

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 ₁₀ 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 ₁₀ 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	叶花香, 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)	

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, 邵亚平, 张国玲, 刘素美

(中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 2008年7月对海南万泉河、文昌/文教河河口及东部近岸悬浮颗粒态金属的分布进行调查, 采用ICP-AES测定Al、Fe、Mn、Cr、Cu、Ni、V、Zn的含量, 探讨颗粒态重金属的组成及其影响因素, 初步分析了海南岛东部河流的污染状况。结果表明, 受颗粒粒径影响, 河口区颗粒态金属浓度先随盐度升高而后逐渐降低, 至东部近岸含量略有升高; 以Al为校正因子归一化消除颗粒粒径影响后, 重金属浓度在万泉河河流/河口分布均匀, 而在文昌/文教河河流/河口有较大变化。富集因子计算结果显示, 万泉河重金属污染较轻, 而文昌/文教河Cr、Ni相对富集, 污染严重。在影响颗粒态重金属组成的因素中, 颗粒物的来源占主导地位, 同时也受水体氧化还原环境及污水排放、生物活动的影响。

关键词: 重金属; 悬浮颗粒; 分布; 污染; 万泉河、文昌/文教河河口; 海南东部近岸

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1315-09

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, SHAO Ya-ping, ZHANG Guo-ling, LIU Su-mei

(Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education. Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The distributions and pollution status of heavy metals in the suspended particles were investigated in the Wanquan and Wenchang/Wenjiao estuaries and the coastal area of eastern Hainan in July 2008. The concentrations of metal elements (Al, Fe, Mn, Cr, Cu, Ni, V, Zn) were determined by ICP-AES after microwave digestion. Multivariate statistical methods (e. g. correlation analysis and principal factor analysis) were used to discuss the major factors controlling the variability of heavy metal concentrations and the pollution status in those areas. There was an obvious variability in particulate metal concentrations from upstream to estuary of both rivers. The concentrations first increased with increasing salinity and then decreased with further increase of the salinity; the concentrations were slightly higher at the coastal area in the east. The variability of particulate metal concentrations reduced significantly after the normalization by Al, indicating the effects of grain size. Enrichment factor calculation results showed that there was heavy metal pollution (especially Cu, Ni) in the Wenchang/Wenjiao River and estuary, while the situation in Wanquan River remained at pristine level. Concentrations of particulate metals in the study area were mainly controlled by source geology and provenance, as well as contamination from the discharge of waste water and biological activity.

Key words: heavy metal; suspended particles; distribution; pollution status; Wanquan and Wenchang/Wenjiao estuary; coastal area of eastern Hainan

在环境地球化学研究中, 重金属主要是指Hg、Cd、Pb、Cr及Cu、Co、Ni和Sn等^[1], 多为非降解型有毒物质, 具有环境危害持久性、地球化学循环性和生态风险性等特点^[2]。在没有人为污染情况下, 水体中重金属含量很低, 但近年来工业废水废气的排放致使环境中重金属含量迅速升高。在污染比较严重的河流、河口及近岸地区, 重金属主要来源于生活污水、工业废水的排放^[3], 同时地表径流^[4]及农药、化肥^[5]的使用也是重金属的一个重要来源。水体中重金属被生物体吸收、富集后, 可沿生物链传递, 最终在人体积累, 造成人体中毒^[6]。悬浮颗粒物是重金属的主要携带者, 在重金属的迁移转

化过程中起着重要作用^[7]。一般悬浮颗粒物中重金属浓度是沉积物中的几倍, 是水体中溶解态的几百倍^[8], 了解水体悬浮颗粒物重金属的环境行为能更好地认识水体生态系统中重金属的环境效应。

目前我国对颗粒物中重金属的研究主要集中在长江^[5,9,10]、黄河^[11~13]、珠江^[14]及污染较为严重的河口海湾^[15]等地区, 海南亚热带河流万泉河、文

收稿日期: 2012-07-19; 修订日期: 2012-09-27

基金项目: 国际科技合作项目(2007DFB20380); 国家自然科学基金项目(41176096)

作者简介: 辛成林(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为痕量元素的海洋生物地球化学, E-mail: hxxinchenglin@163.com

* 通讯联系人, E-mail: renjingl@ouc.edu.cn

昌/文教河颗粒态重金属的研究则少有报道. 本研究以 2008 年万泉河、文昌/文教河及海南东部近岸海域颗粒物中重金属为例, 探讨其颗粒态重金属分布特点及影响因素, 以期对海南东部河流的治理、保护提供基础依据.

