

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

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

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序	陈卫平 (4069)
再生水灌溉利用的生态风险研究进展	陈卫平, 张炜铃, 潘能, 焦文涛 (4070)
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究	潘能, 侯振安, 陈卫平, 焦文涛, 彭驰, 刘文 (4081)
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析	潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安 (4088)
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4094)
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4100)
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4108)
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4115)
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟	王美娥, 陈卫平, 焦文涛 (4121)
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究	王巧环, 陈卫平, 王效科, 任玉芬, 张烨 (4127)
北京市再生水的公众认知度评估	张炜铃, 陈卫平, 焦文涛 (4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究	陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 高扬, 黄梦宇 (4141)
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染源研究	王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华, 楼晟荣, 乔利平 (4151)
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究	张军科, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (4159)
区域大气环境风险源识别与危险性评估	张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛 (4167)
稻草烟中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素	刘刚, 孙丽娜, 李久海, 徐慧 (4173)
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性	胡志远, 李金, 谭丕强, 楼狄明 (4181)
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应	隆茜, 周菊珍, 孟颖, 达良俊 (4188)
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征	杨平, 仝川, 何清华, 黄佳芳 (4194)
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响	刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅 (4205)
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异	孔祥胜, 祁士华, 孙蓓, 黄保健 (4212)
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究	马万里, 刘丽艳, 齐虹, 白杨, 沈吉敏, 陈忠林, 李一凡 (4220)
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源	周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 吕金刚, 许世远, 潘琪 (4226)
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源	周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 王璐, 许世远, 潘琪 (4237)
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估	武江越, 刘征涛, 周俊丽, 高富 (4244)
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究	裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华 (4251)
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征	刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田 (4256)
太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析	廖小平, 张彩香, 赵旭, 向青清, 李佳乐 (4263)
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价	吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 周婕成, 韩景超 (4270)
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 贺蓓 (4276)
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究	张伟, 张洪, 单保庆 (4284)
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征	秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟 (4291)
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征	朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 王培震, 张建龙, 张宁宁, 辛惠娟 (4300)
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究	周露洪, 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 高华梅, 孙明波 (4307)
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究	沈清清, 彭谦, 赖泳红, 纪开燕, 韩秀林 (4316)
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为	肖萍, 肖峰, 赵锦辉, 秦潼, 王东升, 冯金荣, 许光 (4322)
水体中甲基汞光化学降解特征研究	孙荣国, 毛雯, 马明, 张成, 王定勇 (4329)
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究	李时银, 李小荣, 朱怡苹, 朱江鹏, 王国祥 (4335)
酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究	陈超, 赵倩, 封莉, 张立秋 (4340)
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究	王夏琳, 李睿华 (4346)
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究	郭磊, 贾永刚, 付腾飞, 刘晓磊, 赵战坤 (4352)
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究	谢杰, 王哲, 吴德意, 李春杰 (4361)
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测	季军远, 邢雅娟, 郑平 (4367)
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究	王振, 刘超翔, 李鹏宇, 董健, 刘琳, 朱葛夫 (4373)
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氮水处理	庆承松, 鲍韬, 陈天虎, 陈冬, 谢晶晶 (4380)
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究	钟晨宇, 叶杰旭, 李若愚, 陈胜, 孙德智 (4387)
水平电场作用下活性污泥的脱水研究	季雪元, 王毅力, 冯晶 (4393)
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响	宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋 (4400)
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究	陈广银, 郑正, 常志州, 王海芹, 叶小梅 (4406)
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为	王兴润, 农泽喜, 王琪 (4412)
国家大气污染物排放标准体系研究	江梅, 张国宁, 张明慧, 邹兰, 魏玉霞, 任春 (4417)
环境基准向环境标准转化的机制探讨	毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙 (4422)
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析	傅国伟 (4428)
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录	(4434)
《环境科学》征订启事(4099)	
《环境科学》征稿简则(4166)	信息(4180, 4219, 4225, 4275)
编辑征稿通知(4172)	

近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价

李瑞利¹, 柴民伟², 邱国玉^{1*}, 贺蓓¹

(1. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055; 2. 南开大学生命科学学院, 天津 300071)

摘要: 海湾地区沉积物在输运和沉积过程中记录了人类活动的信息。对深圳湾红树林湿地柱状沉积物进行测年分析结果表明, 该地区沉积物沉积速率为 $1.38 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。沉积物容重、pH、电导率和总有机碳 (TOC) 在整个剖面的变化范围分别为 $0.36 \sim 0.71 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $6 \sim 7$ 、 $2.93 \times 10^3 \sim 4.97 \times 10^3 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 和 $1.5\% \sim 3.8\%$ 。随着沉积物剖面深度的增加, 沉积物容重和电导率逐渐升高, TOC 逐渐降低, pH 变化不明显。沉积物中 Hg 和 Cu 含量在整个剖面的变化范围分别为 $92 \sim 196 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $29 \sim 83 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 两者在 14 cm 以上表现为逐渐升高的趋势, 再往下又逐渐降低。沉积物 Hg 和 Cu 的生态危害系数随沉积物剖面深度的增加, 均呈现先增加后降低的变化趋势, 在 14 cm 深度处达到最大, 分别为 39.10 和 13.85。Hakanson 潜在生态风险评价表明, Hg 和 Cu 的生态危害系数均属于低潜在生态危害。1960~1985 年间, 香港经济的快速发展, 以及 1985~2000 年间深圳经济的快速崛起对深圳湾红树林湿地沉积物的 Hg 和 Cu 污染积累及生态危害有显著贡献。2000 年后, 一系列环保措施的实施降低了红树林湿地沉积物的 Hg 和 Cu 含量, 改善了红树林的环境生态状况。深圳湾重金属含量及潜在生态危害较好地反映了深圳湾周边地区及流域内的人类活动对深圳红树林湿地沉积物重金属污染的影响过程和程度。

