)
施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究	王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)
模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响	陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)
土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO ₂ 浓度和温度升高的响应	刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)
岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)
板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响	宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)
酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响	姜继超, 尧倩 (1272)
《环境科学》征稿简则 (1092)	
《环境科学》征订启事 (1158)	
信息 (1166, 1261, 1271)	

厦门筭筭湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价

杨秋丽^{1,2}, 于瑞莲^{1*}, 胡恭任^{1,2}, 林承奇¹, 韩璐¹

(1. 华侨大学化工学院, 厦门 361021; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081)

摘要: 用 ICP-MS 测定了厦门筭筭湖表层沉积物中 15 种金属元素的含量, 分析了金属元素的分布特征, 并用改进的 BCR 提取法分析其赋存形态。结果表明, Cd、Cu、Sr、Pb、Zn 和 U 在不同湖区的含量表现为: 外湖 > 干渠 > 内湖; Cr、Co、Ni、V、Fe、Li、Rb 和 Mn 的含量表现为: 内湖 > 外湖 > 干渠。Cu、Zn 和 Pb 主要存在于可还原态; Cd 元素主要存在于弱酸溶态和可还原态; Co、Ni、U、Fe 和 Mn 元素主要存在于可还原态和残渣态; Li、V、Cr、Rb 和 Ba 主要存在于残渣态。潜在生态风险评估结果表明, 元素 V、Cr、Co、Ni、Zn、Cu、Cd 和 Pb 等处于轻微潜在生态风险水平。次生相与原生相分布比值法评价结果显示, Cu、Cd 和 Zn 表现出重度污染; Pb 表现出中度污染; Co、Mn、Sr 和 U 表现出轻度污染; Ni、Fe、Cr、V、Li、Ba 和 Rb 表现出无污染。筭筭湖表层沉积物已受轻微的金属元素污染, 处于轻微生态风险水平。

关键词: 沉积物; 金属元素; 赋存形态; 评价; 厦门筭筭湖

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-1010-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607125

Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen

YANG Qiu-li^{1,2}, YU Rui-lian^{1*}, HU Gong-ren^{1,2}, LIN Cheng-qi¹, HAN Lu¹

(1. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: Total concentrations of 15 metal elements in the surface sediments of Yundang Lagoon in Xiamen were determined using ICP-MS. The fractions were extracted by a modified BCR method. The results indicated that in different areas of Yundang Lagoon, the order of the concentrations of Cd, Cu, Sr, Pb, Zn and U was: outer lagoon > ditch > inner lagoon, the order for Cr, Co, Ni, V, Fe, Li, Rb and Mn was: inner lake > outer lake > ditch. Cu, Zn and Pb were mainly in the reducible phase; Cd was mainly in the acid soluble-extractable and reducible phases; Co, Ni, U, Fe and Mn were mainly in the reducible and residual phases; Li, V, Cr, Rb and Ba were dominated by residual phase. The potential ecological risk of metal elements suggested that V, Cr, Co, Ni, Zn, Cu, Cd and Pb were at a low potential ecological risk level. The results of ratio of secondary phase to primary phase (RSP) assessment indicated that Cu, Cd and Zn showed high pollution level; Pb showed moderate pollution level; Co, Mn, Sr and U were in a low polluted condition; Ni, Fe, Cr, V, Li, Ba and Rb showed no pollution. In general, Yundang Lagoon was in a low potential ecological risk.

Key words: sediments; metal elements; fractions; assessment; Yundang Lagoon in Xiamen

筭筭湖位于厦门岛西南部, 原是一座天然的港湾(筭筭港), 与厦门西海域相通, 用作母港码头, 后围海造田, 并于 1971 年筑起浮屿到东渡的西堤, 从此成为基本封闭的半咸水湖、城中湖, 仅有一个四孔节制闸在涨落潮期间完成部分海水与湖水的交换。20 世纪 90 年代之前, 环湖数十万居民的生活污水及数百家工厂的工业废水未经处理直接排放入湖, 致使水体污染严重^[1]。近年来, 当地政府对筭筭湖陆续进行了截污、清淤筑岸等工程, 水质和生态环境得到改善^[1,2]。但筭筭湖仍接纳了大量的点、面污染物, 湖泊沉积物污染日益严重^[3]。且筭筭湖内蟹类体内的 Pb、Cd 含量已超标^[2]。因此, 对筭筭湖沉积物中金属元素污染水平的研究具有重要意义。

筭筭湖沉积物金属元素污染的研究多考察 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Mn、Ag、Hg、Cd、As 和 Se 元素含量及污染大小^[4-6], 而对元素赋存形态和生态风险的研究较少。本文分析了筭筭湖表层沉积物中 15 种金属元素(Li、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Rb、Sr、Cd、Ba、Pb、U、Fe、Mn)的含量、空间分布特征及赋存形态, 并用潜在生态风险指数法和次生相与原生相分布比值法对其潜在生态风险和污染状况进行评价, 以期对筭筭湖金属元素污染防治提供一定参考。

收稿日期: 2016-07-19; 修订日期: 2016-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(21077036, 21177043); 环境地球化学国家重点实验室开放课题项目(SKLEG2016901); 华侨大学研究生科研创新能力培育项目(426)

作者简介: 杨秋丽(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境监测与评价, E-mail: karisyql@hotmail.com

* 通信作者, E-mail: ruiliany@hqu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

研究区域为筼筻湖,因挖淤填出白鹭洲、白鹭岛两个湖心岛,由西向东被湖滨中路、湖滨东路分为外湖、内湖、干渠3部分,水域面积 1.65 km^2 ,平均深度 2.5 m ,东西方向水域长度约 6 km . 沿湖周边为厦门市政治文化繁华区,分布着大量的居民区、宾馆酒店和商务金融办公建筑等.