1 材料与方法

1.1 调查水域概况

万泉河、文昌/文教河位于海南东部, 全年降水集中在 5 ~ 11 月, 水量充足^[16]. 表 1 给出万泉河、文昌/文教河基本水文数据, 从中可以看出万泉河径

流量及输沙量远大于文昌/文教河. 万泉河上游分南北两支, 分别发源于琼中县五指山和风门岭, 至琼海市龙江河口咀合流, 在博鳌港入海, 博鳌地区以种植业和渔业为主, 污染少^[17]; 文昌河发源于琼山县斗牛岭, 文教河发源于琼山市大坡镇文德村, 分别在八门湾及清澜港入海, 流域内植被主要为椰子林蒲桃群落和红树林群落^[18], 八门湾内布满养殖区, 生活及养殖排污致使河水浑浊、呈黄色^[19]. 2008 年海南省环境状况公报显示, 万泉河水质达到优级, 优于 II 级标准; 文昌/文教河水质劣于 III 类标准, 比 2007 年略有下降.

表 1 万泉河、文昌/文教河水文参数^[16, 20]

Table 1 Hydrographic parameters of Wanquan River and Wenchang/Wenjiao River

河流	流域面积/km ²	河流长度/km	平均径流量/m ³ ·s ⁻¹	输沙量/t·a ⁻¹
万泉河	3 628	163	163.9	392 × 10 ⁴
文昌/文教河	903	56/37	25.4	10 × 10 ⁴

1.2 采样及分析方法

2008 年 7 月 23 日 ~ 8 月 4 日进行采样调查, 调查区域包括万泉河及河口、文昌/文教河及河口、海南东部清澜港近岸红树林区域及长圻港东部近岸水域等. 采样站位如图 1.

河流及河口样品用 1 L Nalgene 采样瓶在船头逆流方向水下 30 ~ 40 cm 处采集, 现场温、盐数据由多参数水质仪测得. 样品采集后尽快带回实验室于简易洁净工作台中用 0.45 μm 醋酸纤维膜 (经 pH = 2 盐酸浸泡并用 Milli-Q 水浸泡至中性, 烘干至恒重, 称重) 过滤, 滤膜冷冻保存, 40℃ 烘干至恒重并称量, 计算得到悬浮颗粒物 (SPM) 浓度. 颗粒物样品在聚四氟乙烯消化罐中加入 HCl-HNO₃-HF 混酸进行微波消解, 消解完全后蒸至近干, 用 1% HNO₃ 定容, 分析各金属元素含量.

消解液用 ICP-AES (iCAP6300, Thermofisher Scientific, USA) 测定 Al、Fe、Mn、Cr、Ni、V、Zn、Cu 等元素. 为检验样品消化与分析的精密度与准确度, 取国家近岸沉积物标准 (GSD-9) 进行消化分析 ($n = 5$), 所测重金属回收率均在 92% 以上, 精密度均小于 2.6%, 能满足实验需要.

2 结果与讨论

2.1 万泉河、文昌/文教河河流、河口及海南东部近岸颗粒态重金属的分布

2.1.1 颗粒态重金属浓度的分布

研究区域内表层温度、盐度、SPM、Al、Fe 及重金属含量范围及平均值如表 2 所示. 从中可看出

海南处于亚热带气候, 采样区域平均气温均高于 29℃, SPM 在空间分布呈现出文昌/文教河最高、万泉河次之、近岸最低的特点, 万泉河及文昌/文教河各金属元素平均浓度略高于东部近岸.

图 2 给出了万泉河、文昌/文教河及海南东部近岸悬浮颗粒物中 Al、Fe 及重金属浓度变化, 其中万泉河、文昌河、文教河分别以 B7、1 及 W14 站位为河流/河口的分界点. 河流/河口分界点的选择以盐度低于检出限为基准, 上游以距河口距离为横坐标, 河口以盐度为横坐标.

