

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, 陈旭锋, 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)	

九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险

林承奇¹, 胡恭任^{1,2}, 于瑞莲^{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: 分别用改进的 BCR 四步提取法和稀硝酸单级提取法分析九龙江 17 个表层沉积物中 15 种重金属元素的赋存形态特征。BCR 四步提取法表明, 九龙江表层沉积物中大部分重金属(Fe、Ni、V、Ti、Ba、Sb、Ga、Cr 和 Sr)以残渣态为主; Mn 可提取态含量最高(占总量 83.8%), 其次为 Cd、Pb、Zn、Co 和 Cu(分别占总量 80.0%、75.5%、74.3%、70.8% 和 57.7%)。稀硝酸提取法表明, Pb、Mn、Cd、Co、Zn 和 Cu 的稀硝酸可提取态具有较高比例(分别占总量 70.4%、65.4%、58.7%、48.4%、44.5% 和 45.5%)。次生相与原生相分布比值法(RSP)评价结果表明, 九龙江表层沉积物中 Pb、Mn、Cd、Co、Zn 和 Cu 具有较高生态风险。综合对比两种提取方式分析结果, 各有优缺点。一般情况下, 稀硝酸单级提取法已足以分析沉积物中重金属生物有效性及生态风险。

关键词: BCR 提取; 稀硝酸单级提取; RSP; 生物有效性; 九龙江

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2017)03-1002-08 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.201607087

Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River

LIN Cheng-qi¹, HU Gong-ren^{1,2}, YU Rui-lian^{1*}, 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: Speciation characteristics of fifteen heavy metals in seventeen surface sediments from Jiulong River was analyzed using the modified BCR protocol and dilute HNO₃ method, respectively. The results of the modified BCR protocol showed that most of the elements (Fe, Ni, V, Ti, Ba, Sb, Ga, Cr and Sr) existed mainly in residual fractions, and extractable fraction was dominant for Mn (83.8%), followed by Cd, Pb, Zn, Co and Cu (80.0%, 75.5%, 74.3%, 70.8% and 57.7%). The results of dilute HNO₃ method showed that the proportions of the dilute HNO₃-extractable fractions of Pb, Mn, Cd, Co, Zn and Cu were higher (70.4%, 65.4%, 58.7%, 48.4%, 44.5% and 45.5%). The assessment results of RSP (ratio of secondary phase to primary phase) indicated that Pb, Mn, Cd, Co, Zn and Cu in surface sediments of Jiulong River had higher ecological risks. Both extraction methods had merits and demerits respectively. In general, the dilute HNO₃ method is enough to analyze the bioavailability and ecological risk of heavy metals in sediments.

Key words: BCR protocol; dilute HNO₃ method; RSP; bioavailability; Jiulong River

水体沉积物对水域污染特征具有指示作用, 并可较好反映自然因素与人类活动对水体环境的长期影响^[1]。重金属因其高毒、不可降解和生物富集等特性而被视为沉积物中重要的污染物^[2]。沉积物中重金属可能因人类活动或自然条件改变等而再次释放到上覆水体, 造成水环境的“二次污染”^[3]。

重金属在沉积物中以各种形态存在, 不同形态表现出不同的化学活性、生物可利用性以及潜在生态毒性等, 因此, 单以沉积物中重金属总量很难全面表征污染特性及其对水生生物的毒性效应^[4~6]。研究沉积物中重金属赋存形态有助于进一步了解沉积物中重金属迁移性、生物有效性及潜在生态毒性^[7, 8]。环境工作者针对沉积物中重金属赋存形态的研究形成了不同的提取方法, 根据提取方法的流程复杂程度可以将这些提取方法归纳为两类:

单级提取法(如稀硝酸单级提取法^[9])和多级连续提取法(如改进的 BCR 四步连续提取法^[10])。已有不少报道运用不同提取方法对重金属赋存形态进行研究及比较分析, 但目前尚未形成统一的标准方法^[11, 12]。

九龙江是福建省第二大河流, 主要包括北溪和西溪两条支流, 是海峡西岸经济区主要的饮用水源和工农业生产水源, 水环境安全意义重大^[13, 14]。该流域有数百万人口, 农业及畜禽养殖业较发达, 沿途分布着众多企业如采矿业、化肥厂、燃煤电厂等。

收稿日期: 2016-07-13; **修订日期:** 2016-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(21177043, 21077036); 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计划资助项目(423)

作者简介: 林承奇(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境监测与评价, E-mail: linchengqia@163.com

* 通信作者, E-mail: rui liany@hqu.edu.cn

近年来,随着流域工农业生产以及城市化、工业化的发展,流域已受到一定程度污染^[15]. 目前对九龙江流域重金属污染的研究主要集中于河口区,且主要基于重金属总量进行评价,缺乏对九龙江流域沉积物重金属赋存形态研究^[16, 17].

本研究分别通过改进的 BCR 四步连续提取法和稀硝酸单级提取法提取九龙江(北溪和西溪)共 17 个表层沉积物样品中的 15 种重金属,测定各形态含量,并用次生相与原生相分布比法分别对两种提取方法的结果进行评价,分析两种提取方法优缺点,以期对沉积物重金属赋存形态提取方法的选择及评价方法标准的建立提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集与预处理

2012 年 10 月期间,枯水期水位最低时采集了九龙江表层沉积物样品共 17 个(图 1). 利用手持 GPS 进行定位,记录经纬度信息. 在每个采样点的 5 m × 5 m 范围内采集 3 个表层 0 ~ 5 cm 沉积物样品混合均匀作为一个样品. 将样品装入干净的自封袋中密封,于 -20℃ 条件下冷冻 24 h,然后将样品经冷冻干燥、去除杂物及研磨后过 63 μm 尼龙筛,筛下样装入干净的自封袋中保存备用.