2015年10月采集了10个位点的表层沉积物(见图1). 用干净的采样器取表层 $0\sim5\text{ cm}$ 的沉积物,置于干净的自封袋中,密封、贴标签,并做现场描述记录. 样品运回实验室后置于 -20°C 保存 24 h 以上. 用冷冻干燥机进行干燥,然后置于自然风中用干净的木棒将沉积物捣碎,并去除贝壳、碎石等杂物,过 2 mm 尼龙筛,再用玛瑙研钵研磨,过 $63\text{ }\mu\text{m}$ 尼龙筛,筛下样装入自封袋密封保存,备用.

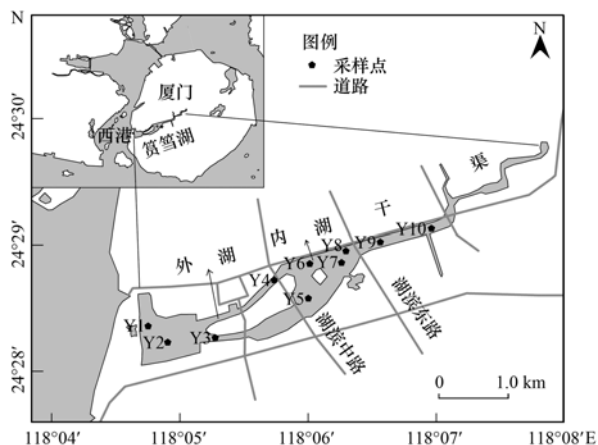


图1 厦门筼筻湖表层沉积物采样点分布示意

Fig. 1 Surface sediment sampling sites in Yundang Lagoon

1.2 样品分析

沉积物中的总碳(TC)用TOC分析仪(Multi N/C2100,德国)测定. CaCO_3 的测定:参考Loring等^[7]的方法并修正. 金属元素总量的测定依据GB/T 14506.30-2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第30部分:44个元素量测定》,用ICP-MS(Elan DCR-e,美国PerkinElmer公司)测定沉积物中Li、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Rb、Sr、Cd、Ba、Pb、U元素含量. Fe和Mn的含量用AAS测定. 测定的 $\text{RSD} < 5\%$. 分析过程中,同时测定试剂空白溶液. 并用近岸海洋沉积物成分分析标准物质(GBW 07314)进行质量控制,各元素的回收率均在国家标准参比物质的允许范围内.

金属元素形态分析采用改进的BCR四步提取

法^[8],提取液用ICP-MS测定. BCR提取四态(弱酸溶态F1、可还原态F2、可氧化态F3和残渣态F4)之和的回收率在 $70\% \sim 130\%$ 之间.

1.3 数据处理

采样图及地统计学分析使用ArcGIS 10.2软件,聚类分析采用SPSS 16.0软件. 其他作图使用GraphPad Prism 6软件.

2 结果与讨论

2.1 理化参数

筼筻湖表层沉积物的主要理化参数如图2所示.

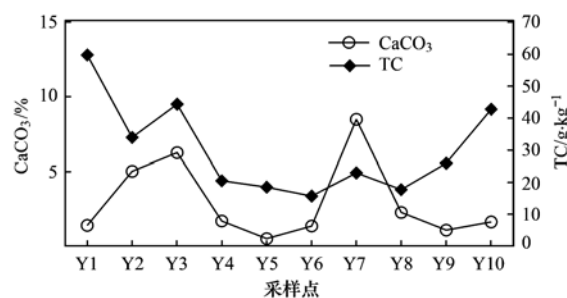


图2 筼筻湖表层沉积物中的主要理化参数

Fig. 2 Main physico-chemical parameters in the surface sediments of Yundang Lagoon

TC的含量范围是 $15.8 \sim 59.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量 $30.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,从外湖到干渠呈先降低再增加趋势. CaCO_3 的质量分数范围是 $0.5\% \sim 8.5\%$,平均值 3.0% ,在Y7位点出现最高值.

2.2 金属元素的空间分布

筼筻湖表层沉积物中15种金属元素的含量如表1所示. 并运用ArcGIS中的地统计学模块对金属元素含量进行可视化分析,选择反距离权重插值法,作各金属元素含量空间分布(图3). 理化性质和各金属元素的相关性如表2所示,以分析其对金属元素含量和分布的影响. 为进一步分类有相似空间分布或来源的元素,并分类讨论,进行了聚类分析(选择Pearson相关性),结果见图4. 聚类结果和空间分布情况一致.

对比中国浅海沉积物背景值^[9],Li、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Rb、Cd、Ba、Pb和U元素的平均含量超过背景值,Sr、Fe和Mn的平均含量均低于背景值. 且Cu、Zn、Cd、Pb和U的平均含量分别是背景值的5.0、3.6、7.9、3.3和3.0倍,有明显富集.