由图 2 可以看出, 万泉河及文昌/文教河上游 Al、Fe 及重金属浓度相对高于下游河口及东部近岸, 万泉河 B9 站位 Al、Fe 及重金属出现低值; 在河口, Al、Fe 及重金属浓度随着盐度增加先降低后升高, 而 SPM 先升高后降低. 金属元素这种分布趋势可能是受颗粒物粒径影响. 水体中重金属容易被细颗粒吸附^[21], 同时 Al、Fe 含量也随颗粒物粒径减小而线性增加^[22], Al、Fe 及重金属均在细颗粒中含量较高. 在河口咸淡水强烈混合区, 盐水入侵有利于泥沙中细颗粒絮凝^[23], 造成细颗粒含量减小^[10], 同时盐度锋形成的重力环流又会导致泥沙富集, 形成最大浑浊带^[24], 粗颗粒含量增加, 所以金属浓度会出现最低值; 当盐度继续增加时, 大颗粒受沉积速率及水动力条件影响会逐步沉降^[25], 此时细颗粒含量会逐渐增加, 因此下游地区金属浓度呈现出先降低后升高的趋势. B9 出现的低值主要是由于自然因素 (如颗粒物粒径) 变化造成的 (见 2.1.2 节讨论).

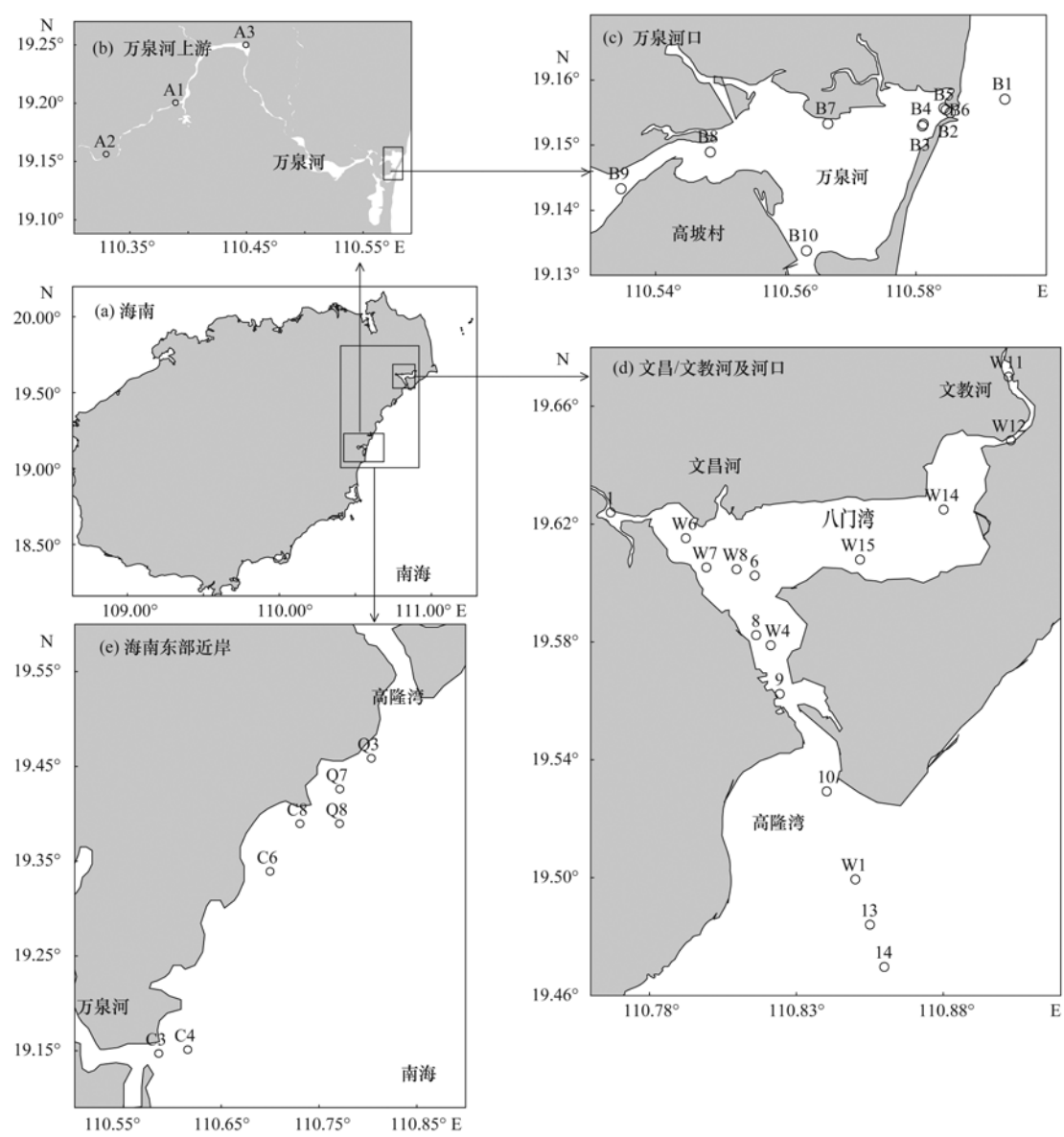


图1 海南万泉河、文昌/文教河河流、河口及海南东部近岸调查站位示意

Fig. 1 Location of sampling sites in the Wankan and Wenchang/Wenjiao rivers and their estuaries and eastern coastal area of Hainan

2.1.2 归一化后重金属分布

颗粒物中重金属分布受颗粒物粒径、来源等因素影响^[26],在环境地球化学中通常采用参比元素对金属进行归一化以消除这种差别、突出人为活动(如污染)对环境状况的影响,以Al为参比元素对其它元素进行校正后如图3所示。