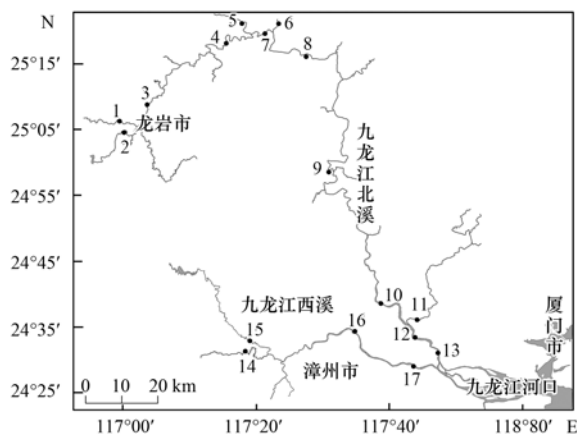


图 1 九龙江表层沉积物采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites of surface sediments in Jiulong River

1.2 样品分析

沉积物中重金属赋存形态分别采用改进的 BCR 四步提取法和稀硝酸单级提取法进行提取.

改进的 BCR 四步提取法将重金属分为 4 个形态^[10]: F1 弱酸溶态、F2 可还原态、F3 可氧化态和 F4 残渣态. 根据形态特征,将前 3 态(F1、F2 和 F3)称为生物有效态,将 F4 态称为不可利用态^[18]. 各形态提取步骤见图 2,各形态提取液置于冰箱 4℃

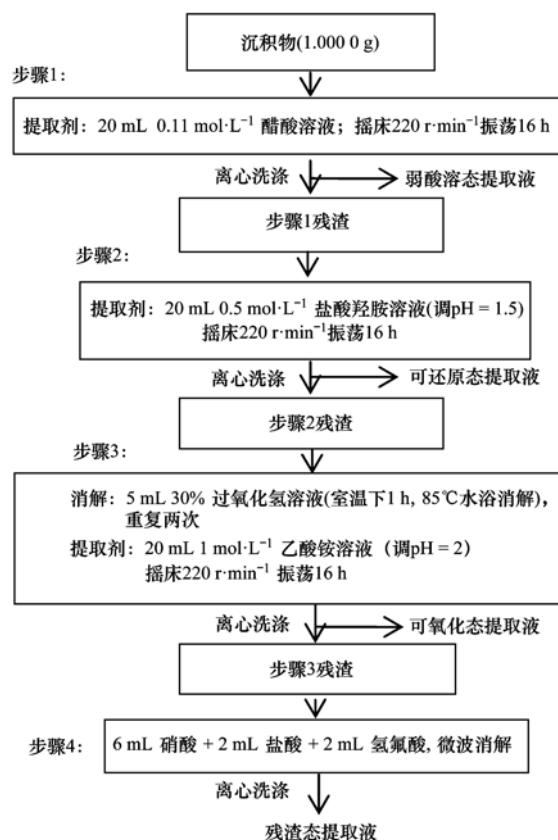


图 2 改进的 BCR 提取法分离提取示意

Fig. 2 Schematic diagram of the modified BCR protocol

保存待测.

稀硝酸单级提取法利用 0.5 mol·L⁻¹ 硝酸溶液直接提取沉积物中酸可提取态重金属,以评估重金属的生物可利用性^[9]. 具体提取步骤为:准确称取约 0.2 g 沉积物样品于 50 mL 塑料离心管中,加入 10 mL 0.5 mol·L⁻¹ 硝酸溶液,于 (22 ± 5)℃ 下振荡提取 24 h. 4 000 r·min⁻¹ 离心 10 min,上清液过滤至 50 mL 容量瓶中. 用 0.5 mol·L⁻¹ 硝酸溶液洗涤 2 ~ 3 次(每次约 10 mL),离心过滤后合并上清液. 用 0.5 mol·L⁻¹ 硝酸溶液定容,置于冰箱 4℃ 条件下保存待测.

上述形态提取液中 Fe 和 Mn 元素用原子吸收光谱法(AAS, TAS-986 型,北京普析通用公司)测定; Zn、Ni、Pb、Cu、Cr、V、Co、Cd、Sr、Ba、Sb、Ti 和 Ga 元素用 ICP-MS (Optima 700DV 型,美国 PE 公司)测定.

实验所用试剂均为优级纯,实验过程中,每批样品处理过程均随机抽取一个样品作 3 次平行实验,同时做全程空白并以沉积物成分分析标准物质(GBW07314)做全程质量监控. BCR 四态回收率为 81.1% ~ 119.9%,平行样分析的相对标准偏差

(RSD)均小于 5%。

1.3 生态风险评价方法

根据重金属赋存形态特征,运用陈静生等^[19]提出的次生相与原生相分布比法(ratio of secondary phase and primary phase, RSP)进行评价。将沉积物中的原生矿物称为地球化学原生相,原生矿物的风化产物和外来次生物质统称为地球化学次生相,用存在于次生相中的重金属含量与存在于原生相中的重金属含量的比值来评价沉积物中重金属的污染水平,其计算方法如下:

$$RSP = M_{\text{sec}}/M_{\text{prim}} \quad (1)$$

式中,RSP 为次生相与原生相分布比值; M_{sec} 为沉积物次生相中的重金属含量,本研究以 BCR 前三态含量之和或稀硝酸可提取态含量为次生相重金属含量; M_{prim} 为沉积物原生相中的重金属含量,本研究以残渣态为原生相重金属含量。根据 RSP,重金属污染程度大小分为 4 个等级: $RSP < 1$ (无污染), $1 < RSP < 2$ (轻度污染), $2 < RSP < 3$ (中度污染), $3 < RSP$ (重度污染)。

