

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第1期

Vol.34 No.1

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角背景地区秋冬季节大气气态总汞含量特征研究	1
厦门城区大气颗粒物 PM ₁₀ 中有机酸源谱特征分析	8
兴隆大气气溶胶中水溶性无机离子分析	15
气相组分对氨吸收同步脱除模拟烟气 SO ₂ 和 NO _x 的影响	21
麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较	27
单光子/光电子在线质谱实时分析聚氯乙烯热分解/燃烧产物	
碱性活性炭表面特征及其吸附甲烷的研究	34
夏季黄渤海表层海水中二甲亚砜 (DMSO) 的浓度分布	39
2010 年秋季长江口口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析	45
基于集合均方根滤波的太湖叶绿素 a 浓度估算与预测	51
基于 HJ1A-CCD 数据的高光谱影像重构研究	61
重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究	69
区域点源和非点源磷入河量计算的二元统计模型	77
秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征	84
湘江沉积物铜和汞质量基准的建立及其应用	91
丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价	98
汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布	108
黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估	116
胶州湾、套子湾及四十里湾表层沉积物中有机氯农药的含量和分布特征	121
基于干扰梯度的钦江流域底栖动物完整性指数候选参数筛选	129
海洋细菌 <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 分离鉴定及对中肋骨条藻的化感作用	137
水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响	145
化感物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响	150
无负压供水模式下管网水力模拟与安全评价分析	156
天然有机物的相对分子质量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响	163
不同基质条件下透性处理对脱硫弧菌硫酸盐还原活性的影响	169
基于零价铁的双金属体系对六氯苯还原脱氯研究	177
负载型 TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿的动力学研究	182
污水厂微曝气系统工况下充氧性能测试与分析	188
微气泡及其产生方式对活性污泥混合液性质的影响	194
不同氮浓度冲击对颗粒污泥脱氮过程中 N ₂ O 产生量的影响	198
模拟电镀污泥重金属浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	204
嗜麦芽窄食单胞菌对铜的吸附特性与离子交换	209
阴离子表面活性剂改性水滑石吸附硝基苯的特性研究	217
活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究	226
北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析	231
北京市市售鸡蛋和鸭蛋中全氟化合物的污染水平研究	237
北京市场常见淡水食用鱼体内农药残留水平调查及健康风险评估	244
多效应残差法 (MERA) 表征二甲亚砜-农药二元混合物毒性相互作用	251
利用 DGGE-菌落原位杂交法分离土壤中精喹禾灵降解菌	257
不同白腐真菌复配方式对产酶的影响	263
不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响	271
垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响	277
黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征	283
丘陵林地土壤酸化改良剂的集中施用-自然扩散修复技术研究	288
重度滴滴涕污染土壤低温等离子体修复条件优化研究	293
无定形 Fe(OH) ₃ 和 Fe ₃ O ₄ 共沉淀态 As 的化学提取	302
铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响	308
污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究	315
高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能	321
基于情景分析的浙江沿海地区环境污染防治战略研究	328
微生物全细胞传感器在重金属生物可利用度监测中的研究进展	336
2012 城市生态学术研讨会会议论文	347
北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征	357
北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征	364
北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析	373
洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析	379
低碳交通电动汽车减排潜力及其影响因素分析	385
北京市社区生活垃圾分类收集实效调查及其长效管理机制研究	395
人工湿地在应用中存在的问题及解决措施	401
《环境科学》征订启事 (26)	
《环境科学》征稿简则 (68)	
信息 (76, 144, 301, 400)	
专辑征稿通知 (394)	

湘江沉积物镉和汞质量基准的建立及其应用

蒋博峰¹, 桑磊鑫^{1,2}, 孙卫玲^{1*}, 郝伟¹, 李丽¹, 邓宝山¹

(1. 北京大学环境科学与工程学院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871; 2. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055)

摘要: 沉积物质量基准是保护底栖生物免受污染物危害的保护性临界水平, 可用来评估与沉积物结合的污染物的影响, 并为底栖生物保护和沉积物的科学管理提供依据. 分析了湘江43个采样点沉积物、上覆水、间隙水和植物中Cd和Hg含量, 选取钩虾做沉积物毒理实验, 利用相平衡分配法、加标毒理实验法和背景值法确定湘江沉积物Cd和Hg质量基准低值(SQC-L)分别为 $1.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 基准高值(SQC-H)分别为 $28.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 经与国内外基准值比较, 并与底栖生物监测数据和植物监测数据对比分析, 表明确定的基准值合理. 应用该基准值评价湘江沉积物质量现状发现, 湘江沉积物Cd和Hg含量低于SQC-L和高于SQC-H的采样点所占比例较低, 74.4%和76.7%的采样点沉积物Cd和Hg含量在SQC-L和SQC-H之间.

关键词: 沉积物质量基准; 重金属; 相平衡分配法; 加标毒理实验; 湘江

中图分类号: X820 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0098-10

Derivation and Application of Sediment Quality Criteria of Cd and Hg for the Xiangjiang River

JIANG Bo-feng¹, SANG Lei-xin^{1,2}, SUN Wei-ling¹, HAO Wei¹, LI Li¹, DENG Bao-shan¹

(1. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Sediment quality criterion (SQC) is the concentrations of sediment-associated contaminants that are unlikely to be associated with sediment toxicity or other adverse effects on benthic invertebrates. Thus, the derivation of SQC is crucial to protect benthic invertebrates, and can serve as the tool for scientific sediment management. Sediment, interstitial water, and plant samples were collected at 43 sampling sites from the Xiangjiang River, and metal concentrations were determined. Based on equilibrium partitioning approach, spiked sediment toxicity approach using *Hyalella azteca*, and background value approach, SQC for Cd and Hg in the Xiangjiang River was derived. Results showed that, SQC-L for Cd and Hg in the Xiangjiang River were $1.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively, and SQC-H were $28.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively. SQC were comparable to those in previous studies. Also, the reasonability of SQC was demonstrated by the heavy metal concentrations in plants, matching sediment chemistry and toxicity data for benthic invertebrates in the Xiangjiang River. To assess the sediment quality of Xiangjiang, metal concentrations in sediment samples were compared with the SQC. It was found that the proportion of sampling sites with Cd and Hg concentrations lower than SQC-L or higher than SQC-H was low, and 74.4% and 76.7% of sampling sites showed Cd and Hg concentrations between SQC-L and SQC-H.

Key words: sediment quality criteria; heavy metals; equilibrium partitioning approach; spiked sediment toxicity approach; the Xiangjiang River

沉积物是底栖生物的栖息场所,也是水生生态系统的重要组成部分,它既是污染物的“汇”,也是污染物的“源”,保护其不受污染对维持一个良好的水生生态环境至关重要^[1~4]. 沉积物质量基准是使底栖生物免受污染物危害的保护性临界水平,可用来评估与沉积物结合污染物的影响,能为沉积物的科学管理提供依据^[5,6]. 它可分为基准低值(SQC-L)和基准高值(SQC-H): SQC-L是指当沉积物中污染物浓度低于该值时,不会对底栖生物造成影响; SQC-H是指当沉积物中污染物浓度高于该值时,极

可能对底栖生物造成影响;当沉积物中污染物浓度介于低值和高值之间时,可能会对底栖生物造成影响^[7].

国外关于沉积物质量基准的研究始于20世纪80年代,提出了许多制定基准的方法,包括背景值法、表观效应阈值法、筛选水平浓度法、加标毒理

收稿日期: 2012-03-14; 修订日期: 2012-05-06

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07212-001)

作者简介: 蒋博峰(1988~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境污染化学, E-mail: jiangbofeng@iee.pku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: wlsun@pku.edu.cn

实验法, 相平衡法、生物效应数据库法等^[2,7,8], 其中应用较广的是相平衡法和生物效应数据库法^[7,9]. 荷兰^[10,11]、英国^[12]和挪威^[13~15]等国家和地区利用相平衡法制定了沉积物质量基准; 加拿大^[16~18]、美国佛罗里达州^[19~21]、澳大利亚、新西兰^[11,22]和香港^[23,24]等国家和地区利用生物效应数据库法制定了沉积物质量基准. 加标毒理实验法的应用虽不如以上两种方法广泛, 但越来越受到重视^[25,26]. 我国关于沉积物质量基准的研究起步稍晚于国外, 由于缺乏生物毒理数据和实地生物监测数据, 多数研究采用相平衡法^[27~33], 很少采用生物效应数据库法^[34].

