

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

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

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王丽, 李杏茹, 王跃思 (1225)
鼎湖山 PM _{2.5} 中水溶性离子浓度特征分析	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 刘全 (1232)
北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征	黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 王跃思 (1236)
深圳市 PM _{2.5} 化学组成与时空分布特征	云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 兰紫娟, 李响, 曾立武 (1245)
福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究	易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽 (1252)
河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征	丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 田慧, 郭强, 黄韬, 高宏, 李军, 张干 (1258)
淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算	薛文博, 王金南, 杨金田, 雷宇, 燕丽, 贺晋瑜, 韩宝平 (1264)
香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析	黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇 (1270)
变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响	赵微, 林健, 王树芳, 刘记来, 陈忠荣, 寇文杰 (1277)
基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析	邓欧平, 孙嗣咏, 吕军 (1284)
西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探	郭威, 李祥忠, 刘卫国 (1291)
滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应	郭怀成, 向男, 周丰, 王永华, 李发荣, 朱翔, 毛国柱, 于书霞, 李娜, 盛虎, 杨永辉, 何成杰, 王翠榆 (1298)
三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算	牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 刘德富, 黎国育, 王亮, 纪道斌, 杨正健 (1308)
海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况	辛成林, 任景玲, 张桂玲, 郭亚平, 张国玲, 刘素美 (1315)
黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征	吴斌, 宋金明, 李学刚 (1324)
扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价	叶华香, 臧淑英, 张丽娟, 张玉红 (1333)
上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价	唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 姚磊, 蒋真毅, 吴旻, 谢翠松, 梁海, 王鹤, 皮帅帅, 余朝毅 (1340)
我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析	张灿, 陈虹, 余忆玄, 王立军, 韩建波, 陶平 (1345)
江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较	金涛, 吕学敏, 曾一凡, 张冰冰, 马鲲鹏, 姜朴, 唐非 (1351)
北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋	周益奇, 刘云霞 (1357)
降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究	胡园园, 杨娜, 丁毅, 徐文璐, 陈秀荣, 艾奇峰, 陈善佳, 王利鹏, 黄华 (1363)
渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险	安立会, 张燕强, 宋双双, 刘玥, 高俊敏, 陈浩, 赵兴茹, 雷坤, 郑丙辉 (1369)
巨牡蛎 (<i>Crassostrea</i> sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积	刘锡尧, 袁东星, 陈耀瑾 (1374)
咪唑盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究	黄若男, 范军杰, 涂宏志, 谭凌燕, 刘惠君, 徐冬梅 (1380)
铝盐混凝除砷影响因素及机制研究	陈桂霞, 胡承志, 朱灵峰, 童华卿 (1386)
混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究	刘冰, 余国忠, 古励, 赵承美, 李清飞, 翟慧敏 (1392)
活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究	王佳裕, 戴启洲, 鱼杰, 颜亦舟, 陈建孟 (1402)
氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究	彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 王建龙 (1411)
C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析	袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 盛学敏, 潘杨, 李祥 (1416)
以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究	翟晓峰, 蒋成爱, 吴光学, 曾运涛 (1421)
固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选	李斌, 郝瑞霞 (1428)
基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺	卢健聪, 高大文, 孙学影 (1435)
多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟	周振, 吴志超, 王志伟, 杜兴治, 蒋玲燕, 邢灿 (1442)
高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较	赵志瑞, 马斌, 张树军, 李滨, 白志辉, 王晓辉, 庄国强, 张洪助 (1448)
活性污泥絮体的分形结构分析	阮晓东, 刘俊新 (1457)
负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究	沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 罗应东 (1464)
预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响	熊光城, 濮文虹, 杨昌柱 (1472)
同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究	张超, 陈银广, 顾国维 (1479)
利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性	谢薇薇, 龚伊, 王张伟, 孔繁翔, 史小丽 (1485)
阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用	郭亚丽, 傅海燕, 黄国和, 高攀峰, 柴天, 严滨, 廖欢 (1492)
象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征	朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军 (1498)
环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究	王进, 徐真, 彭书传, 夏明山, 岳正波, 陈天虎 (1510)
铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解	史广宇, 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1517)
酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 的影响	黄翔峰, 王凯, 黎明霞, 王彩林, 陆丽君, 刘佳 (1524)
玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构	乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 师晓爽, 许晓晖, 范晓蕾, 邱艳玲 (1531)
红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化	刘子旭, 孙力平, 李玉友, 邱春生 (1540)
4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究	杨宾, 李慧颖, 伍斌, 杜晓明, 李发生 (1545)
污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源	姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新 (1553)
呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 张君 (1561)
水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征	李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 罗璐, 朱捍华, 石辉, 葛体达, 童成立, 吴金水 (1568)
亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征	盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠 (1576)
施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响	刘翠英, 蒋新 (1583)
螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复	刘霞, 王建涛, 张萌, 王力, 杨亚提 (1590)
不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响	蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 周立祥, 王世梅 (1598)
绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究	蓝丹琳, 彭丹, 郭楚玲, 朱超飞, 薛秀玲, 党志 (1605)
改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO ₄ ³⁻ 的脱除性能	邢坤, 王海增 (1611)
羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响	涂丽杏, 朱能武, 吴平霄, 李平, 吴锦华 (1617)
新型生物质活性炭烟气脱硫研究	刘洁岭, 汤争光, 陈杰, 蒋文举, 江霞 (1623)
城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用	毛建素, 马兰 (1628)
厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷	闫祯, 崔胜辉, 李桂林, 任引, 徐礼来 (1636)
《环境科学》征订启事 (1283)	
《环境科学》征稿简则 (1332)	
信息 (1350, 1509, 1582, 1644)	
专辑征稿通知 (1523)	