2 结果与讨论

2.1 沉积物重金属 BCR 四态分布特征

九龙江表层沉积物重金属 BCR 四态含量统计列于表 1。从中可以看出,同种重金属各形态含量变异系数(CV)均较大,说明重金属各形态在空间分布上差异较大。例如,沉积物中 F1 态 Pb 含量的变异系数最大($CV = 2.01$),含量范围为 $0.294 \sim 45.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均为 $5.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根据沉积物中重金属各形态含量,计算各形态含量占总量比例,结果见图 3。从中可以看出,不同重金属的形态分布差异较大,例如,沉积物中 Pb 主要以 F2 态存在,其占总量比例为 $37.3\% \sim 72.2\%$,平均为 55.1% ;沉积物中 Sb 则主要以 F4 态存在,其占总量比例为 $66.2\% \sim 91.8\%$,平均为 80.3% 。从空间分布上看,九龙江表层沉积物中 Zn、Ni、Co、Cd 和 Sr 的生物有效态含量呈现出从上游往下游降低的趋势。各重金属 BCR 四态平均比例见图 4(a),Fe、Ni、V、Tl、Ba、Sb、Ga、Cu、Cr 和 Sr 主要以 F4 态存在;Pb 主要以 F2 态存在;Mn 主要以 F1 态和 F2 态存在;Zn、Cd 和 Co 的各形态所占比例类似。

沉积物中重金属不同形态具有不同的迁移性和潜在生态毒性^[20]。沉积物中重金属未受污染前形态组成相对稳定,而受到污染后,生物有效态含量会明显增加,更容易造成“二次污染”^[21]。

F1 态主要为可交换态和碳酸盐结合态,可在水体环境条件变化(如 pH 下降)时向水体迁移并能直接被生物利用,危害较大^[22]。九龙江表层沉积物中 Mn、Zn 和 Cd 主要以 F1 态存在,平均含量分别为 791.8 、 72.30 和 $0.534 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占总量平均比例分别为 41.5% 、 27.0% 和 33.4% 。此外,Ni、Co 和 Sr 也有一定比例以 F1 态存在,其平均含量分别为 2.36 、 2.54 和 $11.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占总量平均比例分别为 12.2% 、 19.3% 和 20.4% 。

F2 态主要为铁锰氧化物结合态,当沉积物中氧化还原电位降低或水体缺氧时,该形态重金属会释放到水体造成污染^[23]。九龙江表层沉积物中 Pb 和 Co 主要以 F2 态存在,其平均含量分别为 $120.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占总量平均比例分别为 62.5% 和 34.2% 。此外,Fe、Mn、Zn、Ni、Cu 和 Cd 也有一定比例以 F2 态存在,其平均含量分别为 6764 、 701.1 、 63.05 、 4.92 、 17.53 和 $0.401 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占总量平均比例分别为 20.9% 、 36.8% 、 23.6% 、 25.5% 、 23.5% 和 25.1% 。有研究表明,Pb 易与铁锰氧化物结合形成稳定的络合物,在氧化条件下不易释放^[24]。Pb 和 Co 主要以 F2 态存在可能与沉积物含氧条件较好有关。

F3 态主要为有机物和硫化物结合态,相对稳定,在较强的氧化条件下能向水体释放^[25]。九龙江表层沉积物中 Zn、Cu 和 Cd 的 F3 态占有一定比例,其平均含量分别为 64.31 、 18.29 和 $0.343 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占总量平均比例分别为 24.1% 、 24.5% 和 21.5% 。

F4 态主要存在于原生矿和次生矿的矿物晶格中,性质较稳定,几乎不能被生物所利用,只有通过化学反应先转化为可溶态才能对生物产生影响^[26]。九龙江表层沉积物中 Fe、Ni、V、Tl、Ba、Sb、Ga、Cu、Cr 和 Sr 主要以残渣态存在,平均含量分别为 22732 、 9.06 、 20.64 、 0.899 、 225.0 、 1.54 、 16.95 、 31.53 、 32.07 和 $38.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占总量平均比例分别为 70.1% 、 46.9% 、 74.8% 、 79.3% 、 72.7% 、 96.5% 、 67.7% 、 42.2% 、 71.6% 和 65.3% 。此外,Zn、Pb 和 Co 也有一定比例以 F4 态存在,平均含量分别为 67.61 、 47.31 和 $3.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占总量平均比例分别为 25.3% 、 24.5% 和 29.2% 。

根据形态特征,BCR 前 3 态(F1、F2 和 F3)称为生物有效态,从分析结果可知,九龙江表层沉积物中 Mn、Zn、Pb、Cu、Co 和 Cd 的生物有效态所占比例较高,其生物有效态平均含量分别为 1599 、