湘江是长江重要支流之一, 也是湖南省内最大、最重要的河流. 湘江流域遍布锌、铅、铜、锰等矿, 重金属污染物大量排放并富集于沉积物中^[35~37]. 重金属毒性持久且不可降解, 因此危害严重^[38~40]. 但是, 除个别江段外^[41], 尚未有人对湘江全河段沉积物 Cd 和 Hg 质量基准的制定进行过系统研究. 本研究采集了湘江全流域的沉积物、上覆水、间隙水和植物样品, 分析了样品中重金属含量; 并用底栖生物钩虾进行了沉积物加标毒理实验; 在此基础上用相平衡法结合湘江沉积物重金属背景值和毒理实验数据确定了 Cd 和 Hg 的沉积物质量基准值, 用国内外已有基准值、底栖生物监测数据和植物监测数据进行对比分析, 并用此基准值评价了湘江沉积物质量. 本研究结果为制定符合当地实际的沉积物质量标准提供了基础数据, 并为湘江沉积物的重金属污染治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样和预处理

2010 年 1 月从湘江进入湖南后至洞庭湖入湖口共布设 43 个点, 采集沉积物、上覆水、间隙水和植物样品(图 1). 沉积物用抓泥器采集, 置于聚乙烯塑料瓶中密封. 塑料瓶加满样品不留空隙, 样品低温保存于冰块中带到实验室, 在实验室 -20°C 保存以备后续分析. 上覆水用塑料瓶采集, 加酸保存. 植物则放入塑料袋中保存. 沉积物样品分析时, 先解冻, 直接取样测定酸挥发性硫化物(AVS)和含水率, 然后取湿沉积物放入离心管中在 $4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下离心 30 min, 上清液(间隙水)过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 膜, 滤液置于塑料瓶中待测. 脱水后的沉积物室温下风干, 过 $63\text{ }\mu\text{m}$ 筛, $<63\text{ }\mu\text{m}$ 部分进行重金属总量和形态测定. 上覆水过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 膜, 滤液置于塑料

瓶中待测. 植物样品用自来水洗净, 将根、茎和叶分别剪下, 放入烘箱 80°C 烘干. 之后磨成粉末, 分别分析植物不同部位金属含量.

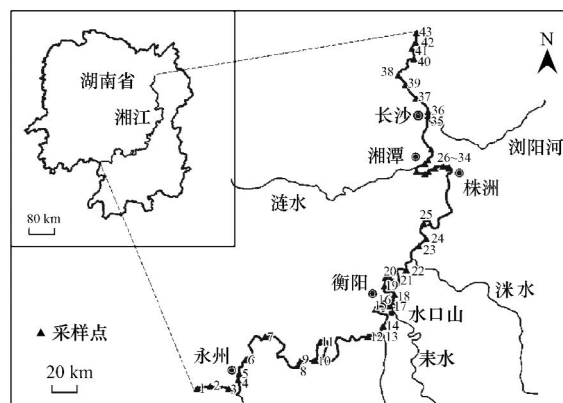


图 1 湘江采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites of the Xiangjiang River

1.2 样品分析与测定

1.2.1 金属分析

沉积物金属总量: 称取 1 g 样品至聚四氟乙烯烧杯中, 然后依次加入 10 mL 浓 HNO_3 , 6 mL HF 和 6 mL HClO_4 , 消解, 蒸至近干.

金属残渣态含量: 采用 Tessier^[42] 的五步连续提取法进行重金属形态分析. 具体方法: 准确称取 1 g 样品于离心管中, 依次加入相应的提取试剂. 分别提取完前 4 种形态(交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机质结合态)后, 将剩余物转移至聚四氟乙烯烧杯中, 然后依次加入 10 mL 浓 HNO_3 , 6 mL HF 和 6 mL HClO_4 , 消解, 蒸至近干.

植物中金属总量: 称取 1 g 样品, 加入浓 HNO_3 和 H_2O_2 消解.

上述各步消解完成后, 将剩余物转移到 50 mL 容量瓶中, 用 2% HNO_3 溶液定容, 过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜, 滤液置于塑料瓶中待测.

上述消解样品和间隙水中 Cd 含量用 ICP-MS (Thermo Fisher XSeries, Thermo Fisher Scientific) 测定, Hg 含量用原子荧光光度计 (AFS-9130, 北京吉天) 测定.

1.2.2 AVS 和上覆水离子含量

采用氮气载气 HCl 提取法测定 AVS 含量^[43], 准确称取湿沉积物 5~20 g 于三口瓶中, 加入 20 mL $6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐酸, 通入氮气, 流速控制在 $100\text{ cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$, 反应产生挥发性 H_2S , 通过测定 H_2S 来确定 AVS 含量. H_2S 的含量用分光光度计 (UV-1800, Shimadzu) 测定.

上覆水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量用离子色谱测定 (ICS-2500, Dionex), 并计算其硬度。

1.3 加标毒理实验

本研究选取钩虾 (*Hyalella azteca*) 作为实验生物。钩虾是美国材料与试验协会 (ASTM) 推荐的毒理实验生物, 它具有对沉积物毒性敏感、直接与沉积物接触和能耐受不同性质沉积物等特点^[44]。具体步骤如下。

取过 63 μm 筛沉积物样品 45 g 置于 300 mL 烧杯中, 并加入 180 mL 湘江上覆水。对于 Cd 加标毒理实验, 设置 8 个浓度梯度 ($0 \sim 250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 每个浓度设两个平行。保持充分搅拌 4 h, 然后老化一个月。

老化完成后弃去上清液, 并重新加入 180 mL 干净湘江上覆水。之后每个烧杯加入 10 只成熟钩虾 (体长 1 cm 左右)。实验阶段, 日均温度保持在 23°C , 光周期为 12L: 12D, 用曝气头曝气使溶解氧 $> 2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 实验过程中不换水, 隔天喂食一次。每天测量水溶液的 pH、溶解氧、电导率等参数。同时, 每天观测钩虾, 记录钩虾的活动及存活情况。实验共进行 10 d。对于 Hg 加标毒理实验, 同样设置 8 个浓度梯度 ($0 \sim 18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 每个浓度设两个平行。其他步骤与 Cd 相同。

根据加标毒理实验法得到的浓度效应曲线, 可以选择不同的效应浓度分别作为 SQC-L 或 SQC-H。Simpson 等^[25] 认为 10% 致死浓度 (LC_{10}) 比较适合作为对生物无毒性的值, 即 SQC-L; 而半数致死浓度 (LC_{50}) 可作为对生物有毒性的值, 即 SQC-H^[45]。

1.4 相平衡法

相平衡分配法建立在 3 个经验假设^[46] 之上: ①化学物质在沉积物和间隙水两相之间的交换速率快且可逆, 处于热力学平衡状态, 因而可以用沉积物/间隙水分配系数 (K_p) 描述; ②沉积物中化学物质的生物有效性与间隙水中该物质浓度呈良好相关性, 但与沉积物中重金属总浓度并不相关; ③底栖生物和上覆水生物对化学物质敏感性相近, 因而可将水质基准应用于沉积物质量基准计算。相平衡分配法计算重金属的沉积物质量基准公式如下^[33, 47~50]。

$$\text{SQC} = K_p \times \text{WQC} + [\text{Me}_i]_r + [\text{Me}_i]_{\text{AVS}} \quad (1)$$

$$K_p = C_s / C_w \quad (2)$$

$$C_s = C_T \times (1 - A) \quad (3)$$

$$\text{SQC} = K_p \times \text{WQC} + [\text{Me}_i]_r \quad (4)$$

式中, SQC ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 为沉积物质量基准; WQC ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 为地表水重金属环境质量基准或标准; K_p 为重金属在沉积物和间隙水两相间的分配系数,

即沉积物中具有生物效应的金属含量 C_s ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和间隙水中金属含量 C_w ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 比值; C_T ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 为沉积物中重金属总量; A 为沉积物中残渣态重金属所占比例; $[\text{Me}_i]_r$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 为残渣态重金属含量; $[\text{Me}_i]_{\text{AVS}}$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 是与 AVS 结合的重金属含量。研究表明, 与 AVS 结合的二价金属主要是 Cu、Zn、Pb、Cd 和 Ni, 而 Hg 与 AVS 结合能力很弱^[31]。因此对于 Hg, 采用公式 (4) 计算。