上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价

唐庆丽¹, 程金平^{1*}, 高昊旻², 姚磊², 蒋真毅², 吴旻², 谢翠松², 梁海², 王鹤², 皮帅帅¹, 余朝毅¹

(1. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240; 2. 上海市海洋业务受理中心, 上海 200050)

摘要: 为了探讨上海典型疏浚泥中重金属的生态风险, 本研究利用生态风险指数法对黄浦江、长江口、内河航道疏浚泥中 Hg、Cd、Cu、Pb、As、Cr 和 Zn 进行风险评价。结果表明, 7 种重金属的潜在生态风险系数 (E_r^i) 从大到小平均值分别为 20.05、17.49、8.82、5.71、4.68、1.74 和 1.13, 均属轻微生态危害; 从采样区域来看各区域重金属的 E_r^i 均小于 40, 属轻微生态危害; 从采样点来看, 除内河航道和长江口个别点 Cd (1 个点) 和 Hg (4 个点) $E_r^i > 40$, 属于中度生态危害或强生态危害, 其余均为轻微生态危害。从潜在生态风险指数 (ERI) 的评价结果来看: 疏浚泥中重金属潜在生态风险较低, 均属于轻微生态危害; 内河航道、长江口和黄浦江码头前沿的 ERI 分别为 81.4、57.7 和 52.5, 均属于轻微生态危害。

关键词: 上海; 疏浚泥; 重金属; 生态风险评价

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1340-05

Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai

TANG Qing-li¹, CHENG Jin-ping¹, GAO Hao-min², YAO Lei², JIANG Zhen-yi², WU Yang², XIE Cui-song², LIANG Hai², WANG He², PI Shuai-shuai¹, YU Zhao-yi¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Municipal Oceanic Bureau, Shanghai 200050, China)