通过图3可以看出,万泉河、文昌/文教河及海南东部近岸Fe归一化后分布无显著差异,其它重金属归一化后在文昌/文教河变化较大,并且文昌/文教河Cr浓度显著高于万泉河;万泉河重金属分布比较均匀,只有Zn、V在河口略微升高;除个别站位外,海南东部近岸归一化后重金属含量基本在万泉河、文昌/文教河河口含量之间变动。万泉河重

金属的归一化分布表明其浓度分布主要受自然因素(如粒径)影响,文昌/文教河重金属归一化后变化则可体现流域的污染状况。文昌/文教河流经文昌市,据估算排入河流中的生活及工业用水可达 $14.7 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ^[27],而生活污水、工业废水排放是重金属污染的一个重要来源^[4]。同时流域内布满养殖区,采样时发现水体呈现黄色,2008年海南省环境状况公报也显示文昌/文教河水质劣于Ⅲ类标准。以上信息均表明,文昌/文教河受到流域养殖及人为活动污染,所以重金属归一化值会有较大波动。文昌市土壤中Cr污染严重,浓度已经超过中国及世界土壤背景值^[28],是造成Cr归一化值明显高于万泉河的主要原因。万泉河流经博鳌市,城市生活污水

表 2 万泉河、文昌/文教河河流、河口及海南东部近岸温度、盐度、SPM 及各金属元素浓度变化范围¹⁾
Table 2 Variation of temperature, salinity, SPM and the concentrations of metals in the Wanquan River and Wenchang/Wenjiao River and their estuaries and the eastern coastal area of Hainan