表 1 九龙江表层沉积物重金属 BCR 四态含量统计/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Concentrations of the four BCR fractions of heavy metals in the surface sediments from Jiulong River/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$												
形态	Fe				Mn				Zn			
	最大值	最小值	平均值	CV	最大值	最小值	平均值	CV	最大值	最小值	平均值	CV
F1	613.6	0.645	213.8	0.83	3 045	127.6	791.8	0.98	285.1	17.47	72.30	1.07
F2	12 511	1 237	6 764	0.43	3 618	124.8	701.1	1.24	271.4	13.91	63.05	1.09
F3	6 085	532.8	2 698	0.61	315.7	21.10	105.6	0.87	296.8	12.59	64.31	1.11
F4	51 270	11 598	22 732	0.49	1 386	72.44	309.1	1.07	178.4	26.96	67.61	0.54
有效态	18 854	1 772	9 676	0.46	5347	285.8	1599	0.97	853.3	43.98	199.7	1.05
	Ni				Pb				Cu			
	最大值	最小值	平均值	CV	最大值	最小值	平均值	CV	最大值	最小值	平均值	CV
F1	11.36	0.207	2.36	1.12	45.85	0.294	5.55	2.01	21.89	1.63	7.31	0.84
F2	20.69	0.274	4.92	1.09	662.8	16.30	120.4	1.53	85.81	5.03	17.53	1.17
F3	6.81	0.220	2.97	0.62	91.82	2.854	19.52	1.25	80.59	2.86	18.29	1.14
F4	18.17	2.23	9.06	0.39	196.6	10.18	47.31	1.17	168.1	7.15	31.53	1.58
有效态	31.34	0.701	10.25	0.89	721.8	20.45	145.5	1.46	177.2	12.95	43.12	1.05
	Cr				V				Co			
	最大值	最小值	平均值	CV	最大值	最小值	平均值	CV	最大值	最小值	平均值	CV
F1	1.41	0.073	0.416	0.85	2.11	0.001	0.446	1.43	8.19	0.348	2.54	0.87
F2	16.58	1.24	5.41	0.74	24.22	5.22	12.03	0.41	8.75	1.09	4.51	0.49
F3	25.29	1.34	6.90	0.80	9.86	1.24	2.71	0.72	4.20	0.732	2.29	0.41
F4	89.56	8.14	32.07	0.62	59.32	20.64	45.13	0.23	6.00	1.80	3.84	0.29
有效态	42.78	2.66	12.73	0.75	36.18	7.62	15.19	0.44	20.27	2.22	9.34	0.53
	Cd				Sr				Ba			
	最大值	最小值	平均值	CV	最大值	最小值	平均值	CV	最大值	最小值	平均值	CV
F1	4.28	0.045	0.534	2.01	22.05	2.96	11.96	0.50	58.02	12.27	27.96	0.41
F2	2.21	0.051	0.401	1.45	18.37	1.55	6.66	0.67	95.35	27.12	54.84	0.35
F3	2.49	0.032	0.343	1.85	4.40	0.616	1.67	0.64	39.20	2.74	12.87	0.74
F4	1.33	0.101	0.319	1.05	72.35	24.51	38.22	0.32	518.7	108.7	255.0	0.39
有效态	8.97	0.132	1.28	1.74	40.26	5.32	20.30	0.51	190.6	55.22	95.66	0.33
	Sb				Tl				Ga			
	最大值	最小值	平均值	CV	最大值	最小值	平均值	CV	最大值	最小值	平均值	CV
F1	0.059	0.000	0.016	1.05	0.073	0.002	0.026	0.92	5.95	1.24	2.52	0.50
F2	0.195	0.000	0.029	1.60	0.282	0.047	0.138	0.59	8.27	1.18	4.12	0.54
F3	0.058	0.001	0.010	1.38	0.244	0.014	0.071	0.75	2.89	0.416	1.44	0.50
F4	4.96	0.416	1.54	0.67	1.60	0.554	0.899	0.29	64.04	6.59	16.95	0.77
有效态	0.312	0.015	0.056	1.32	0.529	0.064	0.234	0.59	16.93	3.52	8.09	0.44

199.7、145.4、43.12、9.34 和 1.28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，占总量平均比例分别为 83.8%、74.3%、75.5%、57.7%、70.8% 和 80.0%。这些元素生物有效态含量较高，说明比较容易迁移且对水生生物具有较高的潜在生物毒性，应引起重视。

2.2 沉积物重金属稀硝酸可提取态分布特征

九龙江表层沉积物重金属稀硝酸可提取态含量统计列于表 2，稀硝酸可提取态重金属占总量比例分布见图 4(b) 和图 5。同种重金属稀硝酸可提取态含量的变异系数(CV)均较大，说明重金属稀硝酸可提取态在空间分布上差异较大。同时，不同重金属稀硝酸可提取态分布存在较大差异。

稀硝酸可提取态重金属为沉积物中能在一定酸性条件下释放的重金属，即在一定酸性条件下可被生物所利用，故可用于评价重金属生物可利用性，将其称为生物有效态。酸可提取态重金属含量越高，则具有越强的迁移能力并对水生生物具有越高的潜

在毒性风险。与 BCR 法提取结果类似，Pb、Mn、Cd、Co、Cu 和 Zn 的稀硝酸可提取态具有较高比例，其平均含量分别为 135.8、1246、0.937、6.38、33.98 和 119.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，占总量平均比例分别为 70.4%、65.4%、58.7%、48.4%、45.5% 和 44.5%。说明这些元素比较容易迁移且对水生生物具有较高的潜在生物毒性。

从空间分布上看，与 BCR 法可提取态结果类似，Zn、Ni、Co、Cd 和 Sr 的酸可提取态含量呈现比较明显的从上游往下游降低的趋势。这可能与上游工农业生产及畜禽养殖场污水排放有关。

2.3 沉积物重金属生态风险评价

运用次生相与原生相分布比值法对九龙江表层沉积物中重金属生态风险进行评价，结果见图 6。

以 BCR 前 3 态之和为次生相重金属含量，以 F4 态为原生相重金属含量。结果可知，九龙江表层沉积物中 Mn 平均 RSP 值为 5.9，88.2% 采样点表