根据金属元素空间分布特征及聚类分析结果. 第一类元素为Cd、Cu、Sr、Pb、Zn和U,在不同湖区的含量大致表现为:外湖 $>$ 干渠 $>$ 内湖,且

表 1 笕竺湖表层沉积物中金属元素含量统计/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	Li	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Cd	Ba	Pb	U	Fe	Mn
最小值	34.7	65.0	53.5	9.43	26.4	44.4	183	84.2	88.8	0.212	353	53.9	4.60	26 108	280
最大值	71.7	103	95.4	15.0	40.2	125	351	149	234	1.10	570	96.6	7.31	35 292	453
平均值	51.0	81.3	67.2	12.2	30.0	75.1	232	128	119	0.512	441	66.8	5.62	30 782	361
背景值	38	71	61	12	24	15	65	96	230	0.065	412	20	1.9	31 000	530

表 2 笕竺湖表层沉积物中金属元素与理化参数的相关性¹⁾

项目	Li	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Cd	Ba	Pb	U	Fe	Mn
CaCO_3	0.44	0.47	0.86 **	0.78 **	0.82 **	0.41	0.23	0.16	0.43	0.21	0.07	0.31	-0.15	0.17	0.00
TC	-0.58	-0.54	0.05	-0.29	-0.25	0.70 *	0.42	-0.90 **	0.51	0.71 *	-0.21	0.52	0.63	-0.72 *	-0.82 **

1) * * 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

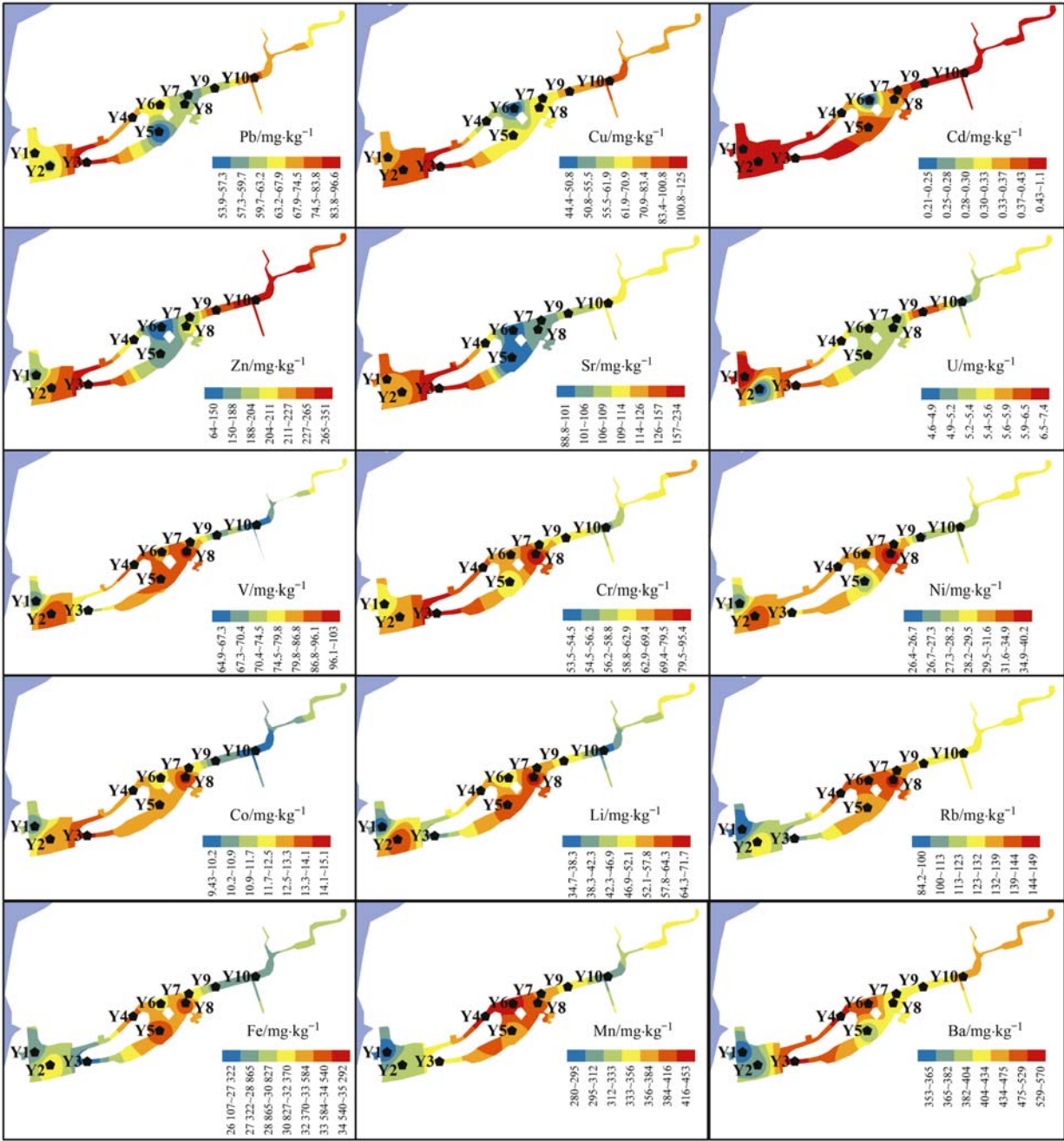


图 3 笕竺湖表层沉积物中金属元素含量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of metal elements in the surface sediment of Yundang Lagoon

