

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE



第33卷 第7期

Vol.33 No.7

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目 次

- 三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究 吴起鑫, 韩贵琳(2145)
成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建 岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊(2151)
太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析 耿加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳(2158)
环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征 徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏(2165)
南京冬季市区和郊区气溶胶中PAHs浓度的昼夜特征及粒径分布 张红亮, 樊曙光, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝(2172)
青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究:季节分布特征 刘臻, 郝建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺(2180)
城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性 邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君(2191)
基于WEPS模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算 陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌(2197)
浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究 高嵩, 石晓勇, 王婷(2204)
福建沿海近10a赤潮基本特征分析 李雪丁(2210)
HSPF水文水质模型应用研究综述 李兆富, 刘红玉, 李燕(2217)
城市降雨径流模拟的参数不确定性分析 黄金良, 林杰, 杜鹏飞(2224)
利用CDOM吸收系数估算太湖水体表层DOC浓度 姜广甲, 马荣华, 段洪涛(2235)
嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定 谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园(2244)
重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价 张千千, 王效科, 郝丽玲, 速非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨(2251)
南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究 郝敬峰, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红(2259)
宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究 邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪(2265)
影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析 丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟(2272)
大型底栖动物生物评价指数比较与应用 耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德(2281)
青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征 王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郑伟(2288)
青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征 郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康(2295)
用物理-生态集成技术局部控制富营养化 李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆(2303)
太湖氮素出入湖通量与自净能力研究 陈小锋, 端小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕(2309)
富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应 袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波(2315)
巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究 温胜芳, 单保庆, 张洪(2322)
南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究 方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏(2330)
东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究 林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干(2335)
嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征 蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜娟(2341)
电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源 王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家漠(2347)
基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究 李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕(2352)
渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响 秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟(2359)
崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价 李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文(2368)
白洋淀底泥重金属形态及竖向分布 李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民(2376)
西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究 刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏(2384)
氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制 刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博(2394)
Cu(II)印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性 张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨(2403)
声电氧化处理扑热息痛的研究 戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟(2410)
粉煤灰吸附-Fenton及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究 白玉洁, 张爱丽, 周集体(2419)
利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究 张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴(2427)
Zn/Cr型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙X-GN的去除性能研究 王小蓉, 吴平霄(2432)
核电站低放射性废水在封闭水体中的传输规律研究 武国正, 徐宗学(2438)
A+OSA污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究 翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松(2444)
系列混合碳源在EBPR系统颗粒化进程中的影响研究 蒋涛, 孙培德, 徐少娟(2451)
氧化还原介体催化强化 *Paracoccus versutus* 菌株GW1反硝化特性研究 李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博(2458)
1株转座子插入突变菌株TB34的筛选及产氢分析 刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲(2464)
蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化 秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康(2470)
双季稻田CH₄和N₂O排放特征及品种筛选研究 傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄璜(2475)
闽江河口短叶茳芏湿地CH₄和N₂O排放对氮输入的短期响应 卞晓杰, 刘兴土, 全川, 孙志高(2482)
青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征 彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波(2490)
不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律 吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江(2497)
土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响 吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海斐(2503)
多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应 潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静(2510)
不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究 梁宵, 占新华, 周立祥(2516)
废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究 伊元荣, 韩敏芳(2522)
中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析 卢愿清, 史军(2528)
《环境科学》征稿简则(2431) 《环境科学》征订启事(2532) 信息(2157, 2271, 2367, 2418)

西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究

刘晓冰^{1,3},温琰茂^{1*},利锋²,吴昌华²,段志鹏²

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 2. 华南理工大学土木与交通学院, 广州 510631; 3. 广东环境保护工程职业学院, 佛山 528216)

摘要:为了找出影响河道沉积物酸挥发硫化物(AVS)空间分布的主导因素,在珠江三角洲典型感潮河道佛山西南涌的10个站位中采集了沉积物及上覆水样品,测定了其理化性状及微生物指标,重点探讨了氧化还原电位(Eh)、硫酸盐还原菌(SRB)、有机碳(OC)、总硫化物(TS)对AVS空间分布的影响,并评价了该区域重金属生物毒性。结果表明:所测样品AVS范围0.207~41.453 μmol·g⁻¹,均值6.684 μmol·g⁻¹,与其他研究结果相比较高;就AVS值而言,50%的站位沉积物表层>下层,表层沉积物变异系数为93.61%,下层达153.09%,均属高度变异;各因素对AVS空间分布影响排序为:TS>OC>Eh>SRB;以 $\sum(\text{SEM}_s - \text{AVS})$ 值判断,60%的采样站位具潜在生态风险;采用 $[\sum(\text{SEM}_s - \text{AVS})]/f_{oc}$ 判据,则全部站位均不具有不可接受的潜在生态风险。从单种重金属来看,Cd、Ni、Cu、Zn、Pb均有产生毒性效应的风险。研究结果为深入探讨AVS的形成机制提供了资料,为河流重金属污染生态风险评价及污染治理提供了参考。

关键词:酸挥发硫化物;同步提取金属;空间分布;影响因素;生物毒性

中图分类号:X131.2; X523 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2012)07-2384-10

AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors

LIU Xiao-bing^{1,3}, WEN Yan-mao¹, LI Feng², WU Chang-hua², DUAN Zhi-peng²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510631, China; 3. Guangdong Vocational College of Environmental Protection Engineering, Foshan 528216, China)

Abstract: Sediment and overlying water samples were collected at 10 sampling stations at Xinan Creek, a tidal river in Pearl River Delta, and analyzed for physical and chemical characteristics as well as microbial indicators, in order to reveal the main factors dominating the spatial distribution of acid volatile sulfide(AVS). The effects of Eh, SRB OC and TS on the spatial distribution of AVS were investigated and the impact of AVS on the toxicity of heavy metals in the studied area was evaluated. The results showed that the range of AVS was 0.207-41.453 μmol·g⁻¹, with an average of 6.684 μmol·g⁻¹, which is relatively high compared to the results in other studies. The AVS value of the surface layer was higher than the bottom layer in 5 stations. The AVS values in both the surface layer and the bottom layer were highly variable, the coefficients of variation being 93.61% and 153.09%, respectively. The analytical results revealed that TS was the factor with the greatest impact on the spatial distribution of AVS, and the order was TS > OC > Eh > SRB. Potential ecological risk of heavy metals existed in 60% of the sampling stations based on the value of $\sum(\text{SEM}_s - \text{AVS})$, however, with the criterion of $[\sum(\text{SEM}_s - \text{AVS})]/f_{oc}$, none of them had unacceptable ecological risk. Furthermore, in terms of single species of heavy metals, there was certain risk of toxic effect for all the five heavy metals (Cd, Ni, Cu, Zn and Pb). The above mentioned results will provide valuable data for the in-depth study of the formation mechanism of AVS and helpful reference for environmental impact assessment and scientific rehabilitation of heavy metals in polluted rivers.