USEPA^[51] 基于大量毒理实验并考虑硬度修正, 提出长期水质标准值 (criterion continuous concentration, CCC) 和短期水质标准值 (criterion maximum concentration, CMC)。可以将根据 CCC 和 CMC 计算的沉积物质量基准值分别当作 SQC-L 和 SQC-H。

1.5 基准值确定方法

本研究综合采用相平衡法、加标毒理实验法和背景值法确定湘江沉积物镉和汞质量基准值 (图 2)。

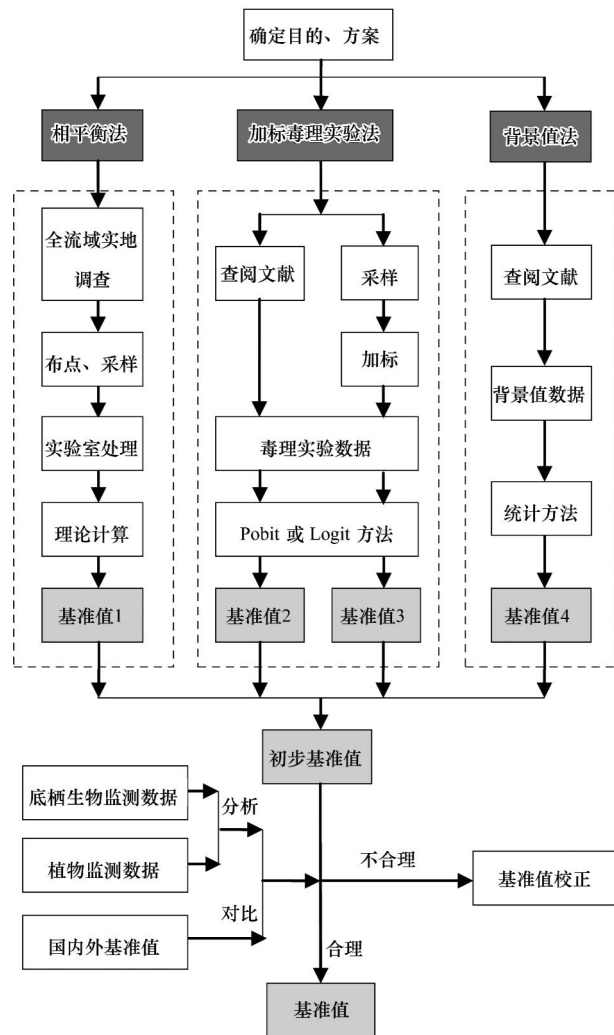


图 2 基准值确定流程示意

Fig. 2 Derivation of sediment quality criteria

相平衡法所得基准值记为基准值 1. 加标毒理实验包括两组数据:根据文献中湘江沉积物加标毒理实验数据所得基准值记为基准值 2,本研究加标毒理实验所得基准值记为基准值 3. 文献中背景值法所得基准值^[52]记为基准值 4. 将上述基准值取几何平均值^[7],作为湘江沉积物的初步基准值. 通过与国内外基准值比较,并与底栖生物监测数据和植物监测数据对比分析,以验证其合理性.

2 结果与讨论

2.1 沉积物和间隙水金属含量

沉积物中 Cd 和 Hg 含量(表 1)均值(范围)分别为 $14.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($1.06 \sim 55.81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 $0.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($0.03 \sim 0.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 与背景值(表 1)相比,本研究结果较高,特别是 Cd 含量要比背景值高几十倍. 这说明近几十年湘江沿岸矿产资源的开采与冶炼等活动对湘江沉积物造成了一定污染. 本研究 Cd 含量与 Zhang 等^[53]和唐晓燕等^[54]测

得湘江沉积物 Cd 含量(表 1)相似,但远小于污染比较严重的株洲段沉积物^[55],为其 1/4 左右. 这主要是因为衡阳和株洲分布着很多采矿和冶炼企业(衡阳水口山铅锌矿区和株洲冶炼厂),污染较严重^[35~37].

沉积物间隙水中 Cd 和 Hg 含量(表 1)均值(范围)分别为 $1.10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($0.01 \sim 7.45 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 $0.45 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($0.25 \sim 0.82 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). 滇池沉积物间隙水中 Cd 和 Hg 含量分别为 $13 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.16 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[31]. 天津某污水库沉积物间隙水中 Cd 和 Hg 含量分别为 $1.21 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.02 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[33]. 太湖沉积物间隙水中 Cd 含量为 $0.74 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,辽河沉积物间隙水中 Cd 含量为 $0.90 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[56]. 本研究沉积物间隙水中 Cd 含量与天津污水库、太湖和辽河沉积物间隙水中 Cd 含量相似,小于滇池沉积物间隙水中 Cd 含量;沉积物间隙水中 Hg 含量与滇池沉积物间隙水中 Hg 含量相似,小于天津污水库沉积物间隙水 Hg 含量.

表 1 湘江沉积物重金属总量、残渣态含量及间隙水中重金属含量

Table 1 Comparison of the total and residual concentrations of Cd and Hg in sediments and interstitial water

项目	Cd	Hg	来源
全段	$14.49(1.06 \sim 55.81)^{1)}$	$0.17(0.03 \sim 0.33)$	本研究
全段背景	0.6	0.1	[35]
全段背景	0.24	0.07	[52]
全段	$19.42(0.61 \sim 107.3)$	0.96	[54]
全段	$7.8(0.17 \sim 78)$	—	[53]
株洲-长沙	$64.7(35 \sim 113)$	—	[55]
残渣态/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$0.53(0.11 \sim 1.84)$	$0.06(0.001 \sim 0.36)$	本研究
间隙水/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$1.10(0.01 \sim 7.45)$	$0.45(0.25 \sim 0.82)$	本研究

1) 含量均值(范围)

2.2 相平衡法

K_p 是描述污染物水环境行为的重要理化参数^[28],可由两种方法计算,一种是利用实测数据直接计算,一种是利用数理模式和模拟实验相结合间接计算. 模拟计算通常较复杂,参数选择会使结果不稳定或增加不确定性,且模拟实验对实际情况反映有局限性^[30]. 因此,本研究采用实测数据,应用公式(2)直接计算 K_p . 去掉污染严重区域采样点和极端值后,取均值得 Cd 和 Hg 的 $\lg K_p$ 分别为 4.12 和 2.36. 本研究 Cd 的 K_p 与洞庭湖水系($\lg K_p = 4.3$)和沱江水系($\lg K_p = 4.2$)相似,小于嘉陵江水系($\lg K_p = 4.8$),比滇池($\lg K_p = 2.17$)大两个数量级; Hg 的 K_p 与沱江水系($\lg K_p = 2.5$)相似,小于滇池($\lg K_p = 3.15$)、洞庭湖水系($\lg K_p = 3.8$)和嘉陵江水系($\lg K_p = 3.0$). 不同河流(湖泊)沉积物中 K_p 相

差很大,这主要与沉积物自身性质(如粒径分布、地球化学性质和表面性质等),沉积物-水界面环境条件(如 pH 等),以及污染程度影响^[28,33].

根据式(1)和(4)计算湘江沉积物 Cd 和 Hg 质量基准. 本研究测得湘江水样的平均硬度(CaCO_3)为 $167.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,计算得硬度修正的 Cd 水质标准值 CCC 和 CMC 分别为 $0.000352 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.00332 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Hg 不受硬度影响^[51],其 CCC 和 CMC 分别为 $0.00077 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.0014 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 根据 CCC 和 CMC 计算得 Cd 和 Hg 的 SQC-L 分别为 $4.08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, SQC-H 分别为 $33.74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.37 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.3 加标毒理实验法

大量研究表明^[57,58],重金属浓度的对数与实验生物死亡率呈 S 型曲线关系,可分别用 Logit 模型和

Probit 模型拟合^[58~60]. 由图 3(a)和 3(b)可知, Cd 用 Logit 模型和 Probit 模型拟合得到的 LC_{10} (即 SQC-L) 分别为 $1.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 选择较小值 $1.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为 Cd 的 LC_{10} (即 SQC-L); Cd 用两种模型拟合得到的 LC_{50} (即 SQC-H) 都为

$23.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Hg 用两种模型拟合得到的 LC_{10} 都为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, LC_{50} 都为 $1.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Sae-Ma 等^[61]用底栖生物摇蚊幼虫 (*midge larvae*) 进行沉积物 Cd 加标毒理实验得到的 LC_{50} 为 $28.0 \sim 63.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与本研究 Cd 的 LC_{50} 相似.