关键词: 红树林; 沉积物; 重金属积累; 生态危害; 深圳湾

中图分类号: X144; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4276-08

Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China

LI Rui-li¹, CHAI Min-wei², QIU Guo-yu¹, HE Bei¹

(1. School of Environment and Energy, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China; 2. College of Life Sciences, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The processes of sediment transport and deposition can record some relative anthropogenic information in gulf region. Chronological analysis of the sediment core collected from mangrove wetland in Shenzhen Bay showed that the sedimentation rate was about $1.38 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$. Soil bulk density, pH, electrical conductivity (EC) and total organic carbon (TOC) changed in range of $0.36 \sim 0.71 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $6 \sim 7$, $2.93 \times 10^3 \sim 4.97 \times 10^3 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, and $1.5\% \sim 3.8\%$, respectively. With the increase of soil depth, the soil bulk density and EC increased gradually. However, the TOC decreased, with no significant change of pH. Contents of Hg and Cu in the whole depth of core ranged between $92 \sim 196 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ and $29 \sim 83 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. And both of them in sediment increased firstly and then decreased with the increasing soil depth. At 14 cm depth, contents of Hg and Cu reached up to the highest levels. Correspondingly, the ecological risk of Hg and Cu changed similarly with the contents of Hg and Cu. At 14 cm depth, the ecological risk indexes of Hg and Cu were at the highest levels of 39.10 and 13.85, respectively. The potential ecological risks of both Hg and Cu in sediments were mild. The rapid economical development of Hong Kong in 1960-1985 and Shenzhen in 1985-2000 contributed much to the Hg and Cu accumulation in mangrove wetland of Shenzhen Bay, China. Since the year of 2000, the reduction in contents of Hg and Cu has been expected as a consequence of the adoption of contamination control policies, improving the environment for growth of mangrove. In conclusion, the variations of core sediment heavy metal contents and its ecological risk assessment along the vertical profile reveal the interaction processes and extent of anthropogenic influences from the areas around the Shenzhen Bay and the catchments.

Key words: mangrove; sediments; heavy metal accumulation; ecological risk; Shenzhen Bay

红树林是分布于热带与亚热带海岸潮间带的木本植物群落^[1], 为林区动物和微生物提供营养与食物, 为鸟类、鱼虾和昆虫等提供繁衍、栖息场所, 蕴含着丰富的生物资源, 是维护海岸生态平衡的特殊生态系统^[2,3]。红树林能够接受来自潮汐、河水以

收稿日期: 2012-02-17; 修订日期: 2012-07-02

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (20100480140); 中国博士后科学基金特别项目 (201104025)

作者简介: 李瑞利 (1981~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为湿地生态学, E-mail: liruli@pku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: qiyu@pku.edu.cn

及暴雨产生的径流等所携带的重金属污染物,成为人类产生的很多污染物(如高营养盐、重金属和持久性的有机污染物)理想的吸收和储存场所^[4~7]. 红树林对废水具有较大的净化能力^[8],对重金属有一定的耐受性,但高浓度的重金属污染物会对红树植物产生较大的毒害作用^[9,10]. 近年来,随着海岸带和海岛经济的快速发展,排入附近海域的污染物对海洋生态环境产生严重的危害,使得红树林湿地面积快速缩减. 其中,重金属污染物对底栖生物或依靠沉积物生存的生物产生直接的毒害作用,并通过食物链富集和传递,最终对人类健康造成影响^[11].

深圳湾福田红树林保护区属国家级自然保护区的湿地生态系统,是我国城市中心区内唯一的红树林生态湿地. 保护区所在的深圳湾,是深圳和部分香港水污染源的集纳区,其中有几股城市污水直接排进保护区内,这使福田红树林湿地有别于其它受人类干扰较小的红树林湿地. 研究发现,城市污水的直接排放,导致了深圳红树林表层土壤 Fe、Cu 和 Pb 含量高于福建九江口秋茄红树林和广西英罗湾红树林的表层土壤^[12]. 自 20 世纪中叶以来,随着香港、深圳和珠江地区经济的快速发展,排入深圳湾的污染物,尤其是电子工业产生的废水降低了该海域的环境质量,并对该地区的红树林湿地的生态安全产生了较大的冲击和影响^[13,14].

目前有关深圳红树林重金属污染的研究主要着眼于红树林群落的重金属分布规律及积累循环特征^[12,15,16],然而对深圳湾红树林湿地沉积物沉积速率特征,重金属污染的空间分布及历史演化过程的研究鲜有报道. 为了更好地为深圳湾红树林的保护和可持续利用提供科学依据,本研究在深圳福田红树林保护区选择典型重金属(Hg 和 Cu)为对象,分析了深圳福田红树林湿地沉积物中重金属含量及其时空分布特征,并结合²¹⁰Pb的测年资料,探讨了深圳湾沉积物中重金属污染的历史记录、累积特征和影响因素,评估了重金属污染对深圳福田红树林的潜在生态危害.

1 研究区概况

研究地点位于广东内伶仃福田国家级自然保护区的实验区(图 1). 该区位于深圳湾东北部(东经 113°45',北纬 22°32'),与香港米埔红树林隔海相望,为一长 11 km 的弧形滨海滩地,总面积 304 hm². 红树林带从海岸往外海 100~400 m 宽. 福田红树

林是少见的大都市域内自然保护区,深受人类活动的影响. 该区属亚热带季风气候,年平均气温 22℃,最冷月平均气温 14.1℃(1 月),极端最低温 0.2℃(1 月),极端最高温 38.7℃(7 月),年平均降水量 1 927 mm,年均相对湿度 79%. 土壤淤泥质,海水 pH 值为 7.23~8.05,海水盐度平均为 15‰. 主要红树植物种类是秋茄、白骨壤、桐花树、老鼠簕、海漆、木榄、黄槿,其中桐花树、白骨壤和秋茄是优势种.