Abstract: In order to discuss the potential ecological risk of heavy metals of the typical dredged mud in Shanghai, the Hakanson potential ecological risks method was used to analyse and assess the potential ecological risks of heavy metals, including Hg, Cd, Cu, Pb, As, Cr and Zn in dredged mud from the following three areas—the dock apron of Huangpu River, the mouth of the Yangtze River and inland waterways. The results showed that the mean values of ecological risk index (E_r^i) of the seven heavy metals are 20.05, 17.49, 8.82, 5.71, 4.68, 1.74 and 1.13, respectively, all of which belonged to the low ecological risk; Cd (one location in inland waterways) and Hg (three locations in the mouth of the Yangtze River and one location in inland waterways) are the most hazardous elements, with the $E_r^i > 40$, which belonged to the medium ecological risk or the high ecological risk, and other elements belonged to the low ecological risk. From the results of ecological risk indices (ERI) of the heavy metals in Shanghai dredged mud, the risk of the heavy metals belonged to the low ecological risk. The ERI of inland waterways, the mouth of the Yangtze River and the dock apron of the Huangpu River were 81.4, 57.7 and 52.5, respectively, which all belong to the low ecological risk.

Key words: Shanghai; dredged mud; heavy metals; ecological risk assessment

海洋倾废是向海洋倾泻废物以减轻陆地环境污染的一种处理方法, 而疏浚物是海洋废弃物中数量最大的一类。在我国, 疏浚物占全部海上处置废弃物的 95% 以上。上海拥有丰富的海洋资源和广阔的近岸海洋环境, 近几年随着经济的迅猛发展, 港口、航道、海洋与海岸工程的建设和维护项目大量涌现, 上海市的海洋倾废活动日趋频繁。疏浚泥倾倒入海后, 对周围环境的影响一般分为短期影响和长期影响。关于对沉积物重金属评价有许多报道^[1~9], 但是对上海市疏浚泥的重金属生态风险评价却不多见。目前, 国内外关于沉积物重金属污染评价方法主要有^[10~14]: 地累积指数法、沉积物富集系数法、潜在生态危害指数法、回归过量分析法等, 各种方法具有不同的优缺点^[15], 传统的指数平

均法和模糊评价法等缺少将污染物与其生物毒性、生态危害有机结合的、兼有现时与潜在风险评价的研究层次。因此, 为了探讨上海典型疏浚泥中重金属的生态风险, 本研究利用生态风险指数法对黄浦江、长江口、内河疏浚泥中 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg、As 进行风险评价, 以期对疏浚泥倾倒管理、资源化利用等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

收稿日期: 2012-06-08; 修订日期: 2012-10-22

基金项目: 上海市海洋局项目资助项目 (沪海科 2012-02, 沪海科 2011-02)

作者简介: 唐庆丽 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋环境, E-mail: tangqingli_116@126.com

* 通讯联系人, E-mail: jpcheng@sjtu.edu.cn

依据《海洋调查规范》(GB/T 12763. 8-2007)于 2011 年 9 月、2012 年 2 月初和 2 月底对经常疏浚的黄浦江码头前沿、内河航道和长江口(包括长江口码头前沿、青草沙水库、深水航道)进行了采样. 共确定了 25 个疏浚泥采样点,其中长江口共确定 12 个样点(编号为 1~12)采集了 25 个样品;黄浦江码头前沿共确定了 9 个采样点(编号为 13~21),采集了 17 个疏浚泥样品;内河航道共确定了 4 个采样点(编号为 22~25),采集了 8 个疏浚泥样品.

1.2 样品分析方法

样品的处理与测定方法参考《海洋监测规范》(GB/T 17378. 5-2007). 主要采用火焰原子吸收分光光度法(Zn)、无火焰原子吸收分光光度法(Cr、Cu、Cd、Pb)和原子荧光法(Hg、As),所用仪器为 TAS-P86/TAS-P86 型火焰原子吸收分光光度计、

SpectrmA220Z 型无火焰原子分光光度计和 AFS-9130 型荧光光度计.