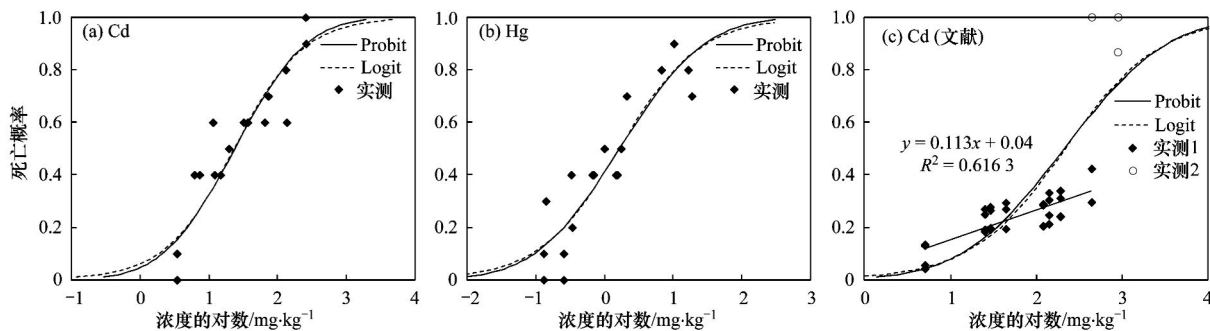


图3 Cd和Hg浓度效应曲线

Fig. 3 Dose-response curve of Cd and Hg

由于不同地区或区域沉积物的性质差别很大, 因此选择文献[62]中有关湘江沉积物的加标毒理实验数据[图 3(c)], 计算其相应基准值; 实验使用的是草鱼和白鲢胚胎, 观察沉积物中 Cd 含量对胚胎孵化率和成活率的影响. 如图 3 所示, 两种模型拟合的 S 型曲线与实测数据的拟合度并不高, 这可能与浓度梯度的设置有关. 在浓度范围 $2.5 \sim 3.0$ 的区间段, 死亡率从 30% 左右跃升到了 80% 以上. 这个浓度范围实验数据的欠缺导致 S 型曲线拟合度欠佳. 鉴于此, 排除高死亡率数据(实测 2), 对低死亡率的数据(实测 1)进行线性拟合, 结果显著相关 ($P < 0.05$). 根据线性拟合结果, 求得 Cd 的 LC_{10} 为 $3.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

2.4 沉积物质量基准值确定

采用相平衡法, 得到湘江沉积物 Cd 和 Hg 的 SQC-L 分别为 $4.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, SQC-H 分别为 $33.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 由文献中加标毒理实验得到 Cd 的 SQC-L 为 $3.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而本研究加标毒理实验 Cd 和 Hg 的 SQC-L 分别为 $1.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, SQC-H 分别为 $23.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 文献[50]中用背景值法计算出湘江沉积物 Cd 和 Hg 的污染起始浓度(相当于 SQC-L)分别为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. MacDonald 等^[7]认为几何平均值不容易受化学浓度极值的影响, 更能反映数值的集中趋势, 因此提出将不同方法所得基准值取几何平均, 这样所得基准值与生物效应数据比较吻合. 而且, 这样能减少第一类错误 (Type I error, False Positive) 和

第二类错误 (Type II error, False Negative), 降低基准值的不确定性. 此外, 应用多阈值型基准, 即同时给出 SQC-L 和 SQC-H 也能有效降低基准值的不确定性. 因此, 本研究将不同方法得到的 SQC-L 取几何平均, 得到 Cd 和 Hg 的 SQC-L 分别为 $1.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 将不同方法得到的 SQC-H 取几何平均, 得到 Cd 和 Hg 的 SQC-H 分别为 $28.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

表 2 为本研究和国内外已有的沉积物 Cd 和 Hg 质量基准值. 其中, 湘江水系^[32]、太湖和辽河^[56]基准值是根据相平衡法以 CCC 为水质基准值计算, 相当于本研究的 SQC-L; 而滇池^[31]沉积物的基准值是根据相平衡法以我国地表水Ⅲ类水质^[63]为水质基准值计算, 相当于本研究的 SQC-H. 通过对比表 2 数据可知, 本研究 Cd 的 SQC-L 稍高于国外 SQC-L, 与澳大利亚和新西兰及香港的 SQC-L 接近, 但小于国内湘江水系^[32]、太湖和辽河 Cd 的基准值^[56]. Cd 的 SQC-H 则高于国内外 Cd 的 SQC-H, 与荷兰和挪威的 SQC-H 接近, 但小于湘江水系^[32]的基准值. 本研究 Hg 的 SQC-L 和 SQC-H 分别处于国内外各 SQC-L 和 SQC-H 之间. 基准值的差异主要反映出不同基准建立方法建立的基准值的差别和基准建立方法的不确定性, 基准建立的复杂性, 以及不同地区沉积物的理化性质、底栖生物的种类、污染元素背景值等的不同. 这也表明在制定沉积物质量基准值时, 要综合利用多种方法, 根据不同地区的沉积物性质特点来制定基准值.

目前,各种基准制定方法都未考虑沉积物复合污染条件下各污染物之间相互作用.而实际环境中多种污染物通常是同时存在的,不同污染物之间会存在相互作用,从而会对生物产生联合毒性效应;

而且这种联合毒性效应对不同的生物可能会不同.因此,在单个污染物基准的基础上,综合考虑污染物之间的联合作用,制定复合污染物条件下的基准值,是今后需要深入研究的内容.

表 2 重金属的沉积物质量基准值比较¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 2 Comparison of sediment quality criteria in different countries/mg·kg⁻¹

基准类型	研究区域	基准名称	Cd	Hg	来源
SQC-L	中国湘江	SQC-L	1.89	0.13	本研究
	澳大利亚和新西兰 *	ISQG-Low	1.5	0.15	[11,22]
	加拿大安大略省 *	LEL	0.6	0.2	[64]
	加拿大 *	TEL	0.596	0.174	[16~18]
	美国佛罗里达沿海 *	TEL	0.676	0.13	[19,20]
	美国佛罗里达内陆 *	TEC	1	0.18	[21]
	荷兰 *	Target value	0.8	0.3	[10,11]
	挪威 *	QS	2.6	0.63	[13~15]
	中国香港	ISQV-low	1.5	0.28	[23,24]
	美国	ERL	1.2	0.15	[45]
	美国五大湖	TEL-HA28	0.58	—	[65]
	中国锦州湾	TEL	—	1.44	[34]
	中国湘江水系	SQC	54	0.136	[32]
	中国太湖	SQC	6.42	—	[56]
	中国辽河	SQC	5.42	—	[56]
SQC-H	中国湘江	SQC-H	28.32	0.79	本研究
	澳大利亚和新西兰 *	ISQG-High	10	1	[11,22]
	加拿大安大略省 *	SEL	10	2	[64]
	加拿大 *	PEL	3.53	0.486	[16~18]
	美国佛罗里达沿海 *	PEL	4.21	0.696	[19,20]
	美国佛罗里达内陆 *	PEC	5	1.1	[21]
	荷兰 *	MPC	12	10	[10,11]
	挪威 *	QS _{Ⅲ-Ⅳ}	15	0.86	[13~15]
	中国香港	ISQV-high	9.6	1	[23,24]
	美国	ERM	9.6	0.71	[45]
	美国五大湖	TEL-HA28	3.2	—	[65]
	中国锦州湾	TEL	—	5.71	[34]
	中国滇池	SQC	5.56	0.236	[31]

1) SQC: sediment quality criteria, SQG: sediment quality guideline, SQS: sediment quality standard, ISQV-low: interim sediment quality value low, ISQV-high: interim sediment quality value high, MET: minimal effect threshold, TET: toxic effect threshold, LEL: lowest effect level, SEL: severe effect level, ERL: effect range low, ERM: effect range median, TEL: threshold effect level, PEL: probable effect level, TEC: threshold effect concentration, PEC: probable effect concentration, TEL-HA28: threshold effect level for *Hyalella azteca*, 28 day test, PEL-HA28: probable effect level for *Hyalella azteca*, 28 day test, MPC: maximum permissible concentration, QS: quality standard, QS_{Ⅲ-Ⅳ}: border between class Ⅲ and Ⅳ; * 为全国或地区性的基准或临时基准,其它为基准的研究文献