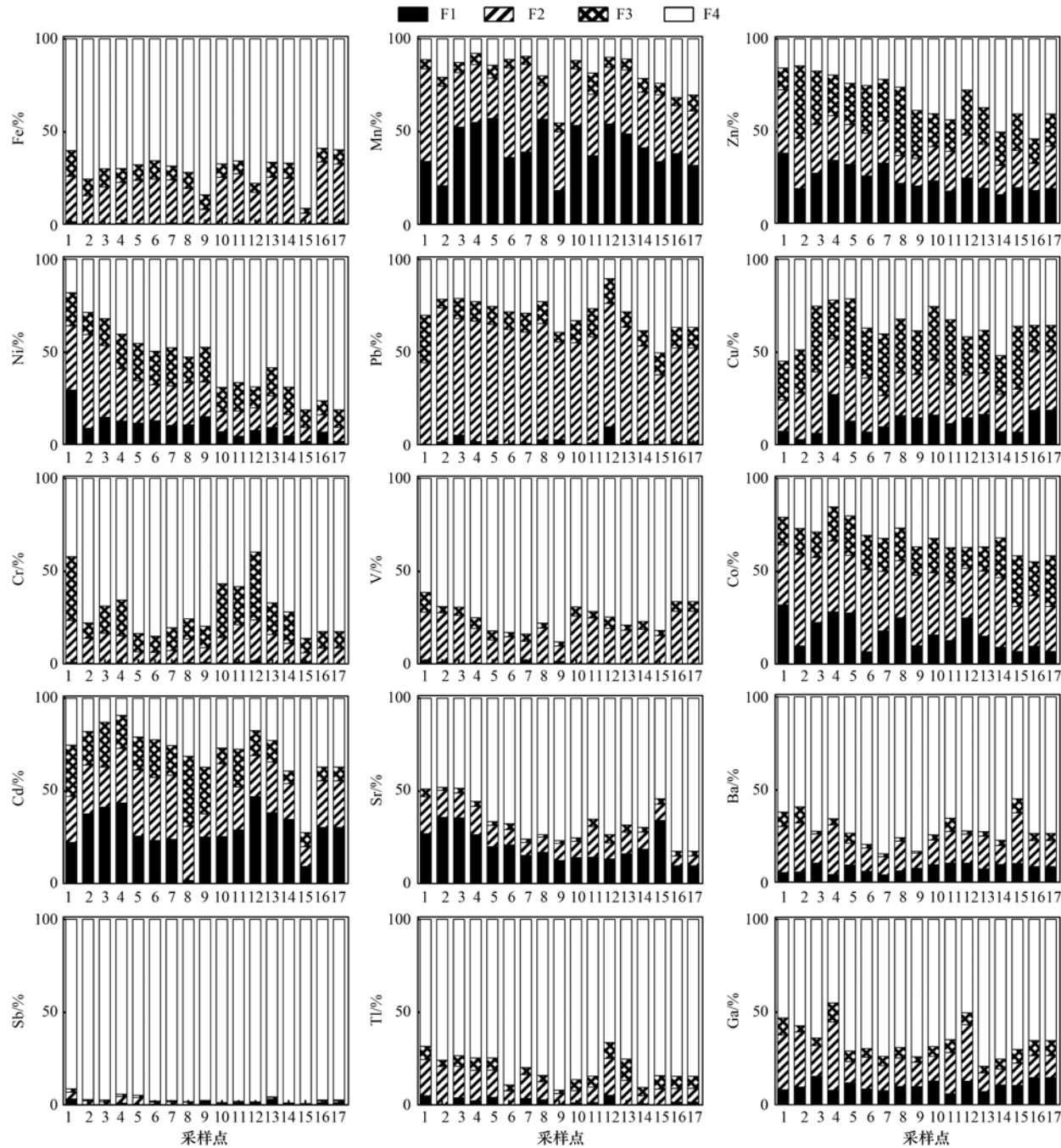


图3 九龙江表层沉积物重金属BCR形态分布

Fig. 3 BCR speciation of heavy metals in surface sediments from Jiulong River

表2 九龙江表层沉积物重金属稀硝酸可提取态含量统计/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Concentrations of the dilute HNO_3 -extractable fractions of heavy metals in the surface sediments from Jiulong River/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	Fe	Mn	Zn	Ni	Pb	Cu	Cr	V
最大值	15 083	4 162	543.2	23.08	666.3	130.7	16.01	16.17
最小值	1 435	241.4	16.02	0.477	18.56	9.43	1.62	4.03
平均值	8 097	1 246	119.0	6.92	135.8	33.98	6.82	9.01
CV	0.46	0.98	1.23	0.95	1.46	1.01	0.59	0.31
项目	Co	Cd	Sr	Ba	Sb	Tl	Ga	
最大值	15.46	6.92	48.10	166.8	0.243	0.482	15.59	
最小值	1.60	0.103	4.63	35.64	0.011	0.062	2.98	
平均值	6.38	0.937	18.83	79.12	0.043	0.214	7.02	
CV	0.62	1.85	0.60	0.41	1.36	0.59	0.51	