Cd、Cu、Sr 和 Pb 元素在外湖 (Y3) 表现为最高含量, 可能有相同污染源. 且除 Sr 外, Cd、Cu、Pb、Zn 和 U 元素在各采样点的含量都超过背景值. TC 与 Cu、Cd 呈显著正相关. TC 的含量分布与该类元素的分布模式相似 (图 2), 说明有机质含量是影响该类金属元素分布的主要因素之一. 元素 Cd、Pb 和 Zn 一般受人为影响, 来自人为源, 在多元统计中能归为一类, 如张兆永等^[10]研究艾比湖中表层沉积物重金属发现, Cd、Pb、Hg 和 Zn 在聚类分析和主成分分析结果中都归为一类, 主要来自人为源. Cd、Cu、Pb 和 Zn 之间也通常表现出显著相关性, 说明有一定的同源性^[11,12].

第二类元素 Ba. Ba 在各采样点的含量范围是 353 ~ 570 mg·kg⁻¹, 平均含量 441 mg·kg⁻¹, 是背景值的 1.1 倍. Ba 的含量在不同湖区的含量大致顺序为: 外湖 > 内湖 > 干渠.

第三类元素为 Cr、Co、Ni、V、Fe、Li、Rb 和 Mn, 在不同湖区的含量大致表现为: 内湖 > 外湖 > 干渠, 且最高含量都出现在 Y7 位点. 如表 2 所示, CaCO₃ 与 Cr、Co、Ni 呈显著正相关, 分布模式相似. 说明沉积物中这些元素可能主要以碳酸盐或与 CaCO₃ 沉淀结合在一起的形式存在. 而 TC 与 Fe、Mn 和 Rb 都表现出明显的负相关.

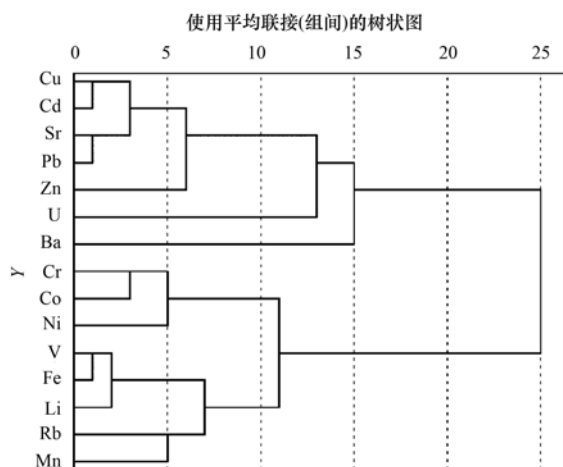


图 4 筼筻湖表层沉积物中金属元素元素的聚类分析结果

Fig. 4 Result of cluster analysis of metal elements in the surface sediments of Yundang Lagoon

2.3 表层沉积物中金属元素赋存形态

筼筻湖表层沉积物中金属元素的赋存形态结果见图 5. 考虑到前三态 (F1 + F2 + F3) 可表示金属不稳定组分^[13], 这些金属元素的前三态之和占总量比例 (质量分数) 排序为: Cu (78.6%) > Cd (76.3%) > Pb (73.0%) > Zn (72.4%) > Co

(60.6%) > Mn (54.8%) > U (50.0%) > Sr (47.2%) > Ni (45.0%) > Fe (38.7%) > Cr (32.9%) > V (27.2%) > Li (26.1%) > Ba (8.4%) > Rb (3.7%).

Cu 在 F1、F2、F3 和 F4 态的比例分别是 2.6%、59.8%、16.2% 和 21.4%. Cu 能与有机质结合形成难分解的有机络合物, 但也会受到铁锰氧化物吸附作用的影响^[14]. 在本研究中, Cu 在 F2 态中的含量明显高于 F3 态的含量, 说明 Cu 受铁锰氧化物的影响较大. 和 Cu 相似, Zn 元素也主要存在于 F2 态 (49.2%), 其次是 F4 态 (27.6%)、F1 (16.2%) 和 F3 态 (7.0%). Pb 元素最多存在于 F2 态 (71.2%), 其次是 F4 态 (27.0%), 其他形态之和为 1.8%. Cd 元素主要存在于 F1 (42.8%) 和 F2 态 (30.7%). 在 F3 态的比例较少, 占 2.9%, F4 态的比例为 23.7%. 值得注意的是, Cd 在 F1 态的比例最高, 其毒性也相对较大. 在 F1 态占的比例高的元素还有 Sr, 占 30.3%. Sr 在 F4 态占 52.8%, 在 F2 态和 F3 态中各占 15.8% 和 0.7%.

以上元素 (Cu、Zn、Pb 和 Cd) 在前三态的比例最高, 且总量的空间分布也相似 (图 3). 这几种元素在 F2 态的含量都相对较高, 在缺氧环境下可释放而具有较高潜在危害^[15]. 另外, Cd、Cu 和 Zn 的平均含 F2 量分别是背景值的 7.9、5.0 和 3.6 倍, 该类元素是影响筼筻湖底质环境的主要元素.