项目	万泉河		文昌/文教河		近岸
	河流	河口	河流	河口	
温度/℃	29.3 ~ 32.5 (31.4 ± 1.3)	26.2 ~ 30.4 (29.2 ± 1.5)	30.6 ~ 33.9 (32.5 ± 1.7)	29.0 ~ 34.6 (31.5 ± 1.9)	27.9 ~ 30.5 (29.5 ± 0.9)
盐度	0	0 ~ 33.6 (23.0 ± 11.1)	0	0 ~ 33.8 (18.4 ± 11.8)	30.6 ~ 33.5 (32.1 ± 1.2)
SPM /mg·L ⁻¹	3.3 ~ 16.2 (9.3 ± 5.1)	6.5 ~ 9.8 (8.2 ± 1.4)	17.8 ~ 25.9 (20.8 ± 4.5)	1.7 ~ 21.6 (12.7 ± 6.3)	1.9 ~ 4.7 (3.5 ± 1.2)
Al/%	3.3 ~ 8.9 (6.9 ± 1.9)	2.4 ~ 7.1 (4.7 ± 1.7)	6.2 ~ 7.7 (6.8 ± .08)	1.2 ~ 7.1 (3.4 ± 1.8)	1.1 ~ 3.1 (2.1 ± 0.8)
Fe/%	1.5 ~ 4.7 (3.7 ± 1.1)	1.2 ~ 4.6 (2.9 ± 1.2)	3.1 ~ 6.3 (4.2 ± 1.8)	0.6 ~ 6.7 (2.1 ± 1.8)	0.3 ~ 1.9 (1.2 ± 0.5)
Mn/mg·kg ⁻¹	145.7 ~ 956.4 (518.3 ± 284.2)	30.2 ~ 731.3 (377.4 ± 330.7)	393.1 ~ 1 112.1 (621.9 ± 424.7)	75.1 ~ 796.1 (329.5 ± 228.5)	165.1 ~ 481.9 (339.5 ± 105.7)
Cr/mg·kg ⁻¹	64.1 ~ 195.1 (138.5 ± 55.9)	52.5 ~ 138.2 (92.1 ± 34.1)	117.3 ~ 189.2 (184.8 ± 6.5)	56.9 ~ 440.8 (137.7 ± 98.9)	20.5 ~ 81.5 (62.1 ± 20.9)
Cu/mg·kg ⁻¹	18.2 ~ 96.2 (50.1 ± 26.1)	10.7 ~ 67.1 (35.4 ± 20.9)	37.3 ~ 43.2 (40.3 ± 4.2)	7.2 ~ 76.9 (37.6 ± 25.8)	16.4 ~ 54.3 (34.1 ± 13.4)
Ni/mg·kg ⁻¹	6.5 ~ 45.6 (23.1 ± 13.9)	4.1 ~ 38.4 (17.1 ± 11.4)	59.7 ~ 174.3 (117.1 ± 81.1)	10.5 ~ 300.4 (65.5 ± 83.7)	5.8 ~ 33.1 (15.4 ± 13.1)
V/mg·kg ⁻¹	59.1 ~ 167.7 (111.3 ± 33.9)	51.1 ~ 197.2 (126.8 ± 57.8)	68.9 ~ 103.6 (82.6 ± 18.5)	33 ~ 105.3 (62.1 ± 21.9)	23.7 ~ 119.3 (71.8 ± 31.7)
Zn/mg·kg ⁻¹	69.1 ~ 165.3 (134.4 ± 34.5)	67.7 ~ 174.7 (123.5 ± 46.5)	71.3 ~ 268.9 (152.1 ± 103.6)	33.2 ~ 112.9 (70.5 ± 32.1)	35.6 ~ 94.3 (62.1 ± 20.2)
样本数	7	6	3	13	7

1) 括号内数值表示平均值及标准偏差

可能是造成河口地区 Zn、V 升高的重要原因。海南东部近岸受人为活动影响较小,重金属归一化后的分布主要体现了河流输送对海南东部近岸的影响。

2.2 元素富集因子及污染状况

富集因子是分析污染物来源和污染程度的有效手段,可表示为^[29]:

$$EF = \left[\frac{(c_i/c_n)_{\text{sample}}}{(c_i/c_n)_{\text{baseline}}} \right] \quad (1)$$