1.3 生态风险评价方法

采用瑞典学者 Hakanson 提出的沉积物风险评价的方法进行的. 其计算公式为:

$$ERI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times C_f^i = \sum T_r^i \times C_i/C_n^i$$

式中,ERI 为潜在生态风险指数; E_r^i 为某单个重金属的潜在生态风险系数; T_r^i 为疏浚泥中某一重金属的毒性水平和生物对重金属的敏感程度,即毒性系数(表 1^[16]); C_f^i 为某一重金属的污染指数,可表征疏浚泥中单个重金属的污染程度; C_i 为疏浚泥中重金属含量的实测值; C_n^i 为评价参考值,即背景值,为了增强评价结果的可比性,本研究选用国际上常用的工业化以前沉积物中重金属全球最高背景值(表 1^[16]).

表 1 沉积物中重金属的参照值(C_n^i)和沉积物中各重金属的毒性系数(T_r^i)^[16]

重金属元素	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As
$C_n^i/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	30	25	80	60	0.50	0.20	15
T_r^i	5	5	1	2	30	40	10

Hakanson 用 C_f^i 来表征沉积物中单个污染物污染程度, $C_f^i < 1$, 低污染; $1 \leq C_f^i < 3$, 中污染; $3 \leq C_f^i < 6$, 较高污染; $C_f^i \geq 6$, 很高污染. 参考前人研究成果,结合上海市疏浚泥的性质和污染水平,潜在生态风险评价指标与具体分级见表 2^[9].

表 2 重金属潜在生态危害系数(E_r^i)和危害指数(ERI)与污染程度的关系^[9]

Table 2 Relationship between potential ecological risk coefficients (E_r^i), risk indices (ERI) of heavy metals and pollution level		
系数范围	指数范围	污染程度
$E_r^i < 40$	$ERI < 150$	轻微生态危害
$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq ERI < 300$	中等生态危害
$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq ERI < 600$	强生态危害
$160 \leq E_r^i < 320$	$ERI \geq 600$	很强生态危害
$E_r^i \geq 320$		极强生态危害

2 结果与讨论

2.1 重金属含量及区域分布分析

各区域疏浚泥各重金属含量统计和《疏浚物海洋倾倒分类和评价程序》中疏浚物分类标准的下限和上限见表 3.《疏浚物海洋倾倒分类和评价程序》将疏浚物分为 3 类:清洁疏浚物、沾污疏浚物和污染疏浚物.

根据评价标准,评价结果为:除内河航道武宁路桃浦河桥和张家港莲花路桥为沾污疏浚物外,其余

均为清洁疏浚物. 除大部分 Cu 和内河航道的武宁路桃浦河桥的 Hg 和张家港莲花路桥的 Cd 超过疏浚物结果的下限,其余均小于疏浚物下限. Cu 普遍较高的原因可能与背景值偏高有关. 而内河航道的 Hg 和 Cd 的超标与陆源的排污有密切的关系.

从区域上来看,除内河航道 Cd 的变异系数超过了 1,其余均比较小,这说明,每个区域疏浚泥中重金属含量变化范围都比较小;不同污染物的富集程度在区域上差别不是很大,但仍有区别,其中内河航道中 Zn、Hg 和 Cd 的含量相对比较高,黄浦江码头前沿疏浚泥中 Pb 个 Cu 比较高,而长江口疏浚泥中 Cr 和 As 含量比较高. 其原因比较复杂,是人为的活动、水动力条件的影响以及背景值等共同作用的结果.

2.2 重金属生态风险评价

上海市疏浚泥各重金属的污染指数、潜在生态危害系数和生态危害指数见表 4.