Key words: acid volatile sulfide(AVS); simultaneously extracted metals(SEM); spatial distribution; influencing factors; biotoxicity

重金属污染比较特殊,其来源广泛,在环境中不降解,对生物体具有急性毒性,且易在生物体内累积(慢性毒性),故被认为是环境中最主要的污染物之一;但部分重金属又是生物体必需的微量元素,因此,如何评价其生态风险是环境学界经久不衰的话题^[1]。Di Toro等^[2]首次报道水体沉积物中AVS对Cd的生物有效性的强烈影响之后,沉积物AVS已成为水体重金属生态危害研究热点。AVS被定义为能被1 mol·L⁻¹冷盐酸提取的硫化物;SEM是指在用盐酸提取AVS过程中同步提取的金属,AVS/SEM

方法被很多学者认为是可用于重金属生态毒性水平评价的方法^[3,4],美国环境保护署也认同该方法^[5]。很多现场调查及实验室模拟实验都证实了上述理论的正确性^[6~8],以至于不少研究者认为AVS是衡量厌氧沉积物生物毒性的最具代表性的指标^[9,10]。

收稿日期:2011-09-29; 修订日期:2011-12-30

基金项目:国家自然科学基金项目(41001341);广东省自然科学基金项目(9151401501000015)

作者简介:刘晓冰(1968~),男,博士研究生,高级讲师,主要研究方向为水体重金属污染生态风险评价及生态修复,E-mail:lglxhlc@163.com

* 通讯联系人,E-mail:13430254993@139.com

但也有学者有异议^[11,12], 主要问题是: 实际测得的 AVS 表现出强烈的区域性及空间变异性, 各地测出来的数据相差较大, 并且即使在同一研究区域, 测得的数值也可能相差较大, 好像无规律可循^[11,12]. 加之 AVS 是一个“操作性”的定义(即按照其提取程序来确定的定义), 使一些研究者对于 AVS 这一“被定义”的指标之理论意义及实际作用产生了怀疑^[13,14]. 从其内涵来看, AVS 确是一个易变的指标: AVS 含量是厌氧条件下生成及其氧化条件下消除(或由于扩散而消除)等作用的综合体现. 很多因素都可以影响上述过程, 从而影响 AVS 值: 沉积物理化性质(氧化还原状态、有机质、粒径组成、硫酸盐含量以及沉积硫化物含量等), 上覆水指标(溶解氧、pH、COD、透明度等)、生物因素(硫酸盐还原菌等菌群、底栖动物的扰动、水生植物), 水文条件(水深、流速、水温等)等^[15,16]. 而目前尚难于对这些影响因素进行量化, 这方面的专门研究也很少, 以至于对 AVS 空间分布几乎无法给出合理的解释, 使得 AVS 对重金属生物毒性的论断合理性大打折扣.

本研究在珠江三角洲感潮河道佛山东南涌中, 采集了 10 个站位的沉积物及上覆水样品, 测定了 AVS、SEM、硫酸盐还原菌(sulphate reducing bacteria, SRB)、氧化还原电位(Eh)、总硫化物(total sulfide, TS)、有机碳(organic carbon, OC)等指标, 探讨了 AVS 的空间分布及影响因素, 并将影响因素定量化; 此外, 还评价了该河段 AVS 对重金属生物毒性的影响. 旨在深入探讨 AVS 的形成机制, 为污染河流重金属污染生态风险评价及治理工程提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域

西南涌属珠江广州段上游, 起于北江西南水闸, 流经佛山南海区官窑镇(在此与芦苞涌汇合), 再经南海区里水、和顺等镇, 在广州白云区鸦岗附近与流溪河汇合后注入珠江广州段, 全长 41.6 km, 其水质对珠江广州段影响甚大. 近年来, 随着流域经济社会的发展, 西南涌逐渐成为沿岸地区工业、生活和农业废水的纳污涌, 污染较为严重, 引起了各方关注^[17]. 西南涌具有分洪功能: 北江是珠江水系三大河流之一, 水量很大, 洪水期由西南涌及芦苞涌进行分流, 以保护北江大堤(护卫广州及佛山城区). 由此带来的环境问题是: 分洪时沉积在西南涌底泥中的污染

物会冲刷至珠江广州段, 对广州市区生态环境带来威胁. 此外, 西南涌还具有灌溉、航运、景观等功能, 其对于广佛(广州-佛山)经济圈乃至珠江三角洲的重要性不言而喻.

本次挑选西南涌最具代表性的河段(该河段习惯上称为西南涌凤岗段)进行研究, 该河段位于西南涌中上游地带, 有三条支涌(大棉涌、大朗涡涌、凤岗涌)在此汇入西南涌, 由于这三条河涌纳污区域污水处理设施不完善, 很多污水直排河流, 给西南涌带来了大量污染物, 对其环境质量造成严重威胁, 其影响波及下游广州市区河段.

1.2 样品采集

在综合考虑前期环境监测数据、污染源位置及排污情况、支涌及窦闸位置、水文及水动力条件等方面的资料后, 确定了 10 个采样站位(见图 1). 采样时间为 2011 年 1 月. 在每个采样站位先用底层水采集器采集底层水样(上覆水). 然后用柱状采样器(荷兰 Eijkelkamp Beeker 沉积物原状采样器 04.23.SB 型, 直径 57 mm)采集沉积物样品. 每个采样站位平行采集三根柱状样(在约 1 m² 范围内), 根据所采沉积物表观特征及其自然分界面, 在现场按上层和下层分割(B 站位及 D 站位具有明显的分界面, 故分为上中下三层), 分割后样品迅速封存于双层洗净聚乙烯袋中, 置于冰水混合物中保存. 现场测定水深水温等指标, 并记录采样站位附近环境状况.

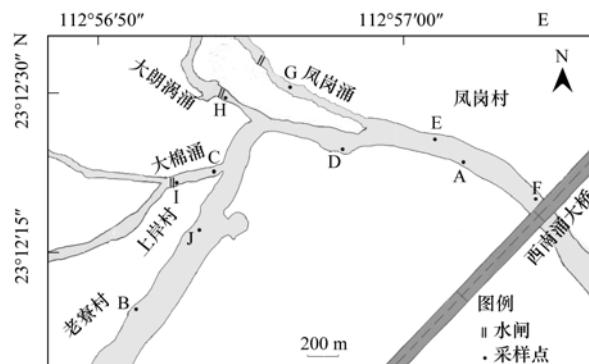


图 1 采样站位位置示意

Fig. 1 Locations of the Sampling Stations

1.3 样品分析及处理

现场测定的水指标包括溶解氧(DO)、水深、水温、pH、透明度: DO 测定采用便携式溶氧仪(YSI550A-12); 水温由水银温度计测定. 透明度测量采用塞氏盘法^[18]; pH 采用便携式 pH 计. 所采水样在实验室用重铬酸钾法(GB 11914-89)测 COD.

SRB 测定采用 MPN 法:称取湿沉积物样 10 g,加入 90 mL 灭菌水,振荡 20 min,后静置 30 min.用无菌注射器抽取 1 mL 水样置于 9 mL 培养瓶中进行接种,采用梯度稀释法逐级稀释至 10^6 倍,置于恒温培养箱中(设定为 30℃)培养 21 d;计数(生成黑色沉淀的培养瓶,即表明有硫酸盐还原菌生长),查表(MPN 指数和 95% 置信度检索表),结果表示为 $\text{CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[19].

AVS 和 SEM 测定采用氮载气冷酸溶硫化物法(the purge-and-trap method)^[20]. 测定过程如下:通氮气完全驱除装置中的氧气,称取 2~5 g 湿沉积物投入内盛 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸溶液的反应瓶,经磁力搅拌,生成的 H_2S 随高纯氮载气转移到内含 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氢氧化钠溶液的吸收瓶中,之后用亚甲蓝法测 AVS. 反应瓶内溶液经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤,用等离子发射光谱 ICP (PerkinElmer, Optima5300, DV) 测定滤液中 SEM.