2.5 沉积物质量基准应用

表 3 为文献[52]中湘江和洞庭湖沉积物 Cd 和 Hg 含量和底栖生物监测数据.当沉积物中 Cd 和 Hg 含量都小于其 SQC-L (Cd < 1.89 mg·kg⁻¹, Hg < 0.13 mg·kg⁻¹) 时,基本为无污染或轻污染;当沉积物中 Cd 或 Hg 含量大于 SQC-L 小于 SQC-H 时 (1.89 < Cd < 28.32 mg·kg⁻¹ 或 0.13 < Hg < 0.79 mg·kg⁻¹),基本为轻污染或中污染;当沉积物中 Cd

和 Hg 含量都高于 SQC-H (Cd > 28.32 mg·kg⁻¹, Hg > 0.79 mg·kg⁻¹) 时,为重污染.虽然表中利用 Shannon 多样性指数确定的沉积物污染程度反映的是底栖生物对受污染沉积物的总体毒性的响应,但是其评价结果与用 Cd 和 Hg 基准值对沉积物质量的评价结果一致.这一方面是由于湘江沉积物中不同重金属污染来源相似,其含量也相关,故不同采样点单一金属污染程度的相对大小可反映多金属污染

表 3 沉积物重金属总量和底栖生物 Shannon 指数¹⁾

Table 3 Total content of heavy metals in sediments and the Shannon index

分类	断面	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		Shannon	污染程度
		Cd	Hg		
Cd 和 Hg 含量都小于其 SQC-L	枫溪港	1.1	0.12	2.13	轻污染
	濠河口	0.91	0.09	3.14	无污染
	煤炭湾	0.39	0.06	3	无污染
	万子湖	0.97	—	3.43	无污染
	东南湖	0.63	—	3.14	无污染
Cd 或 Hg 含量大于其 SQC-L 小于 SQC-H	松柏镇	11.63	0.36	1.4	中污染
	易家湾	3.21	0.52	1.6	中污染
	浏阳河口	2.82	0.24	1.48	中污染
	樟树港	3.19	0.34	2.08	轻污染
	湘阴	1.67	0.32	2.64	轻污染
	芦林潭	1.08	0.42	3.09	无污染
	鲢鱼口	0.66	0.13	1.01	中污染
	鹿角	0.66	0.34	2.12	轻污染
	岳阳	0.92	0.21	2	轻污染
	城陵矶	0.73	0.19	2.18	轻污染
Cd 和 Hg 含量都高于其 SQC-L	霞湾港	29.02	9.75	0.24	重污染

1) “—”表示未检出

程度的相对大小;另一方面也可能说明 Cd 和 Hg 是湘江沉积物中主要的污染物,其毒性作用也相对较强^[54,66,67]。

受污染的沉积物不仅影响栖息于其中的底栖生物,也危害水生植物。植物根部可吸收沉积物中污染物并将污染物向茎、叶转移,因此植物体内的重金属含量在一定程度上也能反映沉积物中重金属的污染情况。根据沉积物中金属含量和相应的 SQC-L 和 SQC-H 值将不同采样点的沉积物样品分为 3 组:组 1(小于 SQC-L)、组 2(大于 SQC-L 小于 SQC-H)和组 3(大于 SQC-H),相应的 3 组植物样品重金属含量如图 4 所示。统计检验发现,植物样品根部 Cd 含量大小顺序为:组 1 ($6.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 4.61$

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) < 组 2 ($8.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 4.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) < 组 3 ($15.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 9.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$);茎部 Cd 含量大小顺序为:组 1 ($5.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 3.70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) < 组 2 ($6.47 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 4.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) < 组 3 ($10.96 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 1.16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$);叶部 Cd 含量大小顺序为:组 1 ($5.70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 3.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) < 组 2 ($8.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 5.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) < 组 3 ($14.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 3.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$)。所有采样点的沉积物样品中不存在 Hg 含量大于其 SQC-H 的样品,因此比较植物根、茎、叶部 Hg 含量时,只有组 1 和组 2。统计检验发现,植物样品根部 Hg 含量大小顺序为:组 1 ($0.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) < 组 2 (0.21

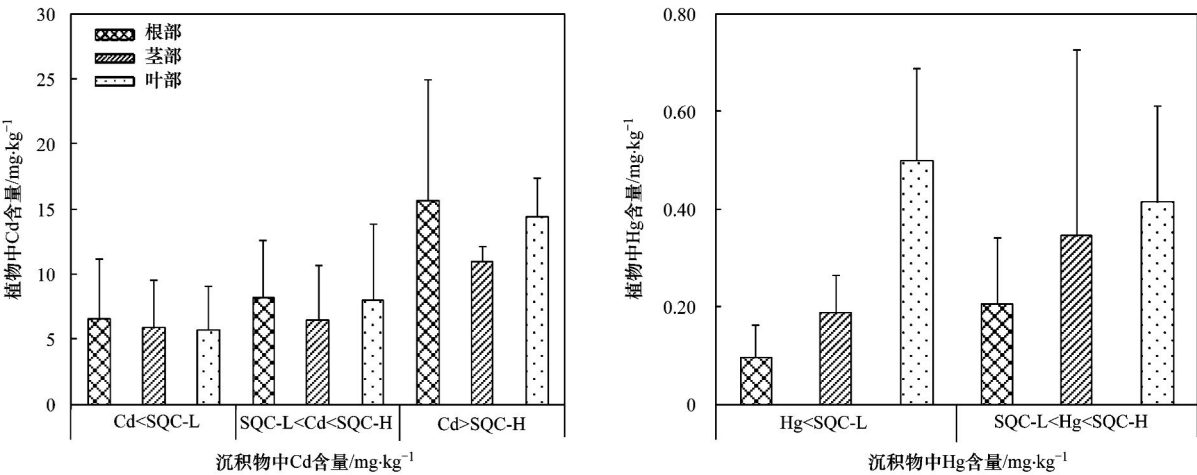


图 4 植物样品 Cd 和 Hg 含量的比较

Fig. 4 Comparison of the concentration of Cd and Hg of plants

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$); 茎部 Hg 含量大小顺序为: 组 1 ($0.19 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) $<$ 组 2 ($0.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$); 叶部 Hg 含量大小顺序为: 组 2 ($0.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.19 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) $<$ 组 1 ($0.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.19 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$). 这说明, 通过基准值能有效区分植物中 Cd 和 Hg 含量: 沉积物污染越严重, 植物中 Cd 和 Hg 含量越高. 但植物叶部 Hg 含量规律则相反, 这可能是因为植物叶部 Hg 除了通过根部从沉积物吸收外, 还可能会从水或空气中获得.

比较沉积物 Cd 和 Hg 质量基准值与沉积物 Cd 和 Hg 实测含量(图 5)可知, 沉积物中 Cd 含量小于 SQC-L、在 SQC-L 与 SQC-H 之间和大于 SQC-H 的点

占总采样点比例分别为 11.6%、74.4% 和 14.0%, 超过 Cd 的 SQC-H 的采样点主要在衡阳和株洲附近. Guo 等^[55]研究表明湘江在株洲-长沙段沉积物 Cd 含量均值(范围)为 $64.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($35 \sim 113 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Cd 含量最小值都高于 Cd 的 SQC-H; Dong 等^[68]研究表明湘江霞湾港沉积物 Cd 含量达 $78.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是 Cd 的 SQC-H 的 3 倍; 可见湘江在株洲-长沙段 Cd 污染较严重. 沉积物中 Hg 含量小于 SQC-L、在 SQC-L 与 SQC-H 之间和大于 SQC-H 的点占总采样点比例分别为 23.3%、76.7% 和 0%. 可见湘江沉积物重金属含量小于 SQC-L 和大于 SQC-H 的采样点占全河段比例较低, 大部分河段沉积物 Cd 和 Hg 含量均在其相应的 SQC-L 和 SQC-H 之间.