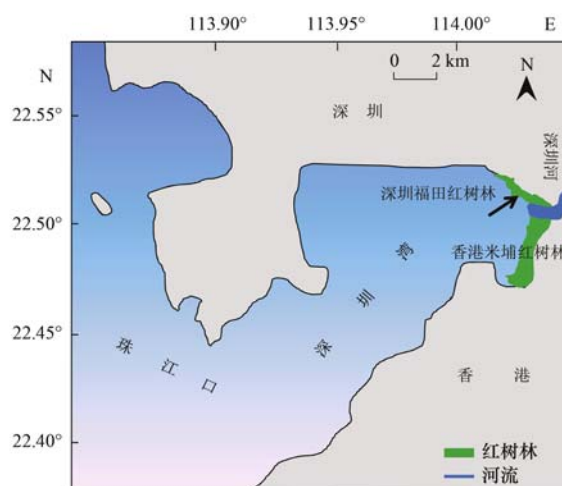


图 1 深圳湾红树林湿地沉积物采样点示意

Fig. 1 Map of sampling sites in the mangrove of the Shenzhen Bay

2 材料与方法

2.1 样品采集

2011 年 7 月 26 日在深圳湾红树林湿地采集 3 个 1 m 深的沉积柱样,柱状样采集利用内径为 7.5 cm 的 PVC 管用人工直接按入地下,柱状样在运回室内后取出样品,在进行岩性、沉积构造描述后,以 2 cm 间隔进行分样,共获得 150 个沉积物样品. 量取一定体积的沉积物湿样并称量其重量,然后在烘箱中低温烘干至恒重. 将烘干土样用研钵研磨后过 150 目尼龙筛. 沉积物的容重测定采用烘干法^[17], pH 值用 pH 计测定(水土比为 1:1.25),盐度采用电导法测定(水土比为 1:5). 总有机碳含量(TOC)采用元素分析仪测定(Elementar,德国).

2.2 ²¹⁰Pb测年分析

沉积物沉积年代测定采用²¹⁰Pb测年分析^[18,19]. 在实验室将土样风干、研磨,应用²⁰⁸Po作为示踪剂,采用 B-1221 型 4096 道 α 谱仪(能量分辨率约为 35~50 keV) α 放射性测量来完成²¹⁰Pb放射性活性测定^[20]. 通过测量沉积物不同深度的²¹⁰Pb放射性活

度,扣除本底值后得到 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$,根据 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 估算沉积物的沉积速率 $^{[21]}$.根据 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的垂向变化过程,利用下式计算出沉积速率: $R = \lambda/b$,式中, R 为沉积速率($\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$), λ 为 ^{210}Pb 衰变常数($0.031\,14\,\text{a}^{-1}$), b 为 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 取自然对数后与深度之间线性拟合直线的斜率.假定沉积速率在所研究的时间范围内恒定不变,经过简单换算即可得到沉积物的沉积速率和年龄.沉积通量 $[\text{g}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{a})^{-1}]$ 是单位时间内单位面积上形成的堆积物质量,由沉积速率乘以沉积物的干密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$).沉积物干密度测定方法为沉积物烘干后所得的干重除以湿样体积 $^{[22]}$.

2.3 沉积物重金属含量及其潜在生态危害评价

采用浓硝酸+浓硫酸+高锰酸钾消解沉积物样品,用F7322V智能型冷原子吸收测汞仪测定总Hg含量 $^{[23]}$.沉积物土样经盐酸+高氯酸+硝酸消解后,利用原子吸收测定Cu含量,同样的方法测定标准和空白.每个样品3个平行样,取平均值.采用加标回收的方法进行质量控制,测定标准土样结果显示Hg和Cu平均回收率在85.3%~110%之间.所用化学试剂硝酸、盐酸和硫酸为优级纯,其它均为分析纯,水为超纯水.

沉积物重金属潜在生态危害评价采用国内外具有较大影响和广泛使用的Hakanson潜在生态危害指数法 $^{[24]}$,其计算方法如下

某种重金属的潜在生态危害系数 E_r^i 值:

$$E_r^i = T_r^i \cdot c_f^i = T_r^i \cdot c_s^i / c_n^i$$

式中, T_r^i 为重金属 i 的毒性系数,反映的是重金属 i 的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度; c_f^i 为重金属 i 的富集系数, c_s^i 为重金属 i 的实测值, c_n^i 为重金属 i 计算所需的参考值.重金属污染潜在生态危害分级亦按Hakanson的标准 $^{[24]}$: $E_r^i < 40$ 为低潜在生态危害, $40 \leq E_r^i < 80$ 为轻度潜在生态危害, $80 \leq E_r^i < 160$ 为中度潜在生态危害, $160 \leq E_r^i < 320$ 为重度潜在生态危害, $E_r^i \geq 320$ 为极重度潜在生态危害.参照已有相关研究 $^{[25,26]}$,获得本研究中2种重金属Hg和Cu的毒性系数分别为40和5,重金属计算所需的参考值选择中国海岸带背景值 $^{[14]}$,分别为0.2和30.

3 结果与分析

3.1 深圳湾红树林湿地沉积物特征

图2(a)显示深圳湾红树林湿地沉积物剖面的容重变化范围为0.36~0.71 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,表现为由表向下

逐渐升高的趋势.在60 cm深度处,沉积物容重达到最大,为0.71 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.沉积物的pH稳定在6~7之间[图2(b)],而且由表向底表现为先减小,然后恢复增长.在10 cm深度,沉积物pH值降到最小为6.2.沉积物的电导率在 $2.93 \times 10^3 \sim 4.97 \times 10^3 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间变化.随着剖面深度的增加,呈现出先增长,然后逐渐降低的变化趋势[图2(c)].在34 cm深度处,电导率达到最大,为 $4.97 \times 10^3 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.总有机碳含量(TOC)随着沉积物深度的增加而逐渐降低,在22 cm处偏高,为3.2% [图2(d)].

3.2 深圳湾红树林湿地沉积物的沉积速率与沉积通量

从图3可以看出,沉积物 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 强度在沉积物剖面中表现为由表向下逐渐降低的趋势.对沉积物 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 与剖面深度之间进行相关分析,发现 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 与剖面深度之间具有一定的相关性,根据该回归系数计算得到沉积速率为1.38 $\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$,由此计算出底层沉积物的沉积年龄约45年.沉积物的沉积通量的范围为0.49~0.94 $\text{g}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{a})^{-1}$,随着剖面深度的增加而上升(图4).在58 cm深度处,沉积物的沉积通量最大,为0.94 $\text{g}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{a})^{-1}$.