采用便携式氧化还原电位计现场测量沉积物 Eh. OC 测定采用灼烧法:样品置马弗炉中(550°C , 3.5 h),以灼烧前后重量差为烧失量(LOI), LOI 乘以 0.58 即得到 OC^[8,21]. 风干沉积物样品经研磨后过 100 目尼龙筛,以 $\text{HNO}_3\text{-HCl-H}_2\text{O}_2$ 法消解后 (USEPA Method 3050B) 用 ICP 测定 TS 含量^[8,13].

1.4 质量控制及数据处理

质量控制:所有玻璃和塑料用具均用 10% HNO_3 (体积比)浸泡 24 h 以上,以纯水冲洗后,用高纯水淋洗. 分析过程中采用国家标准物质进行分析

质量控制. 每批样品均设平行样及空白样,进行对照.

数据处理及绘图采用 SPSS 17.0 及 Excel 2007. 进行相关分析的数据处理步骤如下:先用 SPSS 非参数分析中的 K-S 法进行正态分布检验,对于满足正态分布的变量,采用 Pearson 相关分析法,对于不满足正态分布的变量,则采用 Spearman 相关分析法.

2 结果

2.1 环境状况

表 1 为各采样站位相关理化指标监测结果. 由表 1,从 COD 及 DO、pH 这些指标来看,除了 G 站位(凤岗涌)及 E 站位(凤岗村)外,其余均为 V 类水或 IV 类水. 总的来说,上游水质好于下游,主河道水质好于支涌. 该河段为西南涌水质分界面:上游为经西南水闸而来的北江水,水质较好,在此河段开始受到支涌排污的影响,水质逐渐恶化. 该河段处于一个城镇化进程正在加快的区域,众多小工厂难于监控,周围村庄的生活污水及农业废水未经收集处理. 三条支涌中,大棉涌纳污范围最大,污水量也最大,其污水混合了生活污水及工农业废水; 大朗涡涌生活污水居多,夹杂部分工厂排污; 受上游某大型印染厂的影响,凤岗涌的水质最差,从现场来看河水发黑发臭,鱼虾绝迹,其影响范围除了位于凤岗涌的 G 站位外,还直接波及下游 E 站位及 F 站位,黑色的河水在凤岗涌口占据了主河道的一半,并一直延伸至西南涌大桥底.

表 1 各采样站位环境状况¹⁾

Table 1 Environmental conditions of the sampling stations

编号	站位名称	水深 /cm	透明度 /cm	水温 /°C	溶解氧 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	pH	COD / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
A	西牛头	87	62	12.2	3.7	6.9	22.6
B	老寮	28	28	12.9	5.3	7.2	20.3
C	大棉涌口	51	44	12.7	3.2	7.0	21.7
D	岸滩湿地	20	20	13.1	4.3	6.6	29.1
E	凤岗村	31	31	12.1	2.7	6.8	51.2
F	西南涌大桥底	54	42	11.9	2.5	7.1	31.2
G	凤岗涌	61	36	11.7	0	5.8	80.3
H	大朗涡涌	24	24	12.7	2.3	6.7	39.7
I	大棉涌水闸	57	31	13.1	2.9	7.2	25.6
J	上岸村	48	46	12.7	4.3	7.0	32.3

1) 因采样器出现问题,J 站位只采集了 2 个样品,除了 J 站位样品数为 2 个外(表中所列 J 站位为 2 个数值的算术平均值),其余站位样本数均为 3 个(表中所列数值为 3 个数值的算术平均值)

2.2 沉积物 AVS 及 SEM 含量

因为大多数底栖动物在表层 30 cm 以内活动,故表层沉积物 AVS 对生态环境的影响远高于下

层^[8]. 故本研究主要讨论对象是表层沉积物,但为了完整地揭示 AVS 的空间分布,也对中下层沉积物 AVS 进行了研究.

表2为各采样站位表层AVS与SEM监测结果(除了J站位是2个样品外,其余均为3个样品,共29个样品,数据经检验均服从正态分布).统计结果显示,表层沉积物AVS范围是 $0.734 \sim 30.519 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,均值为 $6.987 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,均方差为 $6.541 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,变异系数为93.62%.表3为各采样站位中下层AVS与SEM监测结果(共31个样品,数据经检验均服从正态分布).统计结果表明,中下层沉积物AVS范围是 $0.207 \sim 41.453 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,均值为6.433

$\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,均方差为 $9.848 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,变异系数为153.09%.上层沉积物AVS均值大于中下层,但中下层沉积物的变化范围大于上层,AVS最大值及最小值均出现在沉积物下层,下层变异系数远高于上层.

2.3 沉积物SRB、OC、TS含量及Eh

表4为表层沉积物Eh值及SRB、OC、TS含量,样品数均为29个,数据经检验均服从正态分布,除了J站位数值为2个样品的平均值以外,其余均表示成“均值±均方差”的形式.

表2 表层沉积物AVS及SEM含量/ $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 2 Concentrations of AVS and SEM in the surface layer/ $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$

编号	AVS	SEM _{Cu}	SEM _{Pb}	SEM _{Zn}	SEM _{Ni}	SEM _{Cd}
A 上	7.188 ± 5.770	0.475 ± 0.346	0.092 ± 0.023	9.141 ± 12.976	0.357 ± 0.281	0.005 ± 0.003
B 上	10.835 ± 1.720	0.697 ± 0.127	0.216 ± 0.021	1.235 ± 0.259	0.306 ± 0.121	0.005 ± 0.001
C 上	6.518 ± 5.705	1.062 ± 1.336	0.319 ± 0.253	5.435 ± 5.004	0.970 ± 1.074	0.064 ± 0.066
D 上	6.320 ± 2.919	1.493 ± 1.749	0.222 ± 0.207	4.349 ± 3.926	0.538 ± 0.500	0.028 ± 0.028
E 上	3.847 ± 1.106	0.401 ± 0.306	0.217 ± 0.011	1.429 ± 0.858	0.118 ± 0.119	0.005 ± 0.002
F 上	1.457 ± 0.623	0.310 ± 0.306	0.104 ± 0.042	0.882 ± 0.747	0.103 ± 0.110	0.006 ± 0.007
G 上	1.380 ± 0.621	0.964 ± 0.697	0.323 ± 0.167	3.504 ± 3.089	0.323 ± 0.281	0.025 ± 0.025
H 上	11.643 ± 5.351	1.160 ± 0.676	0.201 ± 0.024	9.621 ± 6.542	0.661 ± 0.426	0.021 ± 0.012
I 上	3.438 ± 2.316	0.358 ± 0.274	0.111 ± 0.050	0.912 ± 0.551	0.140 ± 0.102	0.010 ± 0.010
J 上	22.377	6.502	0.629	14.099	1.854	0.126

表3 中下层沉积物AVS及SEM含量/ $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 3 Concentrations of AVS and SEM in the middle and bottom layer/ $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$