(1) 污染指数评价结果与分析

从表 4 看出,上海市疏浚泥中 Cu 污染指数大部分介于 1~3 之间,其中仅有三海码头 Cu 的污染指数大于 3,为 3.11,石洞口煤气厂和青草沙水库的 Cu 的污染指数小于 1,分别为 0.94 和 0.48,说明 Cu 基本属于中污染;25 个样点中有 14 个疏

浚泥样点中 Pb 的污染指数大于 1,均小于 3,在黄浦江码头前沿的疏浚泥中,只有上粮五库和闵行区海事处疏浚泥中污染指数小于 1,在长江口疏浚泥中有一半的疏浚泥的 Pb 污染指数小于 1,在内河 4 个样点中有 3 个 Pb 污染指数小于 1,说明 Pb 基本属于中低污染程度;上海市疏浚泥中 Zn 的污染指数也有一半以上处于 1~3 之间,其余均小于 1,可见 Zn 基本属于中低污染;仅有 5 个疏浚泥样点中 Cr 的污染指数大于 1,且在 1.5 以下,其余均

小于 1,因此 Cr 基本属于低污染;Cd 的污染指数仅有张家港莲花路桥大于 3,属于较高污染,其余均小于 1,属于低污染;由 Hg 的污染指数可以看出除长江口的外高桥上海燃油中燃石油海滨码头、外高桥发电厂卸煤码头和外高桥造船有限公司码头和内河的武宁路桃浦河桥污染程度较大之外(大于 1,但小于 3),其余均小于 1,可以得出 Hg 基本属于低污染. 相比较而言,As 的污染程度最小,均小于 1,属于低污染.

表 3 上海市各采样区域疏浚泥采样点重金属含量区域对比表/mg·kg⁻¹

Table 3 Statistics of heavy metals content in different regions of dredged mud from Shanghai/mg·kg⁻¹

统计参数	采样区域	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As
平均值	长江口(n=12)	48.400	29.308	87.95	55.858	0.178 4	0.121	8.910
	黄浦江码头前沿(n=9)	59.733	32.333	90.711	50.956	0.344	0.047 0	4.697
	内河航道(n=4)	51.125	17.650	96.750	44.200	0.513 3	0.158	6.550
最大值	长江口(n=12)	93.200	48.800	139.40	77.500	0.298	0.250	14.400
	黄浦江码头前沿(n=9)	85.200	50.700	162.00	70.200	0.480	0.076 0	5.94
	内河航道(n=4)	66.300	32.600	183.10	51.800	1.600	0.330	9.700
最小值	长江口(n=12)	14.500	11.800	32.800	36.000	0.119	0.035 0	3.100
	黄浦江码头前沿(n=9)	43.400	16.200	69.300	36.500	0.240	0.038 0	3.88
	内河航道(n=4)	39.800	10.500	57.400	38.600	0.121	0.060 0	4.900
标准偏差	长江口(n=12)	20.368	13.779	32.782	13.192	0.064 7	0.076 0	3.397
	黄浦江码头前沿(n=9)	11.795	11.997	28.690	10.441	0.087 3	0.011 0	0.654
	内河航道(n=4)	12.116	10.196	58.055	5.645 6	0.725	0.118	2.198
变异系数	长江口(n=12)	0.421	0.470	0.373	0.236	0.363	0.625	0.381
	黄浦江码头前沿(n=9)	0.197	0.371	0.316	0.205	0.250	0.240	0.139
	内河航道(n=4)	0.237	0.578	0.6	0.128	1.41	0.752	0.336
标准	下限	50.0	75.0	200.0	80	0.80	0.30	20
	(上限+下限)/2	175.0	162.5	400.0	190	2.90	0.65	60
	上限	300.0	250	600.0	300	5.00	1.00	100

(2)潜在生态危害系数评价结果与分析

从不同的采样点来看,各采样点重金属 Cu、Pb、Zn、Cr 和 As 的潜在生态危害系数均小于 40,属于轻微生态危害;对于 Cd,只有内河航道——张家港莲花路桥样点的潜在生态危害系数超过了 40,为 96,属于强生态危害,其余均为轻微生态危害;对于 Hg,长江口有 3 处潜在生态危害系数超过了 40,分别为外高桥上海燃油中燃石油海滨码头(46)、外高桥发电厂卸煤码头(44)和外高桥造船有限公司码头(50),内河航道的武宁路桃浦河桥样点超过了 40,为 66,属于中等生态危害,其余各点均为轻微生态危害.