3.3 深圳湾红树林湿地Hg和Cu含量的垂直分布格局

深圳湾红树林湿地沉积物Hg和Cu含量的垂直分布如图5所示.沉积物Hg含量在整个剖面上均小于Cu含量,两者的变化范围分别为92~196 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和29~83 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$.沉积物中的Hg和Cu含量在14 cm以上表现为逐渐升高的趋势,再往下又逐渐降低(图5).在14 cm深度,沉积物Hg和Cu含量达到最大,分别为196 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和83 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$.在34 cm深度处,沉积物Hg含量略偏高,为155 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$.在1970~2000年之间,深圳湾红树林湿地沉积物中Hg和Cu的含量均逐渐增加,在2000年达到最大.在1985年,沉积物的Hg含量略偏高.2000年以后,Hg和Cu含量表现为逐渐降低.

3.4 深圳湾红树林湿地Hg和Cu潜在生态危害的历史变化

深圳湾红树林湿地沉积物Hg和Cu生态危害系数的计算结果表明(图6),沉积物Hg的生态危害系数在整个剖面上均大于Cu的生态危害系数,两者变化范围分别为18.39~39.10和4.77~13.85.随着剖面深度的增加,沉积物Hg和Cu的生态危害系数均表现先增长,然后下降的变化趋势.在14 cm深度处,Hg和Cu的生态危害系数达到最大,分别为39.10和

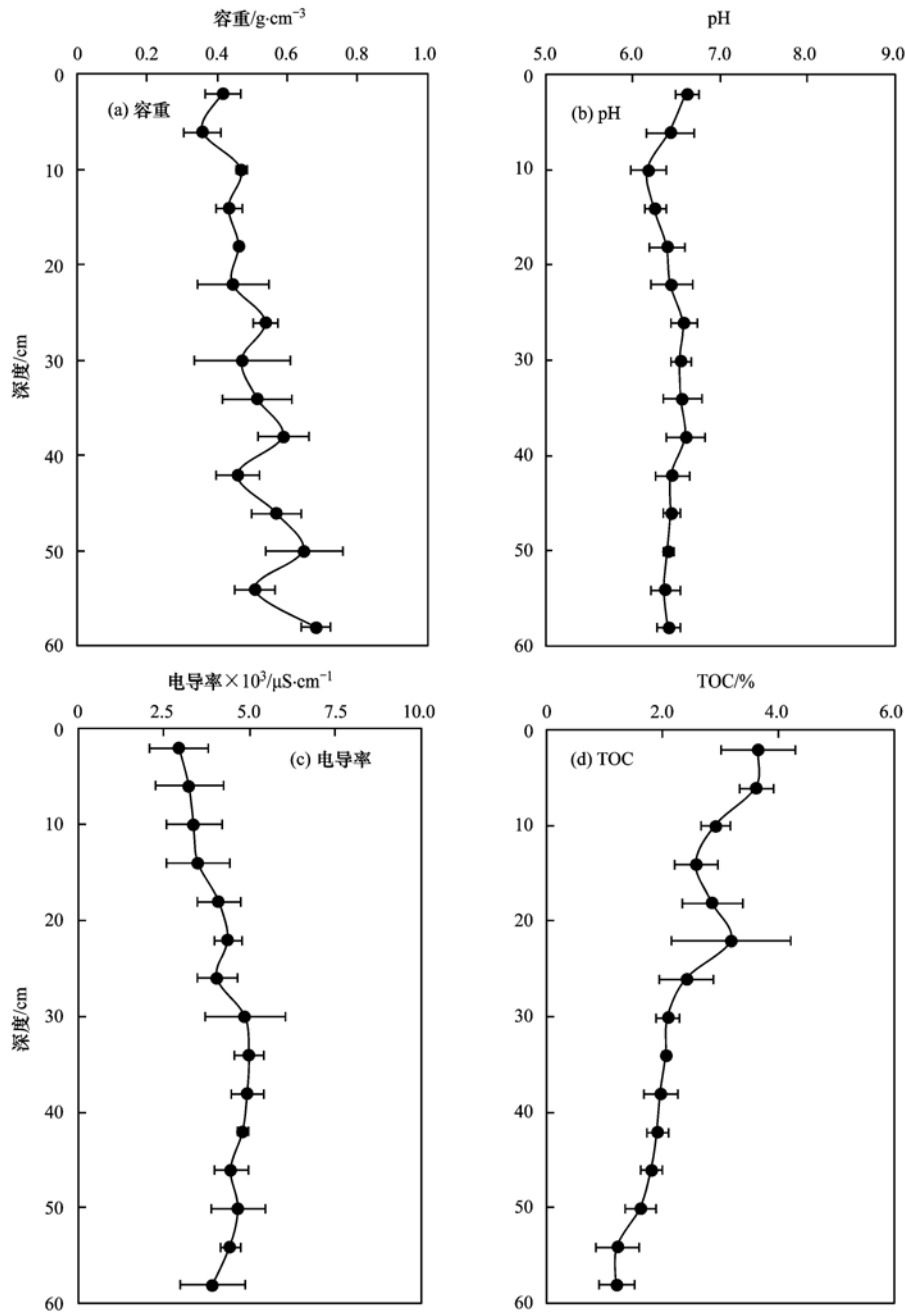


图 2 深圳湾红树林湿地沉积物容重、pH、电导率及 TOC

Fig. 2 Soil bulk density, pH and electrical conductivity in sediment core

13.85. 在 34 cm 深度处,沉积物 Hg 的生态危害系数略偏高,为 30.96. 在 1970 ~ 2000 年之间,沉积物 Hg 和 Cu 的生态危害系数呈现逐年增长的趋势. 在 1985 年,沉积物 Hg 的生态危害系数略偏高. 在 2000 年以后,沉积物 Hg 的生态危害系数先降低,然后略上升;沉积物 Cu 的生态危害系数逐年降低.