编号	AVS	SEM _{Cu}	SEM _{Pb}	SEM _{Zn}	SEM _{Ni}	SEM _{Cd}
A 下	1.625 ± 1.302	0.335 ± 0.155	0.228 ± 0.088	2.138 ± 2.079	0.144 ± 0.171	0.007 ± 0.004
B 中	4.924 ± 4.490	0.462 ± 0.013	0.162 ± 0.006	1.341 ± 0.713	0.115 ± 0.016	0.007 ± 0.005
B 下	3.703 ± 2.703	0.546 ± 0.223	0.232 ± 0.051	1.457 ± 1.149	0.274 ± 0.308	0.006 ± 0.003
C 下	0.931 ± 0.773	0.173 ± 0.036	0.102 ± 0.034	0.410 ± 0.031	0.238 ± 0.144	0.003 ± 0.001
D 中	5.484 ± 3.877	0.517 ± 0.237	0.117 ± 0.016	1.675 ± 0.946	0.475 ± 0.247	0.013 ± 0.008
D 下	3.544 ± 5.355	1.617 ± 2.398	0.190 ± 0.088	2.972 ± 4.072	0.660 ± 0.784	0.019 ± 0.026
E 下	0.538 ± 0.078	0.534 ± 0.270	0.215 ± 0.035	1.211 ± 0.447	0.299 ± 0.216	0.005 ± 0.003
F 下	1.862 ± 2.547	1.067 ± 0.908	0.296 ± 0.136	4.972 ± 3.958	1.990 ± 1.732	0.075 ± 0.097
G 下	3.654 ± 5.024	0.617 ± 0.485	0.308 ± 0.166	2.437 ± 2.267	0.436 ± 0.360	0.021 ± 0.026
H 下	18.917 ± 6.930	1.350 ± 0.130	0.217 ± 0.051	7.457 ± 3.983	0.732 ± 0.190	0.021 ± 0.011
I 下	4.719 ± 7.771	0.228 ± 0.126	0.128 ± 0.094	0.574 ± 0.296	0.385 ± 0.488	0.003 ± 0.002
J 下	37.730	5.289	0.62	11.52	2.864	0.118

表4 表层沉积物SRB、OC、TS含量及Eh

Table 4 Concentrations of SRB, OC, TS and Eh in the surface layer

编号	SRB/ $\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$	OC/%	TS/ $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$	Eh/mV
A 上	7.175 ± 1.091	3.62 ± 0.89	27.292 ± 3.373	-62 ± 50
B 上	23.989 ± 6.196	5.32 ± 0.68	20.818 ± 3.615	-96 ± 50
C 上	1.147 ± 506	4.16 ± 1.26	20.847 ± 1.023	-83 ± 22
D 上	409 ± 32	4.13 ± 2.97	18.507 ± 3.013	-111 ± 25
E 上	1.256 ± 559	6.18 ± 0.87	16.446 ± 7.178	-96 ± 32
F 上	211 ± 78	4.55 ± 0.57	11.562 ± 0.847	-113 ± 24
G 上	897 ± 296	6.03 ± 1.99	13.019 ± 3.352	-110 ± 38
H 上	2.979 ± 471	5.27 ± 0.27	30.596 ± 2.275	-109 ± 20
I 上	4.422 ± 938	4.60 ± 1.81	14.593 ± 0.621	-100 ± 3
J 上	1.397	7.51	28.631	-148

3 讨论

3.1 西南涌 AVS 空间分布

表层沉积物 AVS 最低的站位为位于凤岗涌的 G 站位(以各站位 AVS 均值作为比较对象),其值为 $1.380 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,最高值出现在位于主河道上岸村河段的 J 站位,其值为 $22.377 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,后者是前者的 16.2 倍.这与先前预期的结果相反,因为根据以往的经验^[22]及相关理论,G 站位水质很差(溶解氧为 0,上覆水处于厌氧状态),而 J 站位水质好(溶解氧达到 $4.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),G 站位 AVS 应该远高于 J 站位.此外,各站位之间差异也很大,表层沉积物 AVS 变异系

数为 93.61%,下层则高达 153.09%,均属高度变异,表面看来毫无规律,3.2 节将对这一现象进行探讨并给出解释.

表 5 罗列了各地测得的 AVS 数值.由表 5 可见西南涌 AVS 含量与荷兰 Waal 河相当^[24],高于美国 Mississippi 河^[23]、葡萄牙 Douro 河口^[25]及芬兰的 5 条河流^[10],但低于佛山水道^[22].由表 5 也可看出各地测得的 AVS 值在 $0 \sim 70 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,均值大部分在 $0 \sim 10 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间.Rickard 等^[14]认为,AVS 组成复杂,影响因素太多,在自然水体中变化范围很大,基本不具规律性.但上述结果表明,从总体上说,AVS 的变化程度尚在一定范围内,并非如其在文献[14]所述那样.

表 5 各地河流沉积物 AVS 含量比较¹⁾ / $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 5 Comparison of the AVS concentration in Xinan Creek with those in other rivers/ $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$

研究地点	AVS 高值	AVS 低值	均值	文献
美国,密西西比河	1.2 ± 0.4	0.002 ± 0.001	—	[23]
珠江三角洲,佛山水道	69.579	0.339	20.283	[22]
荷兰,瓦尔河	40.35	0.44	6.66	[24]
欧洲,芬兰的五条河流	—	—	1.422	[10]
葡萄牙,杜罗河口	2.8 ± 1.3	0.004 ± 0.003	—	[25]
珠江三角洲,西南涌	41.453	0.207	6.684	本研究

1) 统计范围为本次所测上中下层共 64 个样品

Van Griethuysen 等^[16] 和 Van den Berg 等^[26] 的研究表明,AVS 含量通常在沉积物表层($0 \sim 2 \text{ cm}$)较低,在表层以下一定深度内逐渐升高,在较深层次($8 \sim 20 \text{ cm}$)达到最大值,即沉积物 AVS 在垂直方向上的变化表现为较深层 > 亚表层(或中层) > 表层.其原因在于表层($0 \sim 2 \text{ cm}$)沉积物处属于沉积物-上覆水界面,受上覆水 DO 的影响,Eh 相对较高,硫酸盐还原作用较弱,使得 AVS 易氧化而消耗,从而使其 AVS 含量较低^[16, 26].在实际中,因为取样困难等原因,深层沉积物 AVS 的数据较少,很难进行验证.图 2 显示本次上中下层沉积物 AVS 数据,由图 2 可见,50% 的站位沉积物 AVS 表层 > 下层,B 站位及 D 站位中层 > 下层,呈现出表层 > 中层 > 下层的情况,与文献[16]及文献[26]所述有差别.

3.2 AVS 影响因素

目前的理论认为:在缺氧及硝酸盐、铁锰氧化物等其它氧化剂条件下,沉积物 S^{2-} (AVS 的主要组分)的形成通常是通过沉积有机物还原 SO_4^{2-} 而实现的,这个过程需要硫酸盐还原菌参与.其反应式^[2]如下:



据式(1),选择 Eh、有机碳 OC(代表式中的 CH_2O)、

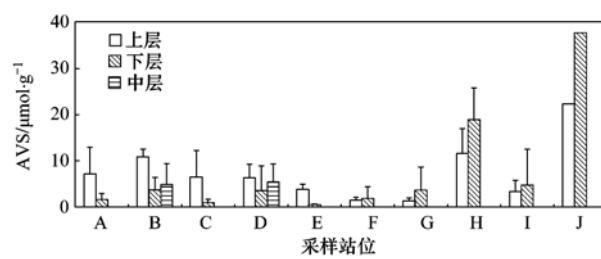


图 2 佛山西南涌沉积物 AVS 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of AVS in Xinan Creek, Foshan

SRB、TS(代替式中的 SO_4^{2-}) 作为主要因素进行探讨.