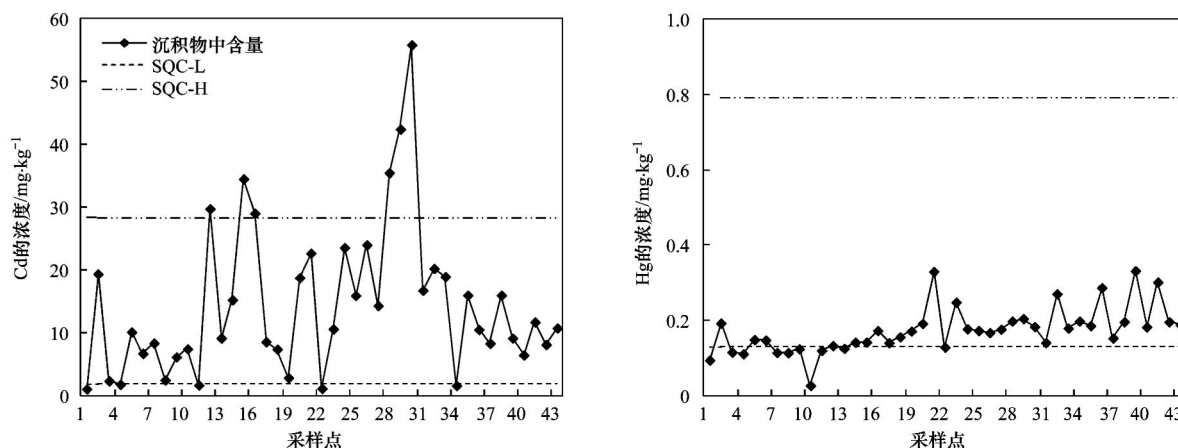


图 5 沉积物质量基准值与沉积物重金属总量比较

Fig. 5 Comparison of sediment quality criteria and total concentration of heavy metals in sediments

3 结论

(1) 湘江沉积物样品中 Cd 和 Hg 含量均值(范围)分别为 $14.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($1.06 \sim 55.81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 $0.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($0.03 \sim 0.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 均高于湘江沉积物背景值浓度, 但 Cd 超出背景值程度要高于 Hg.

(2) 综合相平衡法、加标毒理实验和背景值法, 制定了湘江沉积物重金属 Cd 和 Hg 初步基准值; 并与国内外基准值、底栖生物监测数据和植物监测数据对比分析; 确定湘江沉积物 Cd 和 Hg 的 SQC-L 分别为 $1.89 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, SQC-H 分别为 $28.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.79 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

(3) 将基准值与沉积物 Cd 和 Hg 含量相比较, 湘江沉积物 Cd 和 Hg 含量小于 SQC-L 的点占采样点比例分别为 11.6% 和 23.3%, Cd 和 Hg 含量在 SQC-L 和 SQC-H 之间的点占采样点比例分别为

74.4% 和 76.7%, Cd 和 Hg 含量大于 SQC-H 的点占采样点比例分别为 14.0% 和 0%.

参考文献:

- [1] 尚林源, 孙然好, 王赵明, 等. 海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 606-611.
- [2] 祝凌燕, 刘楠楠, 邓保乐. 基于相平衡分配法的水体沉积物中有机污染物质量基准的研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(10): 2574-2580.
- [3] Davutluoglu O I, Seckin G, Demet G, et al. Speciation and implications of heavy metal content in surface sediments of Akyatan Lagoon-Turkey[J]. Desalination, 2010, **260**(1-3): 199-210.
- [4] Davutluoglu O I, Seckin G, Ersu C B, et al. Heavy metal content and distribution in surface sediments of the Seyhan River, Turkey[J]. Journal of Environmental Management, 2011, **92**(9): 2250-2259.
- [5] 陈静生, 王飞越. 关于水体沉积物质量基准问题[J]. 环境化学, 1992, **11**(2): 60-70.
- [6] 盛菊江, 范德江, 杨东方, 等. 长江口及其邻近海域沉积物

- 重金属分布特征和环境质量评价[J]. 环境科学, 2008, **29** (9): 2405-2412.
- [7] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2000, **39**(1): 20-31.
- [8] 陈云增, 杨浩, 张振克, 等. 水体沉积物环境质量基准建立方法研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, **21**(1): 53-61.
- [9] Burton G A Jr. Sediment quality criteria in use around the world [J]. The Japanese Society of Limnology, 2002, **3**(2): 65-75.
- [10] Van Der Kooij L A, Van De Meent D, Van Leeuwen C J, *et al.* Deriving quality criteria for water and sediment from the results of aquatic toxicity tests and product standards: application of the equilibrium partitioning method[J]. Water Research, 1991, **25** (6): 697-705.
- [11] ANZECC&ARMCANZ. Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality. Volume 2, Section 8.4: Sediment quality guidelines [R]. Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand, Canberra, Australia, 2000.
- [12] Webster J, Ridhway I. The application of the equilibrium partitioning approach for establishing sediment quality criteria at two UK sea disposal and outfall sites [J]. Marine Pollution Bulletin, 1994, **28**(11): 653-661.
- [13] SFT. Guidelines for classification of environmental quality in fjords and coastal waters, Revision of classification of metals and organic contaminants in water and sediment [R]. Norwegian Pollution Control Authority SFT TA-2229/2007 (in Norwegian), 2007.
- [14] Bakke T, Källqvist T, Ruus A, *et al.* Development of sediment quality criteria in Norway [J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, **10**(2): 172-178.
- [15] Bakke T, Breedveld G, Källqvist T, *et al.* Guideline for risk assessment of contaminated sediment; in Norwegian [R]. Norwegian Pollution Control Authority SFT TA- 2230/2007, 2007.
- [16] Smith S L, MacDonald D D, Keenleyside K A, *et al.* A preliminary evaluation of sediment quality assessment values for freshwater ecosystems [J]. Journal of Great Lakes Research, 1996, **22**(3): 624-638.
- [17] Smith S L, MacDonald D D, Keenleyside K A, *et al.* The development and implementation of Canadian sediment quality guidelines [A]. In: Munarwar M, Dave G (Eds.). Development and progress in sediment quality assessment: rationale, challenges, techniques and strategies [M]. The Netherlands: SPB Academic Publishing, 1996. 233-249.
- [18] CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). Canadian environmental quality guidelines [R]. Winnipeg, Manitoba, 1999.
- [19] MacDonald D D. Approach to the assessment of sediment quality in Florida coastal waters, Vol. umn1-Development and evaluation of the sediment quality assessment guidelines [R]. Report prepared for Florida Department of Environmental Protection, Tallahassee, Florida, 1994.
- [20] MacDonald D D, Carr R S, Calder F D, *et al.* Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters [J]. Ecotoxicology, 1996, **5**(4): 253-278.
- [21] MacDonald D D, Ingersoll C G, Smorong D E, *et al.* Development and evaluation of numerical sediment quality assessment guidelines for Florida inland waters [R]. Technical Report, Florida Department of Environmental Protection, Tallahassee, 2003.
- [22] McCready S, Birch G F, Long E R, *et al.* An evaluation of Australian sediment quality guidelines [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2006, **50** (3): 306-315.
- [23] MacDonald M. Contaminated spoil management study, technical note 1.0. Sediment quality criteria [R]. Agreement CE 30/90, Report prepared for Hong Kong Government Environmental Protection Department by Mott MacDonald, Hong Kong Ltd. in association with Dredging Research Ltd, 1991.
- [24] Chapman P M, Allard P J, Vigers G A. Development of sediment quality values for Hong Kong special administrative region: a possible model for other jurisdictions [J]. Marine Pollution Bulletin, 1999, **38**(3): 161-169.
- [25] Simpson S L, Batley G E, Hamilton I L, *et al.* Guidelines for copper in sediments with varying properties [J]. Chemosphere, 2011, **85**(9): 1487-1495.
- [26] Strom D, Simpson S L, Batley G E, *et al.* The influence of sediment particle size and organic carbon on toxicity of copper to benthic invertebrates in oxic/suboxic surface sediments [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2011, **30**(7): 1599-1610.
- [27] 张曙光, 祁世莲, 赵玉仙, 等. 多泥沙河流水质评价标准研究 [J]. 人民黄河, 1996, (7): 29-33.
- [28] 霍文毅, 陈静生. 我国部分河流重金属水-固分配系数及在河流质量基准研究中的应用 [J]. 环境科学, 1997, **18**(4): 10-13.
- [29] 刘文新, 汤鸿霄. 河流沉积物重金属污染质量控制基准的研究 I. C-B-T 质量三合一方法 (Triad) [J]. 环境科学学报, 1999, **19**(2): 120-126.
- [30] 刘文新, 栾兆坤, 汤鸿霄. 河流沉积物重金属污染质量控制基准的研究 II. 相平衡分配方法 (EqP) [J]. 环境科学学报, 1999, **19**(3): 230-235.
- [31] 陈云增, 杨浩, 张振克, 等. 相平衡分配法在滇池沉积物环境质量评价中的应用研究 [J]. 环境科学学报, 2006, **26** (9): 1545-1552.
- [32] 方涛, 徐小清. 应用平衡分配法建立长江水系沉积物金属相对质量基准 [J]. 长江流域资源与环境, 2007, **16**(4): 525-531.
- [33] 祝凌燕, 邓保乐, 刘楠楠, 等. 应用相平衡分配法建立污染物的沉积物质量基准 [J]. 环境科学研究, 2009, **22**(7): 762-767.
- [34] 王立新, 陈静生, 刘华民. 应用生物效应数据库法建立沉积物重金属质量基准的初步研究——以渤海锦州湾海洋沉积