4 讨论

作为海洋沉积学研究的一个重要指标,沉积速率综合体现了沉积过程和环境变化特征,对深入理

解陆架边缘海沉积物的“源-汇”作用、提取沉积记录的环境信息,解释沉积动力机制等具有重要意义^[27]. ²¹⁰Pb测年得到的是某个时段的平均沉积速率. 目前,已有关于中国部分海区沉积速率的相关研究,包括黄海,渤海,东海和伶仃洋^[28~31]. 本研究中,如果将整个剖面作为一个计算时段,则深圳红树林湿地近几十年的平均沉积速率为 1.38 $\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$,由此计算出底层沉积物的沉积年龄约 45 年. 由于缺乏深圳湾红树林湿地沉积速率的资料,无法对比本研究测试数据的可靠性. 珠江口淇澳岛

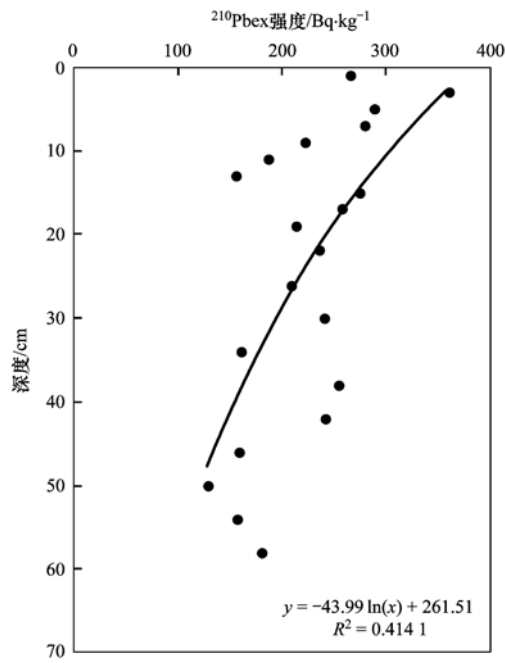


图 3 深圳湾红树林湿地沉积物²¹⁰Pb比活度剖面分布
Fig. 3 Depth-distribution of ²¹⁰Pbex activity in sediment core

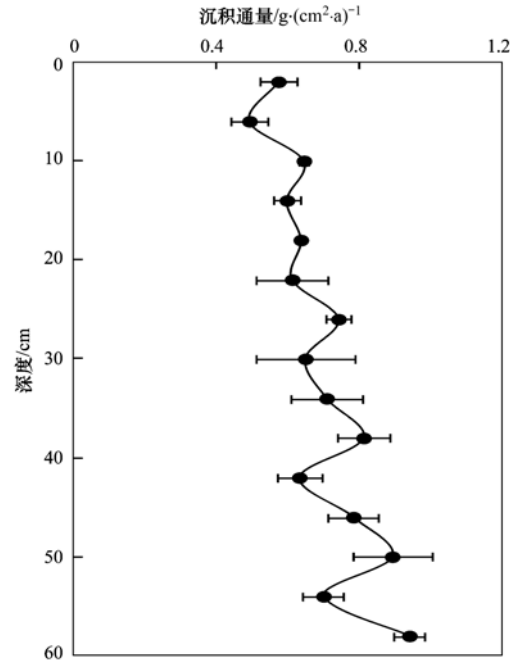


图 4 深圳湾红树林湿地沉积物沉积通量剖面分布
Fig. 4 Depth-distribution of sedimentary flux in sediment core

滨海湿地沉积物的平均沉积速率为 $1.68 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ ，其中 59 cm 以上的沉积速率为 $4.15 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ ，59 cm 以下的沉积速率为 $0.97 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ [19]。浙江近岸浅海沉积速率为 $0.91 \sim 1.19 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ [32]。伶仃洋 0 m 等深线以深海域近 50 年的平均沉积速率为 $1.57 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ [31]。这些结果与本研究计算得到的近 50 年

的平均沉积速率相一致，说明本研究测年结果可信度较高。沉积物的沉积速率表现出由表向下逐渐减小的趋势，是与近 50 年的地区开发和经济发展活动密切相关。沉积通量随着沉积物深度的增加显示逐渐增大的趋势，与沉积速率变化不一致，说明在近 50 年的红树林湿地沉积物沉积过程中，最初沉积的

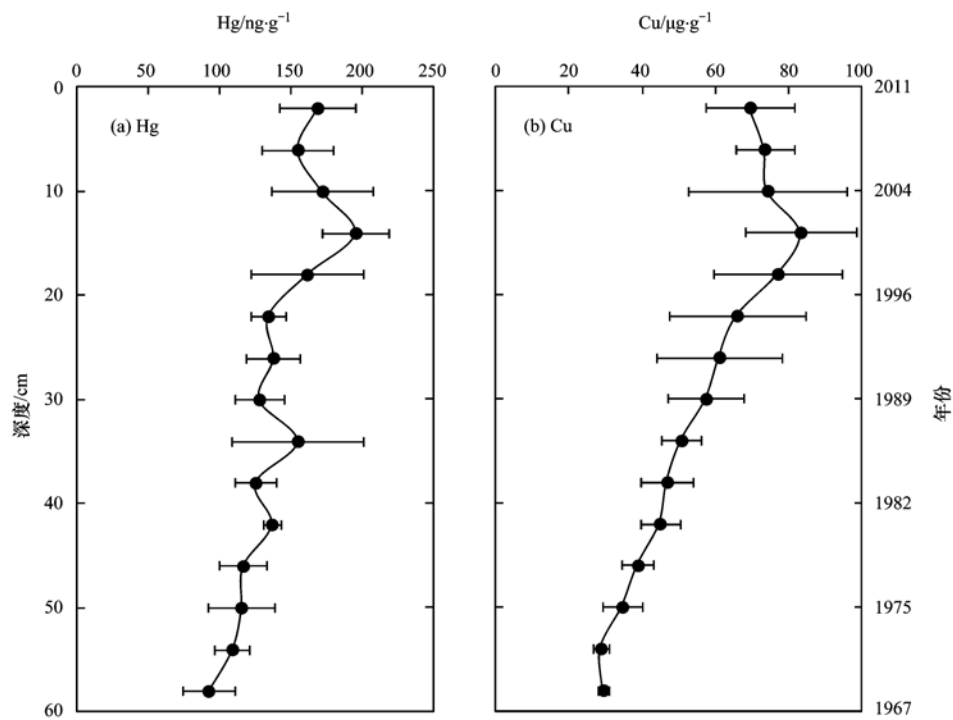


图 5 深圳湾红树林湿地沉积物 Hg 和 Cu 含量的剖面分布
Fig. 5 Depth-distribution of Hg and Cu contents in sediment core