3.2.1 氧化还原电位 Eh

AVS 通常只存在于厌氧沉积物中,是还原条件下的产物,因此氧化还原电位是影响其含量的关键因素^[9, 16].贾振邦等^[27]的模拟实验表明:在厌氧沉积物转化为好氧沉积物的过程中,随着 Eh 值迅速升高,AVS 含量快速下降. Mackey 等^[9]对红树林沉积物 AVS 的研究结果表明:AVS 与水分含量及氧化还原电位显著相关,高含水量、低氧化还原电位的沉积物 AVS 较高.

从表 1 可见,除了位于凤岗涌的 G 点外,其余 9 个站位上覆水含氧量均达到一定水平($2.3 \sim 5.3$

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间),但表4显示表层沉积物均处于厌氧及强还原条件下。出现这种现象的主要原因在于有机质含量高,在沉积物-上覆水界面的溶解氧很快就消耗完了。例如位于上岸村的J站位,水中溶解氧为 $4.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (10个站位中最高),但沉积物有机质含量高达7%(10个站位中最高),测得的Eh最低为 -148 mV (10个站位中最低)。相关分析结果支持了这一论断:有机质含量与Eh显著相关($r = -0.384, P < 0.05$)。

图3显示了AVS与Eh之间的关系,从图中可以看到AVS与Eh呈反向关系。相关分析结果表明二者之间的反向关系未达显著程度($r = -0.202, P = 0.294$)。故虽然AVS是厌氧条件下及强还原条件下的产物,但强还原条件(低Eh值)未必会造成高AVS含量,其只是必要非充分条件。例如,Eh值次低(-113 mV)的F站位(西南涌大桥下),AVS也很低(均值 $1.457 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,仅高于G站位)。

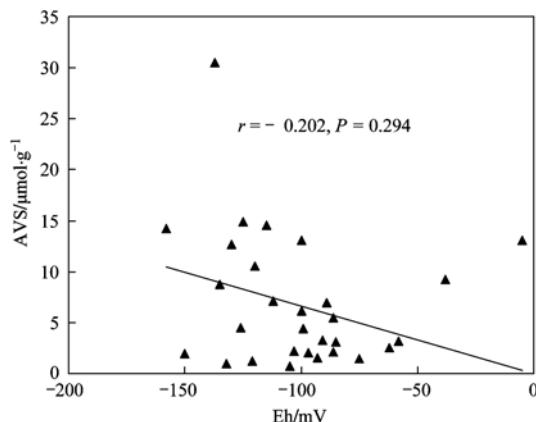


图3 AVS与Eh的关系

Fig. 3 Relationship between AVS and Eh

3.2.2 有机碳

统计结果表明西南涌表层沉积物有机碳的范围为2.08%~8.32%,均值为5.05%。达到了“沉积有机碳含量分级标准”^[28,29]中的超高标准(5%)的样品占了44.83%。沉积有机碳的来源分内源和外源输入两种,内源输入主要是湿地高等植物的根茎叶、浮游植物、底栖生物的初级和次级生产输入,外源输入主要指通过外界水源的补给过程,不仅包括潮汐和河流,还包括生活污水及工农业废水,以及降雨径流携带进来的颗粒态和溶解态的有机物(面源)。研究河段有机质的异常高值主要原因在于该河段受纳了大量的生活污水及工农业废水。例如有机碳含量最高的J站位(均值为7.51%),位于上岸村河段,因为该村大量生活污水直排入河道,经年累月形成

了高有机碳层。次高的是E站位(位于凤岗村河段均值为6.18%)及G站位(位于凤岗涌中段,均值为6.03%),这二站位均受到凤岗村排放的生活污水及凤岗涌上游印染废水严重影响。

由式(1),占AVS主要部分的 S^{2-} 的形成通常是通过有机碳还原 SO_4^{2-} 而实现的,据此,有机碳是影响AVS的重要因素。有一些研究结果证实了这一论断。例如,郑利等^[30]得出武汉东湖沉积物中3个采样站位AVS与有机碳均显著相关:I站位($r = 0.9091, P = 0.001$);II站位($r = 0.5218, P = 0.018$);III站位($r = 0.4579, P = 0.042$)。但实际情况远比此复杂,Fang等^[31]及Liu等^[32]的研究结果都表明AVS与有机碳之间无显著相关性。本研究结果(见图4),表明AVS与有机碳具有显著正相关关系,相关系数为0.380($P < 0.05$)。

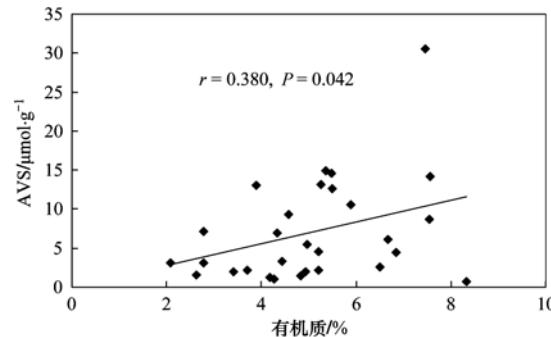


图4 AVS与OC的关系

Fig. 4 Relationship between AVS and OC

3.2.3 SRB

硫酸盐还原菌(SRB)是地球环境中的重要菌群,对不少物质的生物地球化学循环起重要作用,对于水体硫循环的影响甚大。生活在沉积物中的SRB与其生存环境之间有密切关系,其活动的强弱受多种因素制约,一般来说,在厌氧及富含有机质(可为其提供所需碳源以及氮源)条件下SRB含量较高^[19]。本次研究结果与此相符:SRB含量最高的B站位(位于老寮村河段)受老寮村生活污水影响,沉积有机碳含量充足(5.32%),且处于厌氧及强还原条件(Eh为96 mV);处于岸滩地带的F站位及D站位,因潮汐影响水位变化较大,时常露出水面,暴露在空气中,故SRB含量均较低。但SRB与OC之间相关关系很弱($r = 0.013, P = 0.945$),表明沉积物中的SRB,除了有机碳外,还有很多影响因素。SRB在自然界的分布特征具有对数分布的特点^[19,33],为此将SRB取对数后,再计算其与各要素之间的相关系数。取对数后SRB与AVS的相关系数

为 0.321, 置信水平为 91.1% ($P = 0.089$, 见图 5), 比取对数之前高, 但也未达到显著相关的程度(取对数前 $r = 0.224$, $P = 0.243$).

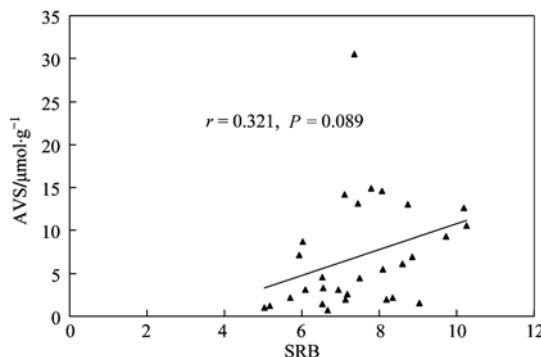


图 5 AVS 与 SRB 的关系
Fig. 5 Relationship between AVS and SRB

值得注意的是 G 站位, 其 AVS 值在各个站位中最低(均值为 $1.380 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$). 该站位有机碳含量高(6.03%), 上覆水溶解氧为 0, 表层沉积物处于厌氧和强还原条件(Eh 为 -110 mV). 但由于其污染严重, 毒性物质较多, 妨碍了硫酸盐还原菌的生长及其生物活性, 使得该站位 AVS 含量很低. 受凤岗涌影响的 E 站位(凤岗村)也呈现“双低”现象(SRB 与 AVS 均低).