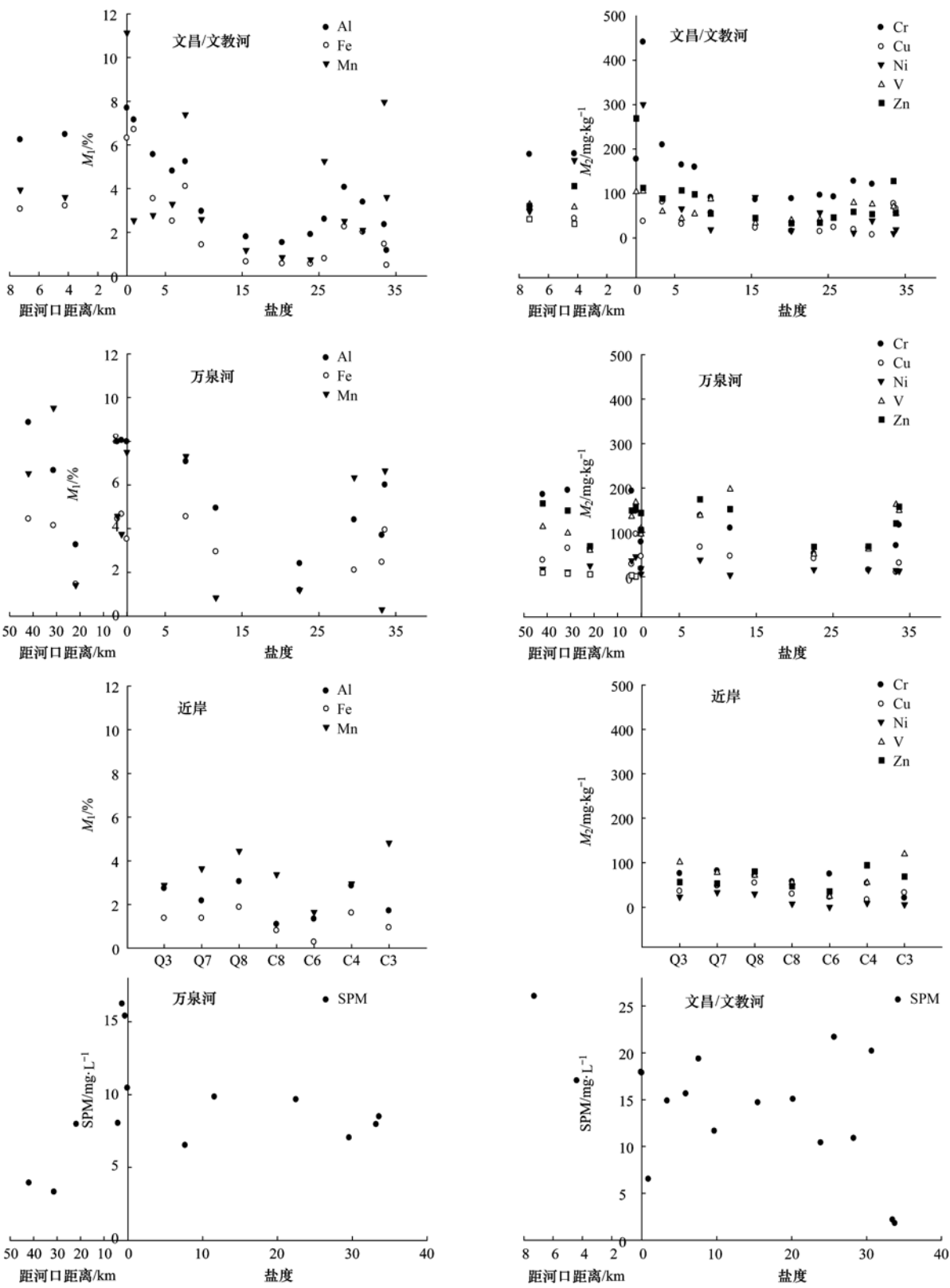
式中, c_i 是元素 i 的浓度, c_n 是参考元素的浓度, sample 和 baseline 分别表示样品和背景。可用作参考元素的有 Al、Fe、Sc、稀土元素等,由于 Al 溶解度低、迁移能力小、受人为影响轻,所以采用 Al 作为参考元素^[22]。按照 Southerland^[30]划分标准,将污染程度划分为 5 个等级:① $EF < 2$ 为无 ~ 弱污染;② $2 < EF < 5$ 为中污染;③ $5 < EF < 20$ 为显著污染;④ $20 < EF < 40$ 为高度污染;⑤ $EF > 40$ 为极度污染。

Zn、Cu 采用朱维晃等^[31]所测海南土壤值作为背景值,由于海南土壤中其余元素背景值研究较少,故采用中国大陆土壤背景值^[32],据公式(1)计算得各重金属元素 EF 值。从图 4 中可以看出,在文昌/