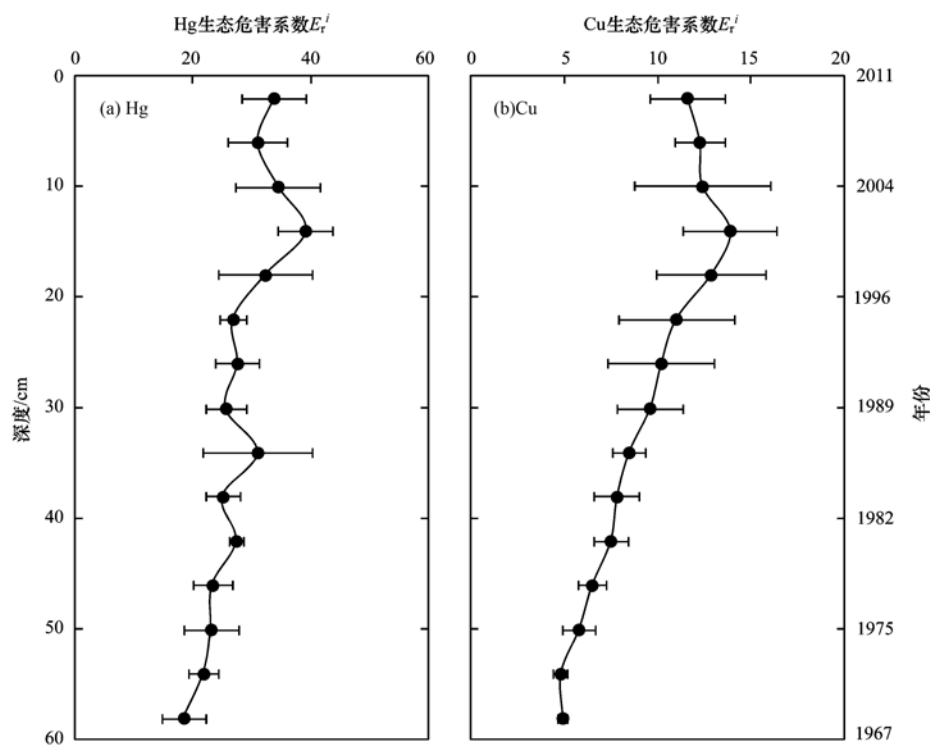


图 6 深圳湾红树林湿地沉积物 Hg 和 Cu 生态危害系数的剖面分布

Fig. 6 Depth-distribution of Hg and Cu ecological risk factors in sediment core

是密度较大的陆源物质, 然后开始沉积密度较低的陆源物质.

土壤容重与土壤的水、热状况密切相关, 不仅反映出有机质含量高低和土壤的结构状况, 也是湿地土壤池水蓄水性能的重要指标之一^[33]. 在近 50 年中, 深圳湾红树林湿地沉积物的容重随着深度增加而逐渐增大, 这可能是因为潮汐作用会改善表层土壤的通气状况, 有利于土壤动物和好氧微生物的活动, 使土壤孔隙度增大, 容重较小. 红树林沉积物中的有机质主要来自红树林地上部分凋落物和地下根的死亡分解等过程. 在整个沉积物剖面中, 随着深度的增加, 沉积物容重与 TOC 含量分别呈现逐渐增大和减小的趋势, 说明沉积物表层较小的土壤容重可能与红树林沉积物表层较高的土壤有机质含量有关. 土壤 pH 和电导率对各种环境因素的综合影响非常敏感, 是评价外界环境对土壤影响的重要指标^[34]. 土壤 pH 常用来表示土壤的酸碱性, 而土壤电导率与土壤全盐含量显著相关. 本研究中, 沉积物 pH 在整个剖面中变化较小, 并且均小于 7, 属偏酸性沉积物. 表层沉积物的电导率偏低, 这可能是因为近年来工农业生产用水量增加, 向红树林湿地排放的水量增大, 在一定程度上稀释了沉积物中的盐分, 降低了沉积物电导率.

Hg 和 Cu 是比较常见的重金属污染物. Hg 及其化合物都具有很强的毒性, 并且可以富集并长期存在于环境和生物体内. 无机汞可以转化为甲基汞, 甲基汞具有亲脂性、生物积累效应和生物放大效应, 能够通过食物链而进入人体, 严重危害人类健康^[6]. Cu 是植物必需的营养元素, 但过量的 Cu^{2+} 会对植物造成不同程度的毒害, 甚至引起植物的死亡, 而且植物体内大量的 Cu^{2+} 可以通过食物链在动物、人体内积累, 造成人或动物的蓄积性中毒, 危害动物和人类的健康^[35]. 为了了解红树林沉积物中的有机质对重金属累积的影响, 本研究对沉积物 TOC 和重金属 Hg 和 Cu 积累量进行了相关分析, 发现沉积物中的 Hg 和 Cu 含量与 TOC 含量之间存在较强的正相关性 (图 7), 说明红树林沉积物腐殖质富含的黏粒及有机质具有较大的表面积, 能够吸附积聚大量的重金属, 以致使红树林沉积物常常成为重金属污染物的源和库^[36, 37, 38], 一定程度上缓解和降低近海的环境污染. 本研究发现, Hg 和 Cu 在沉积物剖面 14 cm 深度处的含量最高, 这个深度对应的年份为 2000 年. Hg 含量在 34 cm 深度处的含量偏高, 对应的年份为 1985 年. 该结论反映出 1985 年前是香港经济崛起的时期, 工业的迅速发展使得大量废水直接排入深圳湾, 或通过深圳河流入深圳湾. 1985

~2000 年是深圳和珠江三角洲经济快速发展的时期,大量重金属直接排入或经过深圳河进入深圳湾红树林,也可通过珠江口的径流和潮流由深圳湾口进入该海域. 2000 年后,深圳市出台节能减排的环保政策,将大型污水处理厂和污染严重的企业迁走,在一定程度上改善了深圳湾的重金属污染状况. 这与 Hg 和 Cu 的含量在 0~14 cm 的沉积物深度,即 2000 年后逐渐降低的变化趋势相吻合.