- 物为例[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2004, **35**(4): 467-472.
- [35] 曾北危, 潘佑民, 黄璋. 湘江沉积物污染初步评价[J]. 环境化学, 1982, **1**(5): 352-358.
- [36] 李军, 刘云国, 许中坚. 湘江长株潭段底泥重金属存在形态及生物有效性[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2009, **24**(1): 116-121.
- [37] 贺晶. 湘江中上游沉积物中重金属污染及潜在生态危害变化趋势研究[J]. 安全与环境工程, 2011, **18**(1): 33-37.
- [38] Yang Z F, Wang Y, Shen Z Y, *et al.* Distribution and speciation of heavy metals in sediments from the mainstream, tributaries, and lakes of the Yangtze River catchment of Wuhan, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **166**(2-3): 1186-1194.
- [39] Sun Y B, Zhou Q X, Xie X K, *et al.* Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **174**(1-3): 455-462.
- [40] Varol M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **195**: 355-364.
- [41] 陈瑞生, 黄兴斋, 黄玉凯. 底泥质量标准制定方法的探讨[A]. 见: 陈瑞生, 黄玉凯, 高兴斋. 河流重金属污染研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987. 523-535.
- [42] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, **51**(7): 844-851.
- [43] 林玉环, 郭明新, 庄岩. 底泥中酸性挥发硫及同步浸提金属的测定[J]. 环境科学学报, 1997, **17**(3): 353-358.
- [44] ASTM E 1706-05^{el}. Standard test method for measuring the toxicity of sediment-associated contaminants with freshwater invertebrates[S].
- [45] Long E R, MacDonald D D, Smith S L, *et al.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments [J]. Environmental Management, 1995, **19**(1): 81-97.
- [46] USEPA. Briefing report to the EPA science advisory board on the equilibrium partitioning approach to generating sediment quality criteria[R]. Washington DC: EPA-440-5-89-002, 1989.
- [47] Burton G A Jr. Sediment sampling and analysis plan-west branch Grand Calumet River; 1993 sediment toxicity test data summaries [R]. Washington DC: USEPA, 1993.
- [48] Chapman P M, Wang F Y, Adams W J, *et al.* Appropriate applications of sediment quality values for metals and metalloids [J]. Environmental Science and Technology, 1999, **33**(22): 3937-3941.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] USEPA. National recommended water quality criteria: 2002[S]. Office of water, Office of Science and Technology (4304T), EPA-822-R-02-047, November 2002.
- [52] 中国科学院环境科学委员会. 湘江污染综合防治研究报告[R]. 1984.
- [53] Zhang S, Dong W J, Zhang L C, *et al.* Geochemical characteristics of heavy metals in the Xiangjiang River, China [J]. Hydrobiologia, 1989, **176-177**(1): 253-262.
- [54] 唐晓燕, 彭渤, 余昌训, 等. 湘江沉积物重金属元素环境地球化学特征[J]. 云南地理环境研究, 2008, **20**(3): 26-32.
- [55] Guo Z H, Song J, Xiao X Y, *et al.* Spatial distribution and environmental characterization of sediment-associated metals from middle-downstream of Xiangjiang River, southern China [J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, **17**(1): 68-78.
- [56] 邓保乐, 祝凌燕, 刘慢, 等. 太湖和辽河沉积物重金属质量基准及生态风险评估[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(1): 33-42.
- [57] 常元勋. 金属毒理学[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2008, 66-70.
- [58] Newman M C, Unger M A. Fundamentals of ecotoxicology (2nd ed.) [M]. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [59] 王济川, 郭志刚. Logistic 回归模型——方法与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001, 6-11.
- [60] 汪铁丰. Probit 模型的发展和演变 [D]. 长春: 东北师范大学, 2008. 1-9.
- [61] Sae-Ma B, Meier P G, Landrum P F. Effect of extended storage time on the toxicity of sediment-associated cadmium on midge larvae (*Chironomus tentans*) [J]. Ecotoxicology, 1998, **7**(3): 133-139.
- [62] 郭永灿, 谢锦云, 欧德友, 等. 底泥镉、铅对草鱼、鲢鱼胚胎及仔鱼发育的影响[A]. 见: 陈瑞生, 黄玉凯, 高兴斋, 等. 河流重金属污染研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987. 287-306.
- [63] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [64] Persaud D, Jaagumagi R, Hayton A. Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario [R]. Water Resources Branch, Ontario Ministry of the Environment, Toronto, 1993.
- [65] Ingersoll C G, Haverland P S, Brunson E L, *et al.* Calculation and evaluation of sediment effect concentrations for the amphipod *Hyaella azteca* and the midge *Chironomus riparius* [J]. Journal of Great Lakes Research, 1996, **22**(3): 602-623.
- [66] 彭利, 罗钰, 朱奕, 等. 湘江长沙段沉积物重金属污染状况及潜在生态风险评估[J]. 环境研究与监测, 2009, **22**(3): 1-4.
- [67] 曾祥英, 王晨, 于志强, 等. 湘江岳阳段沉积物重金属污染特征及其初步生态风险评估[J]. 地球化学, 2012, **41**(1): 63-69.
- [68] Dong W J, Zhang L C, Zhang S. The research on the distribution and forms of heavy metals in the Xiangjiang River sediments[J]. Chinese Geographical Science, 1992, **2**(1): 42-55.