Co、Ni、U、Fe 和 Mn 元素的赋存形态相似, 主要存在于 F2 态和 F4 态. 其中 F4 态为主要赋存形态, 分别占 39.4%、55.0%、50.0%、61.3% 和 45.2%. 有研究也表明 Co、Fe 和 Ni 主要存在于 F4 态^[13,16]. 这些元素在 F2 态的含量分别占 37.8%、24.5%、40.0%、32.2% 和 28.9%. 这几种元素中除 U 外, 在总量的空间分布上也有相似性 (图 3).

Li、V 和 Cr 主要存在于 F4 态, 分别占 74.0%、72.8% 和 67.1%. 主要形态为 F4 态的元素还有 Rb 和 Ba, 分别占 96.3% 和 91.6%. 有其他研究也表明, 这些元素主要存在于 F4 态^[17,18]. F4 态存在于矿物晶格中, 不能被生物所利用. 另外, Fe 和 Mn 的含量低于背景值, 则 Fe、Mn、Li、V、Cr、Rb 和 Ba 主要来自自然源.

2.4 表层沉积物中金属元素污染评价

2.4.1 潜在生态风险评价

Håkanson^[19]在 1980 年提出潜在生态风险指数 (RI) 评价方法, 该方法不仅能反映沉积物的污染程度, 而且还反映沉积物对环境的潜在危害程度. 其

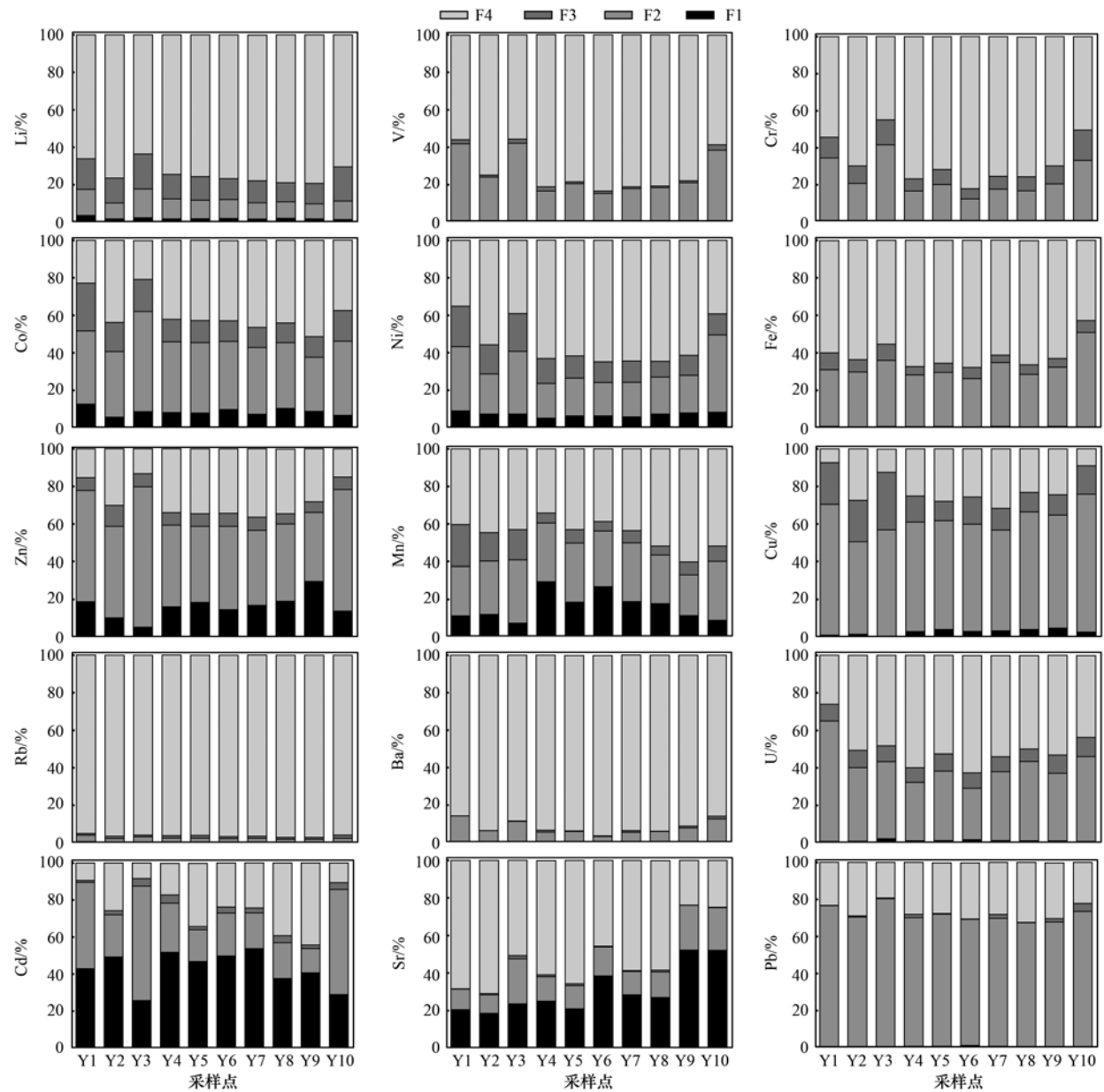


图5 筲箕湖表层沉积物中金属元素各形态所占百分比

Fig. 5 Percentage of fractions of metal elements in the surface sediments of Yundang Lagoon