从不同的区域来看,各重金属的潜在生态危害系数均小于 40,属于轻微生态危害;对于重金属 Zn,其潜在生态危害系数内河航道>黄浦江码头前沿>长江口;对于重金属 Cu,其潜在生态危害系数黄浦江码头前沿>内河航道>长江口;对于重金属 Hg,其潜在生态危害系数内河航道>长江口>黄浦江码

头前沿;对于重金属 Cr,其潜在生态危害系数长江口>黄浦江码头前沿>内河航道;对于重金属 Pb,其潜在生态危害系数黄浦江码头前沿>长江口>内河航道;对于重金属 As,其潜在生态风险系数长江口>内河航道>黄浦江码头前沿;对于重金属 Cd,其潜在生态风险系数内河航道>黄浦江码头前沿>长江口.

从上海市整体疏浚泥重金属的潜在生态危害来看,7 种重金属的潜在生态风险系数,从大到小依次为 Hg>Cd>Cu>Pb>As>Cr>Zn,平均值分别为 20.05、17.49、8.82、5.71、4.68、1.74、1.13,均属于轻微生态危害.

(3)潜在生态风险指数评价结果与分析

从潜在生态风险指数的评价结果来看,上海市疏浚泥中重金属潜在生态风险较低,均属于轻微生态危害. 从区域来看,内河航道>长江口>黄浦江码头前沿,其潜在生态风险指数分别为 81.4、57.7 和 52.5. 从采样点来看,仅有内河航道中的桃浦河

表 4 上海市疏浚泥各重金属的污染指数、潜在生态危害系数和潜在生态危害指数¹⁾ (C_i^* , E_i^* 和 ERI)