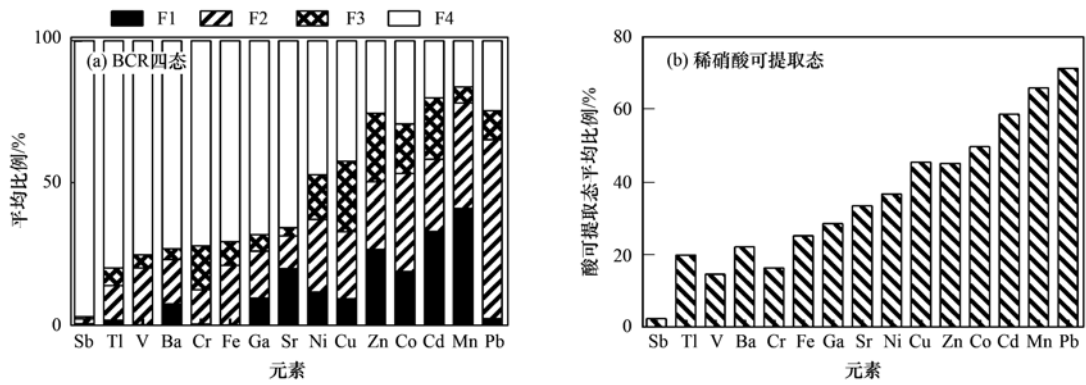


图4 九龙江表层沉积物重金属形态平均分布

Fig. 4 Chemical speciation of heavy metals in surface sediments from Jiulong River

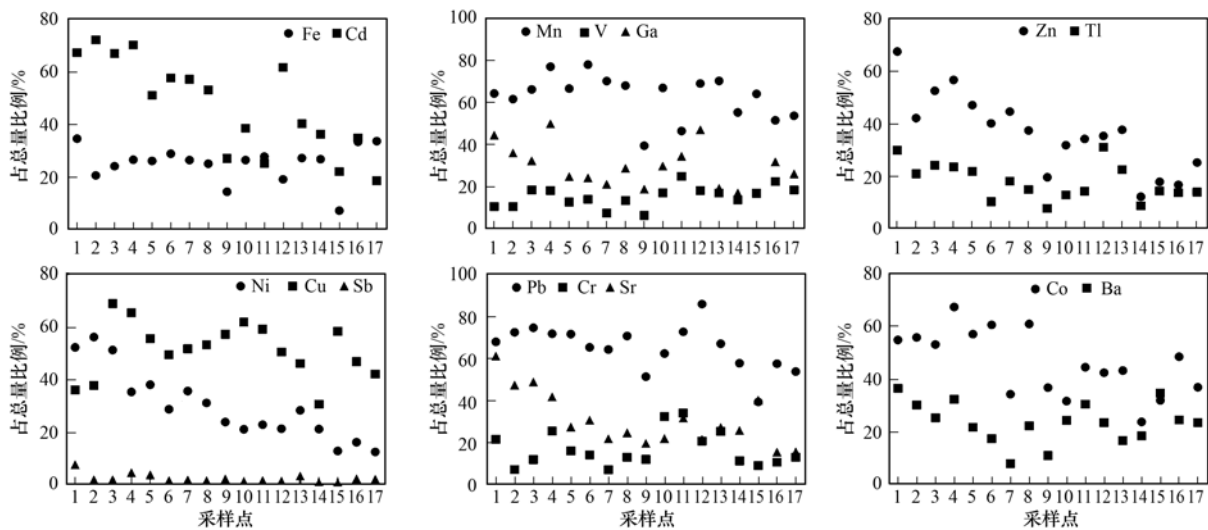


图5 九龙江表层沉积物重金属酸可提取态分布

Fig. 5 Acid-extractable speciation of heavy metals in surface sediments from Jiulong River

现为重度污染；Cd 平均 RSP 值为 3.4，35.3% 采样点表现为重度污染，29.4% 采样点为中度污染，23.5% 采样点为轻度污染；Pb 平均 RSP 值为 2.8，29.4% 采样点为重度污染，41.2% 采样点为中度污染，23.5% 采样点为轻度污染；Zn 平均 RSP 值为 2.7，35.3% 采样点为重度污染，41.2% 采样点为中度污染，23.5% 采样点为轻度污染；Co 平均 RSP 值为 2.4，17.6% 采样点为重度污染，41.2% 采样点为中度污染，41.2% 采样点为轻度污染；Cu 平均 RSP 值为 2.0，11.8% 采样点为重度污染，23.5% 采样点为中度污染，52.9% 采样点为轻度污染；Ni 平均 RSP 值为 1.1，17.6% 采样点为中度 ~ 重度污染，29.4% 采样点为轻度污染；Ga、Sr、Cr、Fe、Ba、V、Tl 和 Sb 平均 RSP 值均小于 1，各采样点基本为无污染。

以稀硝酸可提取态为次生相重金属含量，以残渣态（总量与稀硝酸可提取态之差）为原生相重金

属含量。结果可知，九龙江表层沉积物中 Pb 平均 RSP 值为 2.2，5.9% 采样点为重度污染，47.0% 采样点为中度污染，41.2% 采样点为轻度污染；Mn 平均 RSP 值为 1.9，11.8% 采样点为重度污染，35.3% 采样点为中度污染，41.2% 采样点为轻度污染；Cd 平均 RSP 值为 1.2，23.5% 采样点为中度污染，29.4% 采样点为轻度污染；Cu 平均 RSP 值为 1.1，5.9% 采样点为中度污染，52.9% 采样点为轻度污染；Co 平均 RSP 值为 1.0，5.9% 采样点为中度污染，35.3% 采样点为轻度污染；Zn 平均 RSP 值为 0.7，5.9% 采样点为中度污染，11.8% 采样点为轻度污染；Sr、Ni、Ga、Fe、Ba、Tl、Cr、V 和 Sb 平均 RSP 值均小于 1，在各采样点基本为无污染。

从两者评价结果中可以看出，不同重金属之间污染程度大小分布趋势基本一致，但后者评价的污染程度整体上比前者低，因为两种提取方式所提取和定义的生物有效态重金属含量存在差异。