计算公式如下：

$$RI = \sum E_r^i \tag{1}$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \tag{2}$$

$$C_f^i = C^i \cdot C_n^i \tag{3}$$

式中,RI 是沉积物的综合潜在生态危害指数; E_r^i 为元素 i 的潜在生态危害系数; T_r^i 为 i 的毒性响应系数,本研究采用徐争启等^[20] 的推荐值 ($Zn = 1, V = Cr = 2, Co = Ni = Cu = Pb = 5, Cd = 30$); C_f^i 为污染系数; C^i 为沉积物中 i 的实测含量; C_n^i 为工业化前 i 参照水平,本研究采用中国浅海沉积物背景值作为参照值. 由于该研究中的元素种类与 Håkanson

所指的有所不同,因此相应的 RI 限值需做调整^[21],见表 3.

表 3 RI 与潜在生态风险水平分级
Table 3 Degrees of contamination and potential ecological risk corresponding to the values of E_r^i and RI

E_r^i	RI	潜在生态风险水平
<40	<62	轻微
40~80	62~124	中等
80~160	124~248	较强
160~320	—	很强
≥320	≥248	极强

潜在生态危风险评价结果见表 4. 各元素的平均 E_r^i 大小排序为: Cd (16) > Cu (10) > Zn (7.1)

> Pb (6.7) > Ni (2.5) > V (2.3) > Cr (2.2) > Co (2.0). V、Cr、Co、Ni、Zn、Cu、Cd 和 Pb 的 E_r^i 小于 40,处于轻微潜在生态危害水平. 从 RI 来看,采样点 Y3 的 RI 大于 62,处于中等生态风险水平,其他采样点的 RI 均小于 62,处于轻微生态风险水平.

各采样点的 RI 值排序为: Y3 (80.0) > Y10 (61.0) > Y1 (50.1) > Y2 (47.6) > Y9 (46.4) > Y5 (41.4) > Y4 (41.1) > Y8 (41.0) > Y7 (43.7) > Y6 (33.7). 根据上述结果,筼筮湖各部分底质的潜在生态危害水平排序为: 外湖 > 干渠 > 内湖.

表 4 筼筮湖表层沉积物中金属元素潜在生态危害指数评价结果

采样点	E_r^i								RI	潜在生态 风险水平
	V	Cr	Co	Ni	Zn	Cu	Cd	Pb		
Y1	1.86	1.94	1.72	2.20	5.63	10.7	19.4	6.67	50.1	轻微
Y2	2.80	2.09	2.23	2.80	7.02	11.3	13.1	6.18	47.6	轻微
Y3	1.99	3.06	2.38	2.44	9.94	16.7	33.8	9.66	80.0	中等
Y4	2.63	2.32	2.15	2.63	6.55	7.40	10.4	7.02	41.1	轻微
Y5	2.45	1.88	2.08	2.26	5.72	8.45	13.1	5.39	41.4	轻微
Y6	2.41	2.10	2.03	2.48	5.63	5.92	6.52	6.59	33.7	轻微
Y7	2.90	3.13	2.50	3.35	6.62	9.05	10.1	6.05	43.7	轻微
Y8	2.14	1.75	1.92	2.29	5.91	8.09	13.2	5.73	41.0	轻微
Y9	1.90	1.93	1.68	2.24	7.60	10.5	14.6	5.97	46.4	轻微
Y10	1.83	1.83	1.57	2.28	10.8	12.0	23.2	7.54	61.0	轻微
平均值	2.3	2.2	2.0	2.5	7.1	10	16	6.7	48.6	轻微
潜在生态 危害水平	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	

2.4.2 次生相与原生相分布比值法

陈静生等^[22]把存在于原生矿物晶格中的金属称为原生地球化学相,而非残渣相中的金属为次生地球化学相. 次生相与原生相分布比值法(RSP)可用于区分金属元素的人为来源和自然来源,进而反映其生物可利用性与化学活性,评价其对环境污染的可能性大小;次生相的比例越大,金属元素释放到环境的可能性越大,潜在危害也越大^[23].

RSP 法的计算公式如下:

$$RSP = M_{\text{sec}}/M_{\text{prim}} \tag{4}$$

式中,RSP 为次生相与原生相比值,反映污染程度; M_{sec} 为次生相中金属元素含量(BCR 前三态之和); M_{prim} 为原生相中金属元素含量(BCR 残渣态量). 1 > RSP 为无污染,2 > RSP > 1 为轻度污染,3 > RSP > 2 为中度污染,RSP > 3 为重度污染. RSP 法评价

的结果见图 6.

各元素 RSP 平均值排序为: Cu (4.95) > Cd (4.78) > Zn (3.20) > Pb (2.80) > Co (1.76) > Mn (1.26) > Sr (1.18) > U (1.11) > Ni (0.92) > Fe (0.66) > Cr (0.55) > V (0.41) > Li (0.36) > Ba (0.09) > Rb (0.04),其中 Cu、Cd 和 Zn 表现出重度污染,Pb 为中度污染,Co、Mn、Sr 和 U 为轻度污染,Ni、Fe、Cr、V、Li、Ba 和 Rb 为无污染. 从采样点来看,各采样点的 RSP 平均值排序为: Y1 (2.95) > Y3 (2.74) > Y10 (2.65) > Y4 (1.27) > Y9 (1.15) > Y6 (1.12) > Y2 (1.12) > Y7 (1.05) > Y5 (1.02) > Y8 (0.98). 筼筮湖在不同湖区的污染水平表现为: 外湖 > 干渠 > 内湖. 与生态风险评估结果一致.