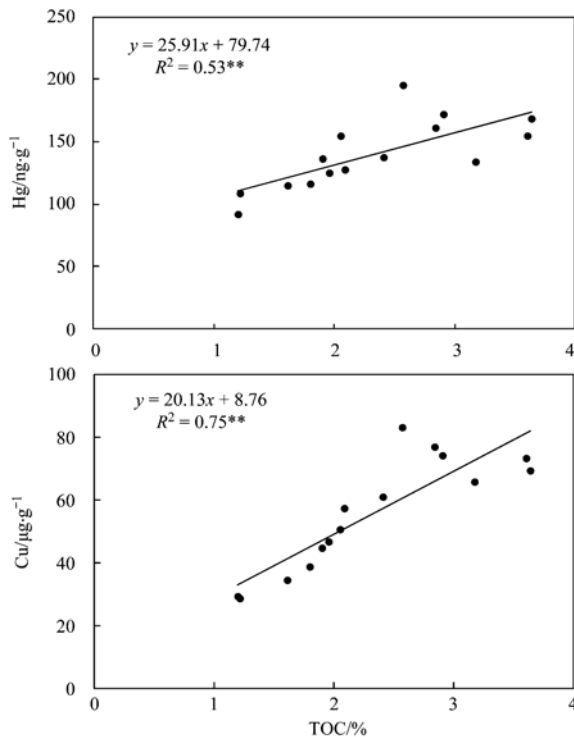


图7 Hg、Cu 含量与有机碳 (TOC) 相关性

Fig. 7 Relationship between Hg, Cu and TOC

沉积物中重金属污染的评价方法主要有地质积累指数法^[39],生物效应浓度法^[40]和潜在生态危害指数法^[24]等. 潜在生态危害指数法从重金属的生物毒性出发,定量划分出潜在生态危害的程度,并兼有现时与潜在风险评价的研究层次^[41]. 连云港近海海域中重金属的潜在生态危害系数属于轻微生态危害,产生潜在生态危害的主要重金属是 As, Cd 和 Cu 次之; Pb 和 Hg 最弱^[41]. 在珠江口淇澳岛滨海湿地沉积物的重金属中, Cd 的潜在生态危害最为严重; Ni、Pb、Cu、Cr 和 Zn 属于轻微生态危害^[19]. 湛江港湾表层沉积物中的 Ar、Hg 和 Pb 属于轻微生态危害, Cd 污染较重,属强生态危害^[42]. 本研究对深圳红树林湿地沉积物中的 Hg 和 Cu 进行了生态危害评估,发现沉积物中 Hg 和 Cu 的生态危害系数在 14 cm 以上表现为逐渐升高的趋势,再往下又逐

渐降低. 沉积物中 Hg 的生态危害系数大于 Cu 的生态危害系数,两者均未超过 40,属于低潜在生态危害. 但 Hg 的生态危害系数较高,是该区域需要进一步关注的重金属.

因此,深圳湾红树林沉积物中重金属 Hg 和 Cu 污染物历史记录的重建,较好地反映其重金属污染的累积过程,以及人类活动对深圳湾红树林湿地沉积物中重金属污染的影响过程与程度.

5 结论

(1) 随沉积物剖面深度的增加,深圳湾红树林湿地沉积物的容重和电导率逐渐增大, TOC 逐渐减小, pH 变化不明显; ²¹⁰Pb 测年结果表明,平均沉积速率为 $1.38 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$, 底层沉积物的沉积年龄约 45 年.

(2) 重金属含量分析结果表明,随着 1960~1985 年香港经济的快速发展,以及 1985~2000 年间深圳经济的快速崛起,沉积物中 Hg 和 Cu 含量迅速增加. 2000 年以来,一系列环保措施的实施,使得深圳湾红树林湿地沉积物中 Hg 和 Cu 含量呈现逐年下降的趋势.

(3) 近 50 年来,深圳湾红树林湿地 Hg 和 Cu 的潜在生态危害均属于低潜在生态危害. 在整个剖面上, Hg 的生态危害系数大于 Cu 的生态危害系数. 在 1985 年 Hg 的危害程度接近轻度潜在生态危害,是该地区需要进一步关注的重金属. 深圳湾红树林 Hg 和 Cu 含量及潜在危害较好地反映了深圳地区人类活动对深圳湾红树林湿地沉积物中重金属污染的影响过程和程度.

参考文献:

- [1] 林益明, 林鹏. 福建红树林资源的现状与保护[J]. 生态经济, 1999, (3): 16-17.
- [2] 林鹏. 红树林[M]. 北京: 海洋出版社, 1984. 104-145.
- [3] 林鹏. 中国红树林生态系[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 124-156.
- [4] 程皓, 陈桂珠, 叶志鸿. 红树林重金属污染生态学研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3893-3900.
- [5] 邱耀文, 余克服. 海南红树林湿地沉积物中重金属的累积[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(2): 102-108.
- [6] 丁振华, 吴浩, 刘洋, 等. 中国主要红树林湿地中甲基汞的分布特征及影响因素初探[J]. 环境科学, 2010, 31(8): 1701-1707.
- [7] 丁振华, 刘金铃, 李柳强, 等. 中国主要红树林湿地沉积物中汞的分布特征[J]. 环境科学, 2009, 30(8): 2210-2215.
- [8] Tillett D, Dittmann E, Erhard M, et al. Structural organization of microcystin biosynthesis in *Microcystis aeruginosa* PCC7806: an integrated peptide-polyketide synthetase system [J].