3.2.4 TS

式(1)表明硫酸盐是 AVS 的影响因素, 但沉积物基本处于厌氧状态, 故硫酸盐几乎不存在, 测量沉积物 TS 是较为现实的做法. 目前的主流观点认为: AVS 是 TS(总硫)中最具活性的组分, 其最主要的部分是可溶态的 S^{2-} , 在沉积物中多以 FeS 的形式存在^[7, 10, 34, 35]. AVS 是 TS 的一部分, 是 TS 中活性最大的一部分, 因此在通常条件下, AVS 的含量与 TS(也有人形象地称之为“硫库”^[14])可能会表现出相同的变化趋势.

本研究结果表明 TS 与 AVS 具有显著相关关系(图 6). 这与 Morse 等^[12]的研究结果相同. 证实了作为 TS 的一部分, AVS 与 TS 存在密切的关系. 这种总量与它的可提取态之间存在显著相关的情况在类似研究中也有报道, 如杨永强等^[36]在对采自珠江口的沉积物用 Tessier 五步连续提取法进行分析的过程中, 发现所提各种形态重金属(这些重金属包括 Cu、Pb、Zn、Ni 等)与其总量均显著相关.

AVS 与 TS 的密切关系为研究 AVS 的空间分布提供了方便. AVS 的测定时间较长, 如果采用氮载气冷酸溶硫化物法, 测定一个样品的时间至少要 2 h

(不包括测 SEM 的时间), 而且样品要在短时间内测完, 由于人力物力所限, 也为了保证准确性, 每一批采集的样品数不可能太多, 为了反映 AVS 的连续变化需要进行插值. TS 的测定采用的是干样品, 对样品保存及操作方面的要求较 AVS 低, 测试结果的重现性高于 AVS. 地统计学中的协克里金法可以利用资料多, 容易测量的变量去提高资料少、难于测量的变量的估值精度^[37]. 故可以运用拟协克里金法, 借助 AVS 与 TS 之间的显著相关关系来提高 AVS 插值精度.

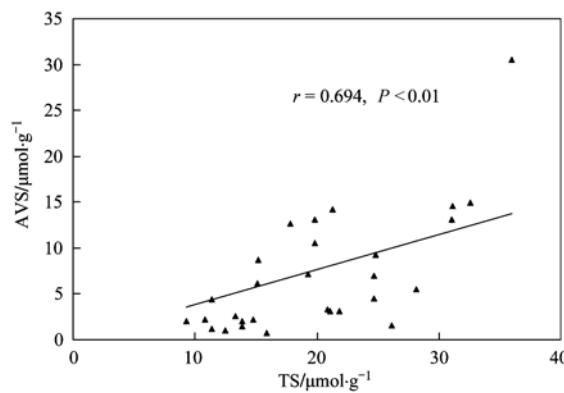


图 6 AVS 与 TS 的关系
Fig. 6 Relationship between AVS and TS

3.2.5 各因素综合影响分析

利用 SPSS 中的线性回归模块, 对前述 4 个影响因素进行分析及检验. 表 6 是由上述 4 种因素所建立的回归方程的方差检验, 结果表明: 统计量 $F = 13.604$, $P < 0.001$, 回归方程达到极显著性水平. 残差诊断的 Durbin-Waston 统计量 $DW = 1.722$, 接近于 2, 表示残差相互独立; 决定系数 $R^2 = 0.694$, 表明应用模型能解释 69.4% 的因变量变化, 同时说明多个自变量与因变量之间存在线性回归关系. 表 7 为回归系数表, 由表 7 所得回归方程为:

$$\gamma = -20.562 + 0.708 \times \text{TS} + 0.335 \times \text{OC} + 0.103 \times \text{SRB} - 0.210 \times \text{Eh} \quad (2)$$

由式(2), 对 3.1 节所提问题进行回答: AVS 空间分布影响最大的是 TS, 其次为 OC, 再下来是 Eh 及 SRB; J 站位(上岸村) AVS 最高(均值 $22.377 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)是因为其 TS 及 OC 的含量均很高(TS 在各站位中居第二位, OC 最高), Eh 最低; G 站位 AVS 最低(均值 $1.380 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$), 因其位于凤岗涌, 受印染废水中的毒性物质影响, SRB 数量稀少且活性受到很大限制, 故硫酸盐还原作用极不活跃, 故虽然符合 TS 与 OC 高、Eh 低这几个条件, AVS 值仍然很低. 与 G 站位情况类似的还有 E 站位及 F 站位.

表 6 回归方程的方差分析

Table 6 Variance analysis of the regression equation

方差来源	平方和	df	均方	F 值	P 值
回归	831.280	4	207.820	13.604	0.000
残差	366.620	24	15.276		
总计	1 197.899	28	207.820		

表 7 回归系数分析表

Table 7 Analysis of regression parameters

项目	偏回归系数	标准误差	标准化偏 回归系数	t 值	P 值
常数	-20.562	5.373	—	-3.827	0.001
TS	0.642	0.111	0.708	5.810	0.000
OC	137.205	50.440	0.335	2.720	0.012
SRB	0.482	0.585	0.103	0.823	0.419
Eh	-0.042	0.025	-0.210	-1.655	0.111

3.3 佛山西南涌重金属生物毒性分析

根据 Di Toro 等^[2]的论断: SEM 小于 AVS 时(指单位质量沉积物中摩尔数的比较,下同),可以认为沉积重金属对底栖生物不具潜在生态危害作用。因为 AVS 是沉积硫化物中最具反应活性的部分, SEM 代表沉积重金属中活性较强容易被生物所利用的部分; 重金属多为亲硫元素, 极易与活性很强的 AVS 反应生成难溶的金属硫化物; 当 SEM < AVS 时, 间隙水中几乎不存在重金属自由离子(此部分重金属最容易为底栖动物所利用), 水体重金属生态危害受到抑制。

表 8 显示了西南涌(SEM - AVS) 相对值。由表 8, 重金属含量最高的是位于上岸村的 J 站位, 达到 $23.210 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 该站位除了受上岸村周边区域污水影响外, 在涨潮时还受到大棉涌及大朗涡涌上溯污水的影响。此外, 该站位水流平缓, 有机质含量丰富, 使水中的重金属易于沉积在该河段。但是重金属生态风险最大的却不是 J 站位, 而是 G 站位, 因为该站位 $\sum (\text{SEM}_5 - \text{AVS})$ 值最大($3.759 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)。G 站位位于凤岗涌, 该河涌主要为印染废水带来的有机污染, 重金属含量不算高($5.139 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$), 但由于 SRB 活动不活跃, AVS 含量在各站位中最低, 缺少活性硫化物来束缚游离重金属, 故其重金属风险最大。 $\sum \text{SEM}_5$ 大于 AVS 的站位有 6 个(占 60%), 按照前述理论这些站位重金属具有潜在生态危害风险。