金属元素对环境的危害不仅与总量有关,更

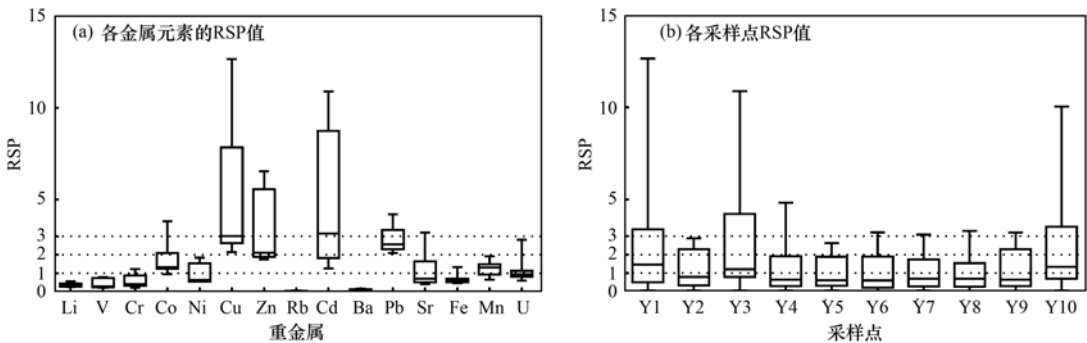


图 6 筼筮湖表层沉积物中金属元素的 RSP 值

Fig. 6 RSPs of metal elements in surface sediments of Yundang Lagoon

取决于其生物有效性^[24,25]。结合潜在生态风险评价结果,Cu、Zn、Cd 和 Pb 虽为轻微潜在生态危害水平,但平均含量分别是背景值的 5.0、3.6、7.9、3.3 和 3.0 倍,且其前三态之和所占比例较大,生物有效性也较大,因此 Cu、Zn、Cd 和 Pb 都属于筭筭湖的首要污染物。U 和 Co 表现为轻度污染,轻微潜在生态风险水平,但 U 的总量是背景值的 3 倍,其潜在危害不可忽视。Cr 和 V 处于轻微潜在生态风险水平,但其主要存在于 F4 态,RSP 评价结果为无污染。

3 结论

(1) Li、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Rb、Cd、Ba、Pb 和 U 元素的平均含量超过背景值,Sr、Fe 和 Mn 的平均含量均低于背景值。Cu、Zn、Cd、Pb 和 U 的平均含量分别是背景值的 5.0、3.6、7.9、3.3 和 3.0 倍。Cd、Cu、Sr、Pb、Zn 和 U 在不同湖区的含量表现为:外湖>干渠>内湖。Cr、Co、Ni、V、Fe、Li、Rb 和 Mn 的含量表现为:内湖>外湖>干渠。

(2) 对于赋存形态,金属元素元素的前三态之和占总量比例排序为:Cu (78.6%)>Cd (76.3%)>Pb (73.0%)>Zn (72.4%)>Co (60.6%)>Mn (54.8%)>U (50.0%)>Sr (47.2%)>Ni (45.0%)>Fe (38.7%)>Cr (32.9%)>V (27.2%)>Li (26.1%)>Ba (8.4%)>Rb (3.7%)。Cu 以可还原态为主。Zn 元素也主要存在于可还原态。Cd 元素主要存在于弱酸溶态(42.8%)和可还原态(30.7%)。Pb 元素主要存在于可还原态(71.2%),其次是残渣态(27.0%)。Co、Ni、U、Fe 和 Mn 元素的赋存形态相似,主要存在于可还原态和残渣态。Li、V、Cr、Rb 和 Ba 主要存在于残渣态。

(3) 各金属元素的平均潜在生态系数大小排序为: Cd (16)>Cu (10)>Zn (7.1)>Pb (6.7)>Ni (2.5)>V (2.3)>Cr (2.2)>Co (2.0)。筭筭湖各湖区的潜在生态危害水平排序为:外湖>干渠>内湖,元素 V、Cr、Co、Ni、Zn、Cu、Cd 和 Pb 处于轻微潜在生态危害水平。采样点 Y3 处于中等生态风险水平,其他采样点处于轻微生态风险水平。

(4) RSP 评价结果显示,Cu、Cd 和 Zn 表现出重度污染,Pb 为中度污染,Co、Mn、Sr 和 U 为轻度污染,Ni、Fe、Cr、V、Li、Ba 和 Rb 为无污染。与潜在生态风险评价结果相同,筭筭湖各部分的潜在生态危害水平排序为:外湖>干渠>内湖。

参考文献:

- [1] 欧寿铭,潘荔卿,魏育,等. 厦门筭筭湖纳潮排污能力研究[J]. 台湾海峡, 2002, **21**(1): 102-108.
Ou S M, Pan L Q, Wei Y, *et al.* A study on ability to remove contaminates by tidal flow in Yundang Lake of Xiamen [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2002, **21**(1): 102-108.
- [2] 阮金山. 厦门筭筭湖水产生物体内重金属含量及评价[J]. 海洋通报, 2006, **25**(5): 84-89, 96.
Ruan J S. Contents of and assessment on heavy metals in aquatic organisms in the Yuansdang Lake of Xiamen [J]. Marine Science Bulletin, 2006, **25**(5): 84-89, 96.
- [3] 谢小青. 厦门市筭筭湖综合治理工程介绍[J]. 厦门科技, 2003, (5): 30-31.
- [4] Ye G Q, Chou L M, Hu W J. The role of an integrated coastal management framework in the long-term restoration of Yundang Lagoon, Xiamen, China [J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2014, **57**(11): 1704-1723.
- [5] 李秀珠. 筭筭湖沉积物质量调查与评价[J]. 福建水产, 2004, (4): 24-28.
Li X Z. Assessment on the quality of sediment in Yundang Lagoon [J]. Journal of Fujian Fisheries, 2004, (4): 24-28.
- [6] Chen C X, Lu Y H, Hong J Q, *et al.* Metal and metalloid contaminant availability in Yundang Lagoon sediments, Xiamen Bay, China, after 20 years continuous rehabilitation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **175**(1-3): 1048-1055.
- [7] Loring D H, Rantala R T T. Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter [J]. Earth-Science Reviews, 1992, **32**(4): 235-283.
- [8] Yu R L, Hu G R, Wang L J. Speciation and ecological risk of heavy metals in intertidal sediments of Quanzhou Bay, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **163**(1-4): 241-252.
- [9] 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: 化学, 1993, **23**(10): 1084-1090.
- [10] 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, Abuduwaili J, Jiang F Q. Sources, pollution statue and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Aibi Lake, northwest China [J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 490-496.
- [11] 李啸宇,何祥英,罗万次,等. 广西防城湾表层沉积物重金属的分布及其潜在生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 2016, **35**(5): 712-717.
Li X Y, He X Y, Luo W C, *et al.* Distribution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in surface sediments of Fangcheng bay of Guangxi [J]. Marine Environmental Science, 2016, **35**(5): 712-717.
- [12] 吕书丛,张洪,单保庆,等. 海河流域主要河口区域沉积物中重金属空间分异及生态风险评价[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4204-4210.
Lü S C, Zhang H, Shan B Q, *et al.* Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in the estuaries surface sediments from the Haihe River basin [J]. Environmental Science, 2013, **34**(11): 4204-4210.
- [13] Yıldırtm G, Tokaltoğlu Ş. Heavy metal speciation in various

- grain sizes of industrially contaminated street dust using multivariate statistical analysis [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **124**: 369-376.
- [14] 何灿, 高良敏, 刘玉玲, 等. 淮南泥河沉积物中重金属总量及形态分析[J]. *环境化学*, 2010, **29**(4): 766-767.
- [15] Liu H Q, Liu G J, Wang J, *et al.* Fractional distribution and risk assessment of heavy metals in sediments collected from the Yellow River, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(11): 11076-11084.
- [16] Sakan S, Popović A, Anđelković I, *et al.* Aquatic sediments pollution estimate using the metal fractionation, secondary phase enrichment factor calculation, and used statistical methods[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2016, **38**(3): 855-867.
- [17] 于瑞莲, 王荔娟, 胡恭任, 等. 晋江感潮河段沉积物重金属赋存形态及潜在生态风险[J]. *地球与环境*, 2008, **36**(2): 113-118.
- Yu R L, Wang L J, Hu G R, *et al.* Speciation and potential ecological risk of heavy metals in sediments from tidal reaches of the Jinjiang River[J]. *Earth and Environment*, 2008, **36**(2): 113-118.
- [18] 徐亚岩, 宋金明, 李学刚, 等. 渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 732-740.
- Xu Y Y, Song J M, Li X G, *et al.* Variation characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(3): 732-740.
- [19] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [20] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(2): 112-115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [21] 李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 等. 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[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1321-1329.
- Li Y J, Zhang L Y, Wu Y W, *et al.* GIS spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of shallow lakes in Jiangsu province[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1321-1329.
- [22] 陈静生, 董林, 邓宝山, 等. 铜在沉积物各相中分配的实验模拟与数值模拟研究——以鄱阳湖为例[J]. *环境科学学报*, 1987, **7**(2): 140-149.
- Chen J S, Dong L, Deng B S, *et al.* Modeling study on copper partitioning in sediments, a case study of Poyang Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1987, **7**(2): 140-149.
- [23] 王鹏, 贾学秀, 涂明, 等. 北京某道路外侧土壤重金属形态特征与污染评价[J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(6): 165-172.
- Wang P, Jia X X, Tu M, *et al.* Heavy metal speciation of soil sample collected from either side of a thoroughfare in Beijing and heavy metal pollution evaluation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(6): 165-172.
- [24] Khalil M, El-Gharabawy S. Evaluation of mobile metals in sediments of Burullus Lagoon, Egypt [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, **109**(1): 655-660.
- [25] Liu J L, Li Y L, Zhang B, *et al.* Ecological risk of heavy metals in sediments of the Luan River source water[J]. *Ecotoxicology*, 2009, **18**(6): 748-758.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-rui, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₂ ²⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)