文教河及万泉河陆源元素 Fe、Mn 富集因子均在 1 左右;重金属在文昌/文教河富集高于万泉河, Ni、Cr 在文昌/文教河部分站位已经达到显著污染水平,V、Cu、Zn 为弱污染,万泉河重金属 EF 值基本处于 2 以下,属于弱污染。文昌/文教河污染主要来源于城市排污及养殖活动等^[19];万泉河流速较急,能快速地将污染物带走,且博鳌市属于旅游城市,工业污染少,其周边地区则主要以第一产业为主,虽然利用效率低,但污染相对较轻^[17]。东部近岸 Fe 未见富集而 Mn 则相对富集,其它重金属富集因子也均大于 2。除陆源输入影响外,生物活动对近岸金属的富集有重要影响,Mn、Cu、Zn 等元素是生物必需微量元素^[33,34],被生物吸收后参与生物体内循环而最终在有机体内积累,导致元素相对富集。研究表明大洋微生物体内 Mn、Cu、Zn 浓度可达到海水表层浓度的百万倍^[33]。

2.3 影响颗粒物化学组成的主要因素

悬浮颗粒物中许多金属具有相似的行为,为了探讨重金属的来源及其在环境中的行为,选择受人为活动扰动比较严重的文昌/文教河上游至河口之间的调查数据进行元素间相关性分析及因子分析。



M_1 为 Al、Fe 和 Mn, M_2 为 Cr、Cu、Ni、V 和 Zn; Mn 为乘 100 后浓度

图2 万泉河、文昌/文教河河流、河口及海南东部近岸颗粒态金属及 SPM 含量分布

Fig. 2 Distribution of particulate metal and SPM concentrations in Wankan and Wenchang/Wenjiao Rivers and their estuaries and the eastern coastal area of Hainan