CONTENTS

Characteristics of Total Gaseous Mercury Concentrations at a Rural Site of Yangtze Delta, China	DOU Hong-ying, WANG Shu-xiao, WANG Long, <i>et al.</i> (1)
Compositions of Organic Acids in PM ₁₀ Emission Sources in Xiamen Urban Atmosphere	YANG Bing-yu, HUANG Xing-xing, ZHENG An, <i>et al.</i> (8)
Analysis on Water-soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol of Xinglong	LI Xing-ru, SONG Ai-li, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (15)
Effects of Gaseous Compositions the on Simultaneous Removal of NO _x and SO ₂ from Simulated Flue Gas by Ammonia Absorption	WANG Hong, ZHU Tian-le, WANG Mei-yan (21)
Comparing the Ammonia Volatilization Characteristic of Two Typical Paddy Soil with Total Wheat Straw Returning in Taihu Lake Region	WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (27)
Real-Time Analysis of Polyvinyl Chloride Thermal Decomposition/Combustion Products with Single Photon Ionization/Photoelectron Ionization Online Mass Spectrometer	CHEN Wen-dong, HOU Ke-yong, CHEN Ping, <i>et al.</i> (34)
Surface Characteristics of Alkali Modified Activated Carbon and the Adsorption Capacity of Methane	ZHANG Meng-zhu, LI Lin, LIU Jun-xin, <i>et al.</i> (39)
Distribution of Dimethylsulfoxide(DMSO) in the Surface Water of the Yellow Sea and the Bohai Sea	WANG Min, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (45)
Resolving Characteristic of CDOM by Excitation-Emission Matrix Spectroscopy Combined with Parallel Factor Analysis in the Seawater of Outer Yangtze Estuary in Autumn in 2010	YAN Li-hong, CHEN Xue-jun, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (51)
Estimation and Forecast of Chlorophyll a Concentration in Taihu Lake Based on Ensemble Square Root Filters	LI Yuan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (61)
Research of Hyperspectral Reconstruction Based on HJ1A-CCD Data	GUO Yu-long, LI Yun-mei, ZHU Li, <i>et al.</i> (69)
Research on the Sensitivity of Geochemical of Underground River in Chongqing Xueyu Cave	XU Shang-quan, YANG Ping-heng, YIN Jian-jun, <i>et al.</i> (77)
Bivariate Statistical Model for Calculating Phosphorus Input Loads to the River from Point and Nonpoint Sources	CHEN Ding-jiang, SUN Si-yang, JIA Ying-na, <i>et al.</i> (84)
Temporal and Spatial Variations of Total Nitrogen and Total Phosphorus in the Typical Reaches of Qinhuai River	LI Yue-fei, XIA Yong-qiu, LI Xiao-bo, <i>et al.</i> (91)
Derivation and Application of Sediment Quality Criteria of Cd and Hg for the Xiangjiang River	JIANG Bo-feng, SANG Lei-xin, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (98)
Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil of Relocation Areas from the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (108)
Concentrations of Soil Heavy Metals and Their Spatial Distribution in the Surrounding Area of Fenhe Reservoir	LI Jin-chang, ZHANG Hong, SHI Wei (116)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals of Groundwaters in the Irrigation District of the Lower Reaches of Yellow River	ZHANG Yan, LI Fa-dong, OUYANG Zhu, <i>et al.</i> (121)
Concentrations and Distribution of Organochlorine Pesticides in the Surface Sediments of Jiaozhou Bay, Taozi Bay and Sishili Bay	LIU Yi-kai, ZHONG Guang-cai, TANG Jian-hui, <i>et al.</i> (129)
Choice of Macroinvertebrate Metrics for Constructing a Benthic-Index of Biotic Integrity Based on the Disturbance Gradients in the Qinjiang River Basin	LU Dong-qi, ZHANG Yong, CAI De-suo, <i>et al.</i> (137)
Isolation and Identification of <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 and Its Allelopathy on <i>Skeletonema costatum</i>	WANG Hong-bin, CHEN Wen-hui, LI Xin-shu, <i>et al.</i> (145)
Effects of the Rice Straw on <i>Microcystis aeruginosa</i> Analyzed by Different Physiological Parameters	SU Wen, KONG Fan-xiang, YU Yang, <i>et al.</i> (150)
Effects of Allelochemicals Ethyl Cinnamate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	GAO Li-li, GUO Pei-yong, SU Guang-ming, <i>et al.</i> (156)
Hydraulic Simulation and Safety Assessment of Secondary Water Supply System with Anti-Negative Pressure Facility	WANG Huan-huan, LIU Shu-ming, JIANG Shuai, <i>et al.</i> (163)
Effect of Relative Molecular Mass Distribution and Hydrophilicity/Hydrophobicity of NOM on Membrane Fouling in MF-combined Process	HU Meng-liu, LIN Jie, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (169)
Effect of Permeabilization on Sulfate Reduction Activity of <i>Desulfovibrio vulgaris</i> Hildenborough Cells in the Presence of Different Electron Donors	XU Hui-wei, ZHANG Xu, LI Li-ming, <i>et al.</i> (177)
Dechlorination of HCB by Bimetals Based on Zero Valent Iron	ZENG Xian-wei, LIU Jian-guo, NIE Xiao-qin (182)
Study on Kinetics of Photoelectrocatalytic Degradation of Supported TiO ₂ on Malachite Green	ZHANG Xiao-na, ZHOU Shao-qi, ZHOU Xiao (188)
Measurement and Analysis of Micropore Aeration System's Oxygenating Ability Under Operation Condition in Waste Water Treatment Plant	WU Yuan-yuan, ZHOU Xiao-hong, SHI Han-chang, <i>et al.</i> (194)
Influence of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge	LIU Chun, MA Jin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (198)
Impact of Different Nitrogen Concentrations on the N ₂ O Production in the Denitrification Process of Granular Sludge	HAN Xue, GAO Da-wen (204)
Effect of Simulated Heavy Metal Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	XIE Xin-yuan, SUN Pei-de, LOU Ju-qing, <i>et al.</i> (209)
Characteristic and Ion Exchanges During Cu ²⁺ and Cd ²⁺ Biosorption by <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	BAI Jie-qiong, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (217)
Sorption of Nitrobenzene to Anionic Surfactant Modified Layered Double Hydroxides	XIA Yan, ZHU Run-liang, TAO Qi, <i>et al.</i> (226)
Study on Phosphate Removal and Recovery by Activated Alumina	MENG Wen-na, XIE Jie, WU De-yi, <i>et al.</i> (231)
Spatial Distribution of Inhalable Particulate and Association with Respiratory Disease in Beijing City	YANG Wei, ZHAO Wen-ji, GONG Zhao-ning, <i>et al.</i> (237)
Pollution Levels of Perfluorochlorinated Chemicals in Chicken Eggs and Duck Eggs from the Markets in Beijing	QI Yan-jie, ZHOU Zhen, SHI Ya-li, <i>et al.</i> (244)
Residual Levels of Pesticides in Freshwater Fish from Beijing Aquatic Product Markets and Health Risk Assessment	YU Zhi-yong, JIN Fen, SUN Jing-fang, <i>et al.</i> (251)
Characterizing the Toxicity Interaction of the Binary Mixture Between DMSO and Pesticide by the Multi-Effect Residual Analysis (MERA)	HUO Xiang-chen, LIU Shu-shen, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (257)
Isolation of Quinolizidine- <i>p</i> -ethyl-degrading Bacteria from Soil by DGGE-Colony <i>in situ</i> Hybridization	LÜ Xin, PENG Xia-wei, HU Qing, <i>et al.</i> (263)
White-Rot Fungi Combinations Impact on Enzyme Productions	MENG Yao, LIANG Hong, GAO Da-wen (271)
Effects of Different Fertilizer Application on Soil Active Organic Carbon	ZHANG Rui, ZHANG Gui-long, JI Yan-yan, <i>et al.</i> (277)
Effect of Reclamation on the Vertical Distribution of SOC and Retention of DOC	HUO Li-li, ZOU Yuan-chun, GUO Jia-wei, <i>et al.</i> (283)
Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Composition in <i>Suaeda salsa</i> Wetland in the Yellow River Delta	DONG Hong-fang, YU Jun-bao, GUAN Bo (288)
Study the Restoration Technology of Concentrated Application-Natural Diffusion about Amendments of Acidified Soil of Hilly Woodland	FANG Xiong, LIU Ju-xiu, YIN Guang-cai, <i>et al.</i> (293)
Optimizing Remediation Conditions of Non-thermal Plasma for DDTs Heavily Contaminated Soil	CHEN Hai-hong, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (302)
Chemical Extraction of Arsenic Co-precipitated with Amorphous Fe(OH) ₃ and Fe ₃ O ₄	CHEN Yi-ping, WANG Shao-feng, JIA Yong-feng (308)
Influence of Aluminum and Manganese on the Growth, Nutrient Uptake and the Efflux by Ectomycorrhizal Fungi	LI Hua, HUANG Jian-guo, YUAN Ling (315)
High-solids Anaerobic Co-digestion of Sludge and Kitchen Garbage Under Mesophilic Conditions	DUAN Ni-na, DONG Bin, LI Jiang-hua, <i>et al.</i> (321)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of High Surface Area Biomass-based Activated Carbons	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (328)
Study on Strategies of Pollution Prevention in Coastal City of Zhejiang Province Based on Scenario Analysis	TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (336)
Advance in the Bioavailability Monitoring of Heavy Metal Based on Microbial Whole-cell Sensor	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xiu-liang, <i>et al.</i> (347)
Characteristics of Heavy Metal Contamination in Street Dusts Along the Urban-Rural Gradient Around Beijing	HE Xiao-yan, GU Pei, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (357)
Content Trends of Pollutants in Street Dust of Beijing Along the Urban-Rural Gradient and Road Density Gradient	TANG Rong-li, MA Ke-ming, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (364)
Analysis of First Flush Effect of Typical Underlying Surface Runoff in Beijing Urban City	REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (373)
Temporal Variation of Water Quality and Driving Factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou	PANG Bo, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (379)
Research on Carbon Reduction Potential of Electric Vehicles for Low-Carbon Transportation and Its Influencing Factors	SHI Xiao-qing, LI Xiao-nuo, YANG Jian-xin (385)
Investigation of Waste Classification and Collection Actual Effect and the Study of Long Acting Management in the Community of Beijing	DENG Jun, XU Wan-ying, ZHOU Chuan-bin (395)
Problems and Countermeasures in the Application of Constructed Wetlands	HUANG Jin-lou, CHEN Qin, XU Lian-huang (401)

《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)

2013年1月15日 34卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 1 Jan. 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人