对比稀硝酸单级提取的生物有效态含量和 BCR 连续提取的生物有效态含量,定义提取比如下:

$$\text{提取比} = \frac{\text{稀硝酸提取的生物有效态含量}}{\text{BCR 提取的生物有效态含量}} \times 100\%$$

提取比计算结果见图 7. 各重金属提取比存在差异,其中,Pb 提取比最高,平均达 91.9% (79.5% ~ 99.1%),Zn 提取比最低,平均 51.5% (24.6% ~

80.2%)。

综合以上分析可知,稀酸单级提取法操作简单,成本较低,常用于研究沉积物中重金属生物有效性,但未能充分描述沉积物中重金属形态分布. BCR 多级提取法能较好分析沉积物中重金属具体形态分布,但操作过程繁琐,提取实验周期较长. 一般情况下,稀硝酸单级提取法已足以分析重金属的生物有效性并进行生态风险评价。

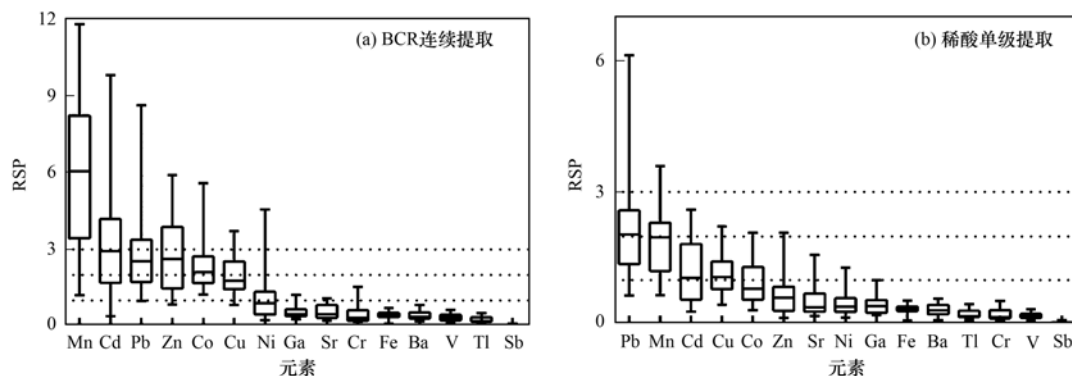


图 6 九龙江表层沉积物次生相与原生相分布比值(RSP)

Fig. 6 RSPs of heavy metals in surface sediments from Jiulong River

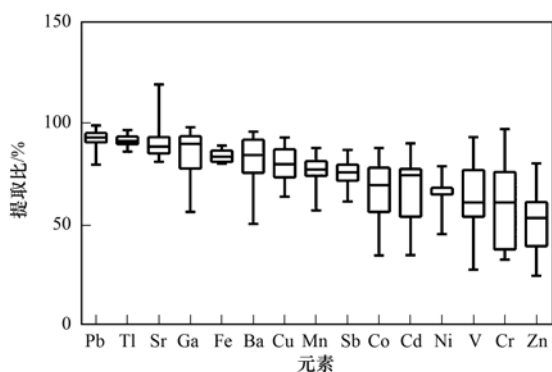


图 7 两种提取方式重金属生物有效态提取比

Fig. 7 Ratios of heavy metals bioavailability by two extraction methods

3 结论

(1)改进的 BCR 四步提取法结果表明,沉积物中各重金属赋存形态分布存在较大差异,其中,Fe、Ni、V、Tl、Ba、Sb、Ga、Cu、Cr 和 Sr 以 F4 态为主;Pb 以 F2 态为主;Mn 以 F1 态和 F2 态为主;Zn、Cd 和 Co 各形态所占比例较平均. Mn、Cd、Pb、Zn、Co 和 Cu 的生物有效态(前三态和)所占比例较高,占总量平均比例分别为 83.8%、80.0%、75.5%、74.3%、70.8%和 57.7%。

(2)稀硝酸单级提取法结果表明,Pb、Mn、Cd、Co、Cu 和 Zn 的稀硝酸可提取态占总量平均比例分别为 70.4%、65.4%、58.7%、48.4%、45.5%和

44.5%。

(3)利用次生相与原生相分布比值进行风险评价,Mn、Cd、Pb、Zn、Co 和 Cu 生态风险较高. 两种提取法的结果趋势较一致,但稀硝酸提取态含量明显低于 BCR 法前 3 态之和. 两种提取方法各有优缺点,一般情况下,稀硝酸单级提取法已足以分析重金属的生物有效性并进行生态风险评价。

参考文献:

- [1] 黄莹,李永霞,高甫威,等. 小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2046-2053.
Huang Y, Li Y X, Gao F W, *et al.* Speciation and risk assessment of heavy metals in surface sediments from the heavily polluted area of Xiaoqing River[J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 2046-2053.
- [2] 柏建坤,李潮流,康世昌,等. 雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3346-3351.
Bai J K, Li C L, Kang S C, *et al.* Chemical speciation and risk assessment of heavy metals in the middle part of Yarlung Zangbo surface sediments[J]. Environmental Science, 2014, **35**(9): 3346-3351.
- [3] Wang S F, Jia Y F, Wang S Y, *et al.* Fractionation of heavy metals in shallow marine sediments from Jinzhou Bay, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(1): 23-31.
- [4] Venkatramanan S, Ramkumar T, Anithamary I, *et al.* Speciation of selected heavy metals geochemistry in surface sediments from Tirumalairajan river estuary, east coast of India [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, **185**(8):