- Chemistry & Biology, 2000, **7**(10): 753-764.
- [9] Tam N F Y, Wong Y S. Accumulation and distribution of heavy metals in a simulated mangrove system treated with sewage[J]. Hydrobiologia, 1997, **352**(1-3): 67-75.
- [10] Pan H, Song L R, Liu Y D, *et al.* Detection of hepatotoxic *Microcystis* strains by PCR with intact cells from both culture and environmental samples[J]. Archives of Microbiology, 2002, **178**(6): 421-427.
- [11] Lawrence A L, Mason R P. Factors controlling the bioaccumulation of mercury and methylmercury by the estuarine amphipod *Leptocheirus plumulosus*[J]. Environmental Pollution, 2001, **111**(2): 217-231.
- [12] 谢海伟, 文冰, 郭勇, 等. 深圳福田红树植物群落特征及金属元素分布状况[J]. 广西植物, 2010, **30**(1): 64-69.
- [13] 黄小平, 李向东, 岳维忠, 等. 深圳湾沉积物中重金属污染累积过程[J]. 环境科学, 2003, **24**(4): 144-149.
- [14] 左平, 汪亚平, 程珺, 等. 深圳湾海域表层和柱样沉积物中的重金属分布特征[J]. 海洋学报, 2008, **30**(4): 71-79.
- [15] 章金鸿, 李玫, 潘南明. 深圳福田红树林对重金属 Cu、Pb、Zn、Cd 的吸收、累积与循环[J]. 云南环境科学, 2000, **19**(增 1): 53-56.
- [16] 咎启杰, 王勇军, 王伯荪. 深圳福田红树林无瓣海桑与海桑群落的重金属累积和循环[J]. 环境科学, 2002, **23**(4): 81-88.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [18] Goldberg E D, Koide M. Rates of sediment accumulation in the Indian Ocean[A]. In: Geiss J, Goldberg E D (eds.). Earth Science and Meteoritics [C]. Amsterdam: North-Holland publishing Company, 1963. 90-102.
- [19] 王爱军, 叶翔, 李团结, 等. 近百年来珠江口淇澳岛滨海湿地沉积物重金属累积及生态危害评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1306-1314.
- [20] 李凤业, 高抒, 贾建军, 等. 黄、渤海泥质沉积区现代沉积速率[J]. 海洋与湖沼, 2002, **33**(4): 364-368.
- [21] 曹琼英, 沈德勋. 第四纪年代学及实验技术[M]. 南京: 南京大学出版社, 1988. 228-252.
- [22] 章伟艳, 张富元, 陈荣华, 等. 南海深水区晚更新世以来沉积速率、沉积通量与物质组成[J]. 沉积学报, 2002, **20**(4): 668-674.
- [23] Ding Z H, Liu J L, Li L Q, *et al.* Distribution and speciation of mercury in surficial sediments from main mangrove wetlands in China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, **58**(9): 1319-1325.
- [24] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment logical approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [25] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志, 第九册(广东东部湾)[M]. 北京: 中国海洋出版社, 1998.
- [26] 南沙海域环境质量研究专题组. 南沙群岛及其邻近海域环境质量研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1996.
- [27] 胡邦琦, 李国刚, 李军, 等. 黄海、渤海铅-210 沉积速率的分布特征及其影响因素[J]. 海洋学报, 2011, **33**(6): 125-133.
- [28] 李凤业, 杨永亮, 何丽娟, 等. 南黄海东部泥区沉积速率和物源探讨[J]. 海洋科学, 1999, (5): 37-40.
- [29] 王福, 王宏, 李建芬, 等. 渤海地区 210Pb, 137Cs 同位素测年的研究现状[J]. 地质论评, 2006, **52**(2): 244-250.
- [30] Lim D I, Choi J Y, Jung H S, *et al.* Recent sediment accumulation and origin of shelf mud deposits in the Yellow and East China Seas[J]. Progress in Oceanography, 2007, **73**(2): 145-159.
- [31] 闻平, 刘沛然, 雷亚平, 等. 近 50 年伶仃洋滩槽冲淤变化趋势分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, **42**(增刊 2): 240-243.
- [32] 张志忠, 李双林, 董岩翔, 等. 浙江近岸海域沉积物沉积速率及地球化学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, **25**(3): 15-24.
- [33] 张文菊, 碰佩钦, 童成立, 等. 洞庭湖湿地有机碳垂直分布与组成特征[J]. 环境科学, 2005, **26**(3): 56-60.
- [34] 袁巧霞, 朱端卫, 武雅娟. 温度、水分和施氮量对温室土壤 pH 及电导率的耦合作用[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(5): 1112-1117.
- [35] 刘明美. 土壤 Cu^{2+} 污染对植物生长影响的研究进展[J]. 畜牧与饲料科学, 2009, **30**(4): 34-35.
- [36] Harbison P. Mangrove muds-a sink and a source for trace metals [J]. Marine Pollution Bulletin, 1986, **17**(6): 246-250.
- [37] Marchand C, Allenbach M, Lallier-Vergès E. Relationships between heavy metals distribution and organic matter cycling in mangrove sediments (Conception Bay, New Caledonia) [J]. Geoderma, 2011, **160**(3-4): 444-456.
- [38] Kehrig H A, Pinto F N, Moreira I, *et al.* Heavy metals and methylmercury in a tropical coastal estuary and a mangrove in Brazil[J]. Organic Geochemistry, 2003, **34**(5): 661-669.
- [39] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. GeoJournal, 1969, **2**(3): 108-118.
- [40] 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.
- [41] 陈斌林, 贺心然, 王童远, 等. 连云港近岸海域表层沉积物中重金属污染及其潜在生态危害[J]. 海洋环境科学, 2008, **27**(3): 246-249.
- [42] 张才学, 孙省利, 陈春亮. 湛江港湾表层沉积物重金属的分布特征及潜在生态危害评价[J]. 湛江海洋大学学报, 2006, **26**(3): 45-49.

CONTENTS

Preface	CHEN Wei-ping (4069)
Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review	CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)
Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water	PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)
Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment	PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)
Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)
Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)
Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)
Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)
Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musk in Soils Input Through Recycle Water Irrigation	WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)
Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality	WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)
Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing	ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)
Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing	CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)
Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO	WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151)
Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station	ZHANG Jun-he, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)
Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment	ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)
Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw	LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)
Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car	HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)
Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai	LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)
Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary	YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)
Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation	LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)
Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)
Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season	MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River	WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)
Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site	PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)
Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China	LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)
Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai	LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)
Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River	ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)
Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake	QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)
Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region: A Case Study of Baishui Glacier No. 1	ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)
Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification	ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)
Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i>	SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)
A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process	XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)
Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)
Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent	LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)
Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors	CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)
Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS)	WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)
Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage	GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)
Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites	XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)
Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters	JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)
Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks	WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)
Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation	QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)
Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge	ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruoyu, <i>et al.</i> (4387)
Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field	JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)
Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils	SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)
Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i>	CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)
Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste	WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)
Study on Emission Standard System of Air Pollutants	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)
Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China	BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)
Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals	FU Guo-wei (4428)

《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12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 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) 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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行