Table 4 Pollution index, impacting extent of ecological risk and ecological risk indices of dredged mud from Shanghai (C_i^* , E_i^* and ERI)																		
采样区域	采样点	采样编号	C_i^*						E_i^*						ERI			
			Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd		Hg	As	
长江口 码头 前沿	宝山区川念路 888 号	1	1.43	1.67	1.59	0.97	0.50	0.54	0.94	7.13	8.34	1.59	1.93	15.12	21.78	9.40	65.30	
	石洞口煤气厂	2	0.94	1.58	1.16	0.84	0.32	0.30	0.76	4.70	7.92	1.16	1.68	9.60	11.94	7.60	44.60	
	外高桥炼油厂 00 号码头	3	1.84	1.67	0.41	1.29	0.26	0.40	0.75	9.18	8.36	0.41	2.58	7.92	16.00	7.47	51.92	
	外高桥东方储罐油品码头	4	1.50	0.78	0.97	1.16	0.26	0.55	0.63	7.48	3.90	0.97	2.31	7.80	22.00	6.33	50.79	
	外高桥中燃石油海滨码头	5	1.88	0.55	1.40	1.24	0.30	1.15	0.43	9.38	2.74	1.40	2.48	8.94	46.00	4.27	75.22	
	三海码头	6	3.11	0.48	0.53	0.91	0.29	0.45	0.21	15.5	2.42	0.53	1.81	8.58	18.00	2.07	48.94	
	外高桥发电厂卸煤码头	7	2.23	0.47	0.71	0.81	0.35	1.10	0.51	11.1	2.36	0.71	1.62	10.44	44.00	5.13	75.39	
	外高桥造船有限公司码头	8	1.44	0.86	0.97	0.70	0.24	1.25	0.42	7.22	4.32	0.97	1.40	7.14	50.00	4.20	75.25	
	上海海通国际汽车码头	9	1.57	1.95	1.74	1.02	0.60	0.33	0.96	7.85	9.76	1.74	2.04	17.88	13.26	9.60	62.14	
	外高桥粮油储备库码头	10	1.34	1.78	1.41	0.95	0.58	0.40	0.52	6.70	8.92	1.41	1.90	17.4	16.00	5.20	57.53	
	深水航道	11	—	1.34	1.14	0.69	0.35	0.17	0.60	8.07	6.70	1.14	1.38	10.44	6.98	6.01	40.72	
	青草沙水库	12	0.48	0.92	1.17	0.60	0.24	—	0.40	2.42	4.60	1.17	1.20	7.20	24.00	4.00	44.59	
平均值			1.61	1.17	1.10	0.93	0.36	0.60	0.59	8.06	5.86	1.1	1.86	10.71	24.16	5.94	57.7	
黄浦江 码头 前沿	老白港水上消防码头	13	1.63	2.03	2.03	0.93	0.67	0.38	0.40	8.15	10.14	2.03	1.86	19.98	15.20	3.96	61.32	
	上粮五库	14	1.45	0.65	0.88	0.75	0.48	0.19	0.27	7.23	3.24	0.88	1.49	14.40	7.60	2.65	37.50	
	东之鸣仓储公司海保码头	15	2.07	1.11	0.91	0.82	0.76	0.22	0.30	10.40	5.54	0.91	1.63	22.80	8.60	2.95	52.80	
	渔政码头	16	1.96	1.03	0.98	0.79	0.72	0.25	0.26	9.80	5.16	0.98	1.57	21.60	9.80	2.59	51.50	
	中华船厂	17	1.96	1.35	1.13	1.17	0.56	0.23	0.32	9.78	6.74	1.13	2.34	16.80	9.20	3.18	49.17	
	复兴船务公司	18	1.91	1.25	1.19	0.61	0.52	0.24	0.35	9.57	6.24	1.19	1.22	15.60	9.60	3.45	46.87	
	沪东中华造船厂	19	2.23	1.77	1.21	0.70	0.94	0.23	0.31	11.20	8.84	1.21	1.39	28.20	9.00	3.13	62.93	
	肥皂厂	20	2.84	1.75	1.02	1.04	0.96	0.21	0.34	14.20	8.76	1.02	2.07	28.80	8.40	3.43	66.68	
	闵行区海事处	21	1.87	0.71	0.87	0.85	0.58	0.20	0.28	9.33	3.54	0.87	1.71	17.40	7.80	2.84	43.49	
	平均值			1.99	1.29	1.1	0.85	0.69	0.24	0.31	9.96	6.47	1.14	1.7	20.62	9.467	3.13	52.47
	内河 航道	武宁路桃浦河桥	22	1.84	0.62	0.72	0.75	0.36	1.65	0.65	9.22	3.12	0.72	1.49	10.68	66.00	6.47	97.69
		新泾港仙霞西路桥	23	1.44	0.48	0.93	0.86	0.31	0.60	0.43	7.18	2.38	0.93	1.73	9.24	24.00	4.27	49.72
新泾港顾戴路桥		24	2.21	0.42	2.29	0.70	0.24	0.60	0.33	11.10	2.10	2.29	1.39	7.26	24.00	3.27	51.36	
张家港莲花路桥		25	1.33	1.30	0.90	0.64	3.20	0.30	0.35	6.63	6.52	0.90	1.29	96.00	12.00	3.47	126.8	
平均值			1.71	0.71	1.2	0.74	1.03	0.79	0.44	8.53	3.53	1.21	1.48	30.8	31.5	4.37	81.39	

1) 由于深水航道 Cu 未测定, 此处以长江口其他采样点 E_i^* 的平均值代替, 此处以长江口其他采样点 E_i^* 的平均值代替

武宁路桥和张家港莲花路桥断面采样点的潜在生态风险指数最高,分别为 97.7 和 127,因此,其潜在生态危害也相对较大。

3 结论

(1)上海市整体疏浚泥重金属含量上除内河航道个别点为沾污疏浚物,其余均为清洁疏浚物。在区域分布上其重金属含量总体表现差异不大,其变异系数基本小于 1。但是对于同一采样区域,个别具有显著差异,比如,在内河航道 4 个采样点中有一处 Hg 含量较高,其总体变异系数达到了 1.41。