- 6563-6578.
- [5] Canuto F A B, Garcia C A B, Alves J P H, *et al.* Mobility and ecological risk assessment of trace metals in polluted estuarine sediments using a sequential extraction scheme [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(7): 6173-6185.
- [6] Delgado J, Barba-Brioso C, Nieto J M, *et al.* Speciation and ecological risk of toxic elements in estuarine sediments affected by multiple anthropogenic contributions (Guadiana saltmarshes, SW Iberian Peninsula): I. Surficial sediments [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(19): 3666-3679.
- [7] Ranjan R K, Singh G, Routh J, *et al.* Trace metal fractionation in the Pichavaram mangrove-estuarine sediments in southeast India after the tsunami of 2004 [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(10): 8197-8213.
- [8] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3562-3571.
Wang S H, Wang W W, Jiang X, *et al.* Heavy metal speciation and stability in the sediment of Lihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(9): 3562-3571.
- [9] 张晨晨, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 晋江感潮河段沉积物重金属的赋存形态与生物有效性[J]. *环境化学*, 2015, **34**(3): 505-513.
Zhang C C, Hu G R, Yu R L, *et al.* Speciation and bioavailability of heavy metals in sediments from tidal reach of the Jinjiang River [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(3): 505-513.
- [10] Chakraborty P, Babu P V R, Vudamala K, *et al.* Mercury speciation in coastal sediments from the central east coast of India by modified BCR method [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **81**(1): 282-288.
- [11] 孙瑞瑞, 陈华清, 李杜康. 基于土壤中铅化学形态的生态风险评价方法比较[J]. *安全与环境工程*, 2015, **22**(5): 47-51.
Sun R R, Chen H Q, Li D K. Comparison of ecological risk assessment methods based on the chemical forms of lead in soil [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2015, **22**(5): 47-51.
- [12] Guo P R, Duan T C, Song X J, *et al.* Evaluation of a sequential extraction for the speciation of thorium in soils from Baotou area, Inner Mongolia [J]. *Talanta*, 2007, **71**(2): 778-783.
- [13] Chen N W, Wu J Z, Zhou X P, *et al.* Riverine N₂O production, emissions and export from a region dominated by agriculture in Southeast Asia (Jiulong River) [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **208**: 37-47.
- [14] 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲. 福建九龙江下游潮间带沉积物铅污染及同位素示踪[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(8): 2503-2510.
Lin C Q, Hu G R, Yu R L. Lead pollution and isotopic tracing in intertidal sediments of Jiulong River downstream [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(8): 2503-2510.
- [15] 张莉, 祁士华, 瞿程凯, 等. 福建九龙江流域重金属分布来源及健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(8): 2133-2139.
Zhang L, Qi S H, Qu C K, *et al.* Distribution, source and health risk assessment of heavy metals in the water of Jiulong River, Fujian [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(8): 2133-2139.
- [16] 林彩, 林辉, 陈金民, 等. 九龙江河口沉积物重金属污染评价[J]. *海洋科学*, 2011, **35**(8): 11-17.
Lin C, Lin H, Chen J M, *et al.* Pollution assessment of heavy metals in the sediment of Jiu-long River Estuary [J]. *Marine Sciences*, 2011, **35**(8): 11-17.
- [17] 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 九龙江近岸表层沉积物重金属污染评价及来源解析[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(4): 1218-1225.
Lin C Q, Hu G R, Yu R L, *et al.* Pollution assessment and source analysis of heavy metals in offshore surface sediments from Jiulong River [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(4): 1218-1225.
- [18] 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 等. 太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4291-4299.
Qin Y W, Zhang L, Zheng B H, *et al.* Speciation and pollution characteristics of heavy metals in the sediment of Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4291-4299.
- [19] 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.
- [20] Gao X L, Zhou F X, Chen C T A. Pollution status of the Bohai Sea: an overview of the environmental quality assessment related trace metals [J]. *Environment International*, 2014, **62**: 12-30.
- [21] 刘峰, 胡继伟, 吴迪, 等. 基于形态学分析红枫湖沉积物中重金属的分布特征及污染评价[J]. *环境化学*, 2011, **30**(2): 440-446.
Liu F, Hu J W, Wu D, *et al.* Speciation characteristics and risk assessment of heavy metals in sediments from Hongfeng Lake, Guizhou Province [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, **30**(2): 440-446.
- [22] Chen S Y, Lin J G. Bioleaching of heavy metals from sediment: significance of pH [J]. *Chemosphere*, 2001, **44**(5): 1093-1102.
- [23] 邱敏娴, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 泉州湾洛阳江河口潮滩表层沉积物中重金属赋存形态分析[J]. *环境化学*, 2013, **32**(2): 212-218.
Qiu M X, Hu G R, Yu R L, *et al.* Speciation of heavy metals in the tidal-flat surface sediment from Luoyang River estuary of Quanzhou Bay [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(2): 212-218.
- [24] Li X D, Shen Z G, Wai O W H, *et al.* Chemical forms of Pb, Zn and Cu in the sediment profiles of the Pearl River Estuary [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, **42**(3): 215-223.
- [25] 周怀东, 袁浩, 王雨春, 等. 长江水系沉积物中重金属的赋存形态[J]. *环境化学*, 2008, **27**(4): 515-519.
Zhou H D, Yuan H, Wang Y C, *et al.* The chemical speciation of heavy metals in sediments from Yangtze Basin [J]. *Environmental Chemistry*, 2008, **27**(4): 515-519.
- [26] Teasdale P R, Apte S C, Ford P W, *et al.* Geochemical cycling and speciation of copper in waters and sediments of Macquarie Harbour, Western Tasmania [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, **57**(3): 475-487.

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) ₃ 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)