尽管在缺氧沉积中 AVS 对重金属生物可利用性起着主要作用的观点已经得到了很多研究人员的认同, 但是其它结合相(如有机碳、铁锰氧化物等)的作用仍旧不能忽视。不少研究^[38~40]发现: 当沉积物中 SEM/AVS 比值 > 1 时, 间隙水中的金属浓度也可能

较低, 不会产生毒性, 可以推断为, 沉积物中其它结合相与余下的 SEM 结合了。Di Toro 等^[41]对(SEM - AVS)方法进行改进, 将有机碳这一重要因素考虑进去, 以有机碳来归一化(SEM - AVS)之差, 见式(3)。

$$[\sum (\text{SEM} - \text{AVS})]/f_{\text{oc}} = K_{\text{oc}} \text{LC}_{50} \quad (3)$$

式(3)中, K_{oc} 为分配系数; LC_{50} 为半致死剂量。Di Toro 等^[41]的实验结果表明式(3)显著地改善了对实验动物致死率(亦即毒性)的预测, 降低了毒性预测的不确定性。Di Toro 等^[41]得出的结论为: $[\sum (\text{SEM}_5 - \text{AVS})]/f_{\text{oc}} < 150 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 时, 重金属不会对底栖生物产生急性或慢性毒性。按照这一标准, 本研究的 10 个站位重金属均不具有不可接受的潜在生物毒性。表明由于西南涌沉积物富含有机质, 其沉积重金属生物毒性受到一定程度的遏制。

表 8 佛山西南涌表层沉积物 SEM 与 AVS 差值

Table 8 Difference between SEM and AVS

concentrations in Xinan Creek

样品号	$\sum \text{SEM}_5$	$\sum (\text{SEM}_5 - \text{AVS})$	$[\sum (\text{SEM}_5 - \text{AVS})]/f_{\text{oc}}$
A 上	10.070	2.882	79.613
B 上	2.459	-8.376	-157.444
C 上	7.850	1.332	32.019
D 上	6.630	0.310	7.506
E 上	2.170	-1.677	-27.136
F 上	1.405	-0.052	-1.143
G 上	5.139	3.759	62.338
H 上	11.664	0.021	0.398
I 上	1.531	-1.907	-41.457
J 上	23.210	0.833	11.092

虽然 $[\sum (\text{SEM}_5 - \text{AVS})]/f_{\text{oc}}$ 能够较好地甄别沉积重金属的生物毒性, 但对于单个重金属来说, 该判据仍然无法给出潜在的生态危害值。为了确定单种重金属的生物毒性, 采用表 9 所列标准^[41]进行甄别。该标准规定: 当重金属含量低于低限效应值(TEL)时, 表示生物毒性效应几乎不发生, 而高于可能效应值时, 会经常发生毒性效应, 介于低限效应值与可能效应值(UEL)之间又称为“灰色地带”, 表示偶尔发生毒性效应^[42]。按照该标准规定的限值, Cd、Ni、Cu、Zn、Pb 这 5 种重金属均有产生毒性效应的潜在风险。

综上, 从 $\sum (\text{SEM}_5 - \text{AVS})$ 来判断, 60% 的采样站位具有不可接受的潜在生态风险; 考虑有机碳的作用, 采用 $[\sum (\text{SEM}_5 - \text{AVS})]/f_{\text{oc}}$ 判据, 则全部站位重金属均不具有潜在生态风险。从单种重金属来看, Cd、Ni、Cu、Zn、Pb 这 5 种重金属均有产生毒性效应的潜在生态风险。

表9 淡水沉积物金属对底栖动物可能产生毒性效应的阈值以及西南涌沉积重金属毒性甄别¹⁾

Table 9 Threshold values for metal toxicity to benthic organisms in freshwater sediments and the comparison with Xian Creek

项目	Cd	Ni	Cu	Zn	Pb
TEL/ $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$	0.005	0.307	0.562	1.883	0.169
UEL/ $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$	0.027	0.733	1.353	7.952	0.613
小于 TEL/%	0	40	40	40	30
灰色地带/%	70	40	40	30	60
大于 UEL/%	30	20	20	30	10

1) TEL(threshold effects level), 低限效应值; UET(upper effects threshold), 高限效应值

4 结论

(1) 所测样品 AVS 范围 $0.207 \sim 41.453 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 均值 $6.684 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 与其他研究结果相比较高; 50% 的站位沉积物 AVS 表层 > 下层; 表层沉积物 AVS 变异系数为 93.61%, 下层达 153.09%, 均属高度变异。

(2) 各因素对 AVS 空间分布影响排序为: TS > OC > Eh > SRB, 回归方程为 $\gamma = -20.562 + 0.708 \times TS + 0.335 \times OC + 0.103 \times SRB - 0.210 \times Eh$.

(3) 以 $\sum (\text{SEM}_5 - \text{AVS})$ 值判断, 60% 的采样站位具有潜在生态风险; 采用 $[\sum (\text{SEM}_5 - \text{AVS})]/f_{oc}$ 判据, 则全部站位均不具有不可接受的潜在生态风险。从单种重金属来看, Cd、Ni、Cu、Zn、Pb 均有产生毒性效应的潜在生态风险。

致谢: 感谢中山大学环境科学与工程学院董汉英博士, 广州海洋地质调查局甘华阳博士、倪玉根工程师, 华南师范大学生命科学学院方展强教授、张再旺硕士, 广东环境保护工程职业学院杨林珊老师在采样及样品分析过程中提供帮助!

参考文献:

- [1] De Jonge M, Blust R, Bervoets L. The relation between Acid Volatile Sulfides (AVS) and metal accumulation in aquatic invertebrates: implications of feeding behavior and ecology [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(5): 1381-1391.
- [2] Di Toro D M, Mahony J D, Hansen D J, et al. Toxicity of cadmium in sediments: the role of acid volatile sulfide [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1990, **9**(12): 1487-1502.
- [3] Casas A M, Crecelius E A. Relationship between acid volatile sulfide and the toxicity of zinc, lead and copper in marine sediments [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1994, **13**(3): 529-536.
- [4] Connor T P O, Dascalakis K D, Hyland J L, et al. Comparisons of sediment toxicity with predictions based on chemical guidelines [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1998, **17**(3): 468-471.
- [5] USEPA. An SAB report: Review of the agencies approach for developing sediment criteria for five metals [R]. EPA-SAB-EPEC-95-020. Washington, DC, USA: U. S. Environmental Protection Agency. 1995. 8-11.
- [6] Hansen D J, Berry W J, Boothman W S, et al. Predicting the toxicity of metal-contaminated field sediments using interstitial concentration of metals and acid-volatile sulfide normalizations [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1996, **15**(12): 2080-2094.
- [7] Berry W J, Cantwell M G, Edwards P A, et al. Predicting toxicity of sediments spiked with silver [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, **18**(1): 40-48.
- [8] Van Griethuysen C, Van Baren J, Peeters E T H M, et al. Trace metal availability and effects on benthic community structure in floodplain lakes [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2004, **23**(3): 668-681.
- [9] Mackay A P, Mackay S. Spatial distribution of acid-volatile sulphide concentration and metal bioavailability in mangrove sediments from the Brisbane River, Australia [J]. Environmental Pollution, 1996, **93**(2): 205-209.
- [10] Burton G A, Green A, Baudo R, et al. Characterizing sediment acid volatile sulfide concentrations in European streams [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2007, **26**(1): 1-12.
- [11] Hare L, Carignan R, Huerta-Diaz M A. A field study of metal toxicity and accumulation by benthic invertebrates: implications for the acid-volatile sulfide (AVS) model [J]. Limnology and Oceanography, 1994, **39**(7): 1653-1688.
- [12] Morse J W, Luther G W III. Chemical influences on trace metal-sulfide interactions in anoxic sediments [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, **63**(19-20): 3373-3378.
- [13] Morse J W, Rickard D. Chemical dynamics of sedimentary acid volatile sulfide [J]. Environmental Science and Technology, 2004, **38**(7): 131A-136A.
- [14] Rickard D, Morse J W. Acid volatile sulfide (AVS) [J]. Marine Chemistry, 2005, **97**(3-4): 141-197.
- [15] Lasorsa B, Casas A. A comparison of sample handling and analytical methods for determination of acid volatile sulfides in sediment [J]. Marine Chemistry, 1996, **52**(3-4): 211-220.
- [16] Van Griethuysen C, Luitwieler M, Joziasse J, et al. Temporal variation of trace metal geochemistry in floodplain lake sediment subject to dynamic hydrological conditions [J]. Environmental Pollution, 2005, **137**(2): 281-294.
- [17] 林晓纯. 芦苞涌、西南涌分洪对下游三角洲水环境影响及对