(2)从上海市区域疏浚泥重金属的潜在生态危害系数来看,7 种重金属的潜在生态风险系数,从大到小依次为 $Hg > Cd > Cu > Pb > As > Cr > Zn$,平均值分别为 20.05、17.49、8.82、5.71、4.68、1.74、1.13,均属于轻微生态危害。从采样点来说,其中长江口 Hg 含量有三处属于中等生态危害,内河航道 Hg 含量有一处为中等生态危害,Cr 含量有一处为强生态危害。

(3)从潜在生态危害指数的评价结果来看,上海市疏浚泥中重金属潜在生态风险较低,均属于轻微生态危害。从区域来看,内河航道 > 长江口 > 黄浦江码头前沿,其潜在生态风险指数分别为 81.4、57.7 和 52.5。

(4)综合文章结果和分析,Cd 和 Hg 是上海市疏浚泥中重金属的潜在生态风险因子。

致谢:文中数据分析由国家海洋局东海环境监测中心、国家海洋局宁波海洋环境监测中心和上海市环境监测中心完成,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 贾振邦,梁涛,林健枝,等. 香港河流重金属污染及潜在生态危害研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1997, **33**(4): 485-492.
- [2] 张海清,余海珊,崔杰锋,等. 龙湾涌沉积物重金属污染现状评价[J]. 中国环境管理, 2001, (2): 29-31.
- [3] 何孟常,王子健,汤鸿霄. 乐安江沉积物重金属污染及生态风险性评价[J]. 环境科学, 1999, **20**(1): 7-10.
- [4] 何云峰,朱广伟,陈英旭,等. 运河(杭州段)沉积物中重金属的潜在生态风险研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2002, **28**(26): 669-674.
- [5] 郑琳,崔文林,贾永刚. 青岛海洋倾倒区沉积物重金属污染及其生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 2008, **27**(S2): 45-48, 59.
- [6] 张亮,曹丛华,任荣珠,等. 岚山港海洋临时倾倒区表层沉积物重金属污染、潜在生态风险评价及变化趋势分析[J]. 海洋通报, 2011, **30**(2): 234-239.
- [7] 刘洁平,蓝东兆. 厦门海域废弃物倾倒区表层沉积物重金属富集特征及其生态危害评价[J]. 亚热带资源与环境学报, 2009, **4**(2): 68-73.
- [8] 胡雄星,韩中豪,张进,等. 黄浦江表层沉积物中重金属污染的潜在生态风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2008, **17**(1): 109-112.
- [9] 张丽旭,蒋晓山,赵敏,等. 长江口洋山海域表层沉积物重金属的富集及其潜在生态风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2007, **16**(3): 351-356.
- [10] 霍文毅,黄风茹,陈静生,等. 河流颗粒物重金属污染评价方法比较研究[J]. 地理科学, 1997, **17**(1): 81-86.
- [11] Verca P, Dolence T. Geochemical estimation of copper contamination in the healing mud from Makirina Bay, central Adriatic[J]. Environment International, 2005, **31**(1): 53-61.
- [12] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [13] Zhuang Y Y, Allen H E, Fu G M. Effect of aeration of sediment on cadmium binding [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1994, **13**(5): 717-724.
- [14] Hilton J, Davison W, Oehsenbein U. A mathematical model for analysis of sediment core data: implications for enrichment factor calculations and trace-metal transport mechanisms[J]. Chemical Geology, 1985, **48**(1-4): 281-291.
- [15] 张鑫,周涛发,杨西飞,等. 河流沉积物重金属污染评价方法比较研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005, **28**(11): 1419-1423.
- [16] 陈静生,陶澍,邓宝山,等. 水环境化学[M]. 北京:高等教育出版社, 1987.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changhe River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-xue, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 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