- 策研究 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2001, **40** (Sup2): 39-42.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社 2002. 252-320.
- [19] 袁琦, 崔玉雪, 陈庆强, 等. 崇明东滩潮间带硫酸盐还原菌及有机质含量的初步研究 [J]. 环境科学, 2010, **31**(9): 2155-2159.
- [20] Allen H E, Fu G M, Deng B L. Analysis of acid-volatile sulfide (AVS) and simultaneously extracted metals (SEM) for the estimation of potential toxicity in aquatic sediments [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1993, **12**(8): 1441-1453.
- [21] Hyland J, Balthis L, Karakassis I, et al. Organic carbon content of sediments as an indicator of stress in the marine benthos [J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, **295**: 91-103.
- [22] 利锋, 温琰茂, 朱婷婷. 城市污染河道沉积物 AVS 与重金属生物毒性研究 [J]. 环境科学, 2007, **28**(8): 1810-1815.
- [23] Lawra A G, James L J H, William I W, et al. Seasonal bioavailability of sediment-associated heavy metals along the Mississippi river floodplain [J]. Chemosphere, 2001, **45**(4-5): 643-651.
- [24] Van Griethuysem C, Meijboom E W, Koelmans A A. Spatial variation of metals and acid volatile sulfide in floodplain lake sediment [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2003, **22**(3): 457-465.
- [25] Mucha A P, Vasconcelos T S D, Bordalo A A. Spatial and seasonal variations of the macrobenthic community and metal contamination in the Douro estuary (Portugal) [J]. Marine Environmental Research, 2005, **60**(5): 531-550.
- [26] Van den Berg G A, Loch J P G, Van der Heijdt L M, et al. Vertical distribution of acid-volatile sulfide and simultaneously extracted metals in a recent sedimentation area of the river Meuse in the Netherlands [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1998, **17**(4): 758-763.
- [27] 贾振邦, 林健枝, 吕伟丰. 香港沉积物氧化过程对铅的约束作用 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 1999, **35**(6): 834-841.
- [28] Gagnon C, Mucci A, Pelletier é. Anomalous accumulation of acid-volatile sulphides (AVS) in a coastal marine sediment, Saguenay Fjord, Canada [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, **59**(13): 2663-2675.
- [29] 黄昌发. 上海市城郊结合部河道水环境研究和整治对策 [D]. 上海: 华东师范大学, 2001. 57-61.
- [30] 郑利, 徐小清. 武汉东湖沉积物中酸挥发性硫化物(AVS)的深度分布及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2003, **15**(3): 245-251.
- [31] Fang T, Li X D, Zhang G. Acid volatile sulfide and simultaneously extracted metals in the sediment cores of the Pearl River Estuary, South China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2005, **61**(3): 420-431.
- [32] Liu J C, Yan C L, Macnair M R, et al. Vertical distribution of acid-volatile sulfide and simultaneously extracted metals in mangrove sediments from the Jiulong River Estuary, Fujian, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2007, **14**(5): 345-349.
- [33] 杜虹, 黄显兵, 黄洪辉, 等. 深澳湾底质沉积物中酸可挥发性硫化物 (AVS) 和硫酸盐还原菌 (SRB) 的时空分布 [J]. 海洋湖沼通报, 2011, (1): 85-93.
- [34] Di Toro D M, Mahony J D, Hansen D J, et al. Acid volatile sulfide predicts the acute toxicity of cadmium and nickel in sediments [J]. Environmental Science and Technology, 1992, **26**(1): 96-101.
- [35] Howard D E, Evans R D. Acid-volatile sulfide (AVS) in a seasonally anoxic mesotrophic lake: seasonal and spatial changes in sediment AVS [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1993, **12**(6): 1051-1057.
- [36] 杨永强. 沉积物重金属元素的分布形态及其潜在生态风险评价 [D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2007. 81-87.
- [37] 张仁铎. 空间变异理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社. 2005. 57-75.
- [38] Leonard E N, Ankley G T, Hoke R A. Evaluation of metals in marine and freshwater surficial sediments from the environmental monitoring and assessment program relative to proposed sediment quality criteria for metals [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1996, **15**(12): 2221-2232.
- [39] Yu K C, Tsai L J, Chen S H, et al. Chemical binding of heavy metals in anoxic river sediments [J]. Water Research, 2001, **35**(17): 4086-4094.
- [40] Ankley G T, Di Toro D M, Hansen D J, et al. Technical basis and proposal for deriving sediment quality criteria for metals [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1996, **15**(12): 2056-2066.
- [41] Di Toro D M, McGrath J A, Hansen D J, et al. Predicting sediment metal toxicity using a sediment biotic ligand model: methodology and initial application [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2005, **24**(10): 2410-2427.
- [42] Lacey E M, King J W, Quinn J G, et al. Sediment quality in Burlington harbor, Lake Champlain, U. S. A. [J]. Water, Air and Soil Pollution, 2001, **126**(1-2): 97-120.

CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, et al. (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features: Results of In-site Measurements	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, et al. (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, et al. (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, et al. (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, et al. (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, et al. (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, et al. (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i>	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients: A Case Study in Taihu Lake	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jiashan	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, et al. (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, et al. (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, et al. (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-Dong, et al. (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, et al. (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, et al. (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, et al. (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physico-ecological Engineering	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, et al. (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, et al. (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate	YUAN Tan, HUA Yu-me, ZHU Duan-wei, et al. (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, et al. (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, et al. (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-ji, et al. (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, et al. (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, et al. (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, et al. (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, et al. (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, et al. (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, et al. (2384)
Mechanism of NH_4^+ -N Removal in Drinking Water Biofilter	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, et al. (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, et al. (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, et al. (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, et al. (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, et al. (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, et al. (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production	LIU Hong-yan, WANG Guang-ze, SHI Liu-yan, et al. (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, et al. (2470)
Characterization of $\text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}$ Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, et al. (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH_4 and N_2O Efluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, et al. (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, et al. (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, et al. (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, et al. (2503)
In-situ Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures: A Field Trial	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, et al. (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2012年7月15日 33卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 15, 2012

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

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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行