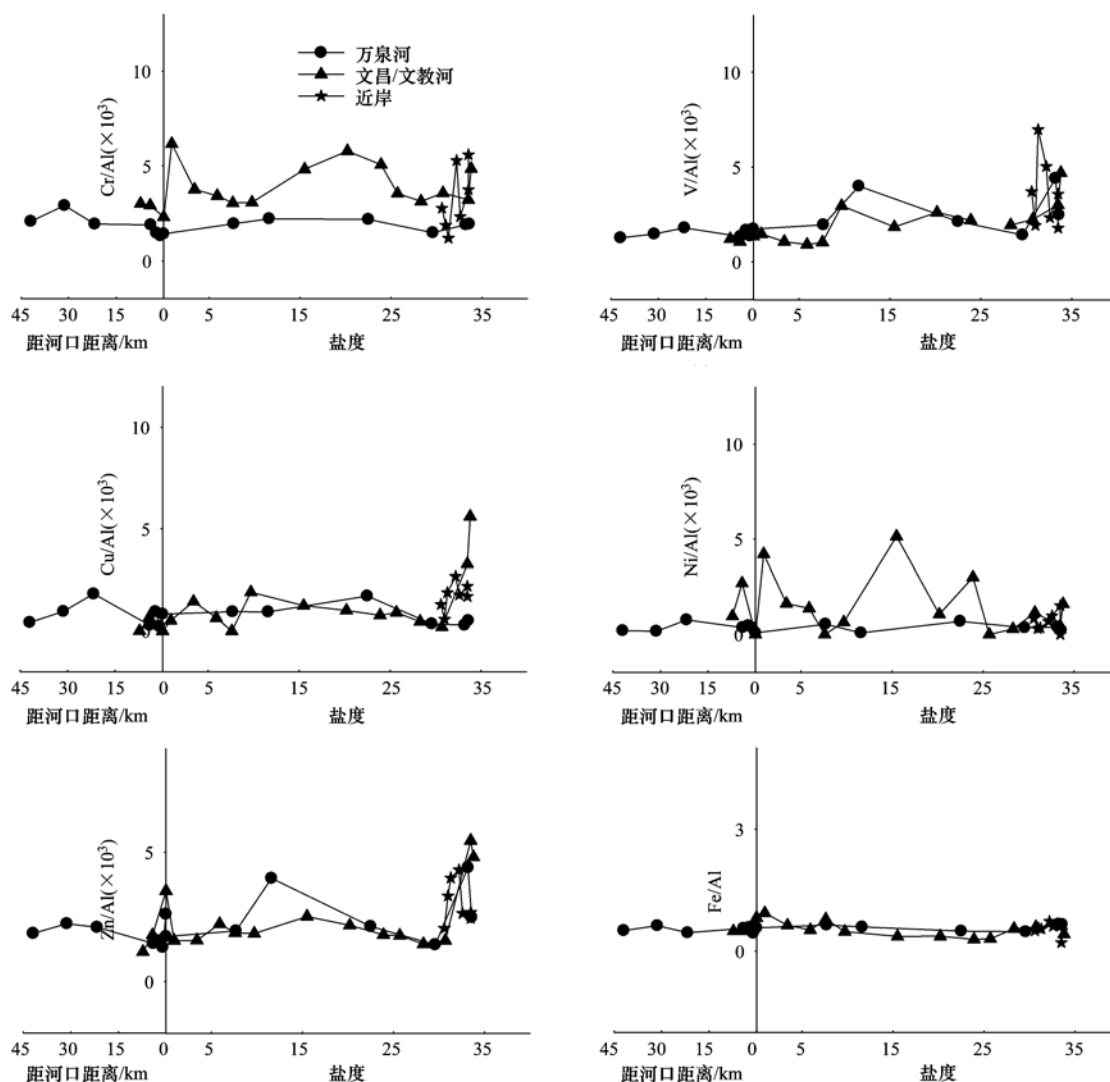


图3 万泉河、文昌/文教河河流、河口及东部近岸重金属归一化后分布

Fig. 3 Distribution of heavy metals normalized to Al in the suspended particles in Wanquan and Wenchang/Wenjiiao Rivers and their estuaries and the eastern coastal area of Hainan

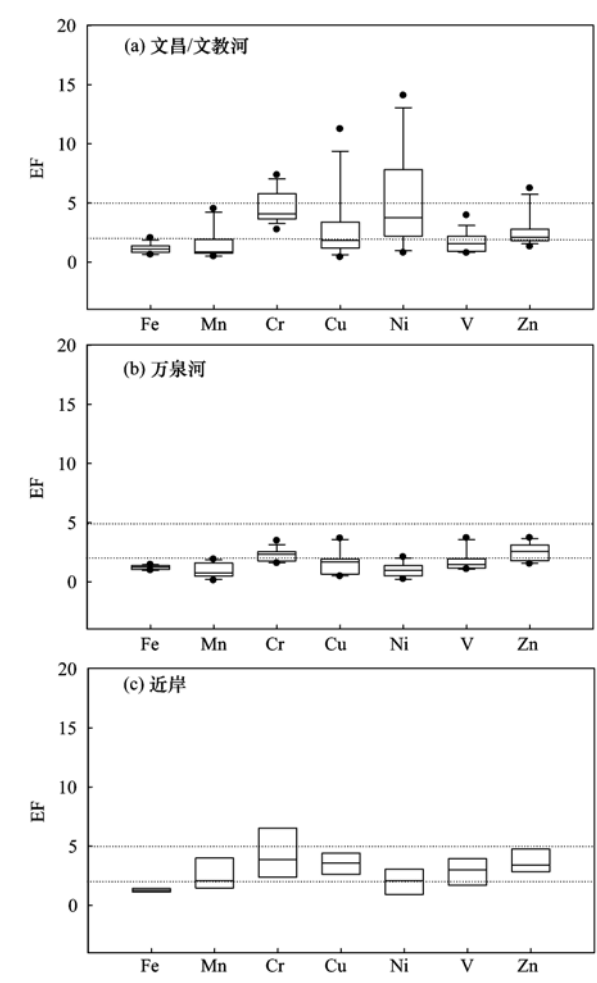
相关性分析结果如表3所示。

由表3可以看出,作为典型的陆源元素,文昌/文教河 Al、Fe 之间显著相关,而 Mn 与 Al、Fe 相关性较低,可能是因为 Mn 对水体氧化还原环境比较敏感^[35]。元素 Cr、V、Zn 与 Al、Fe 相关系数达到 0.7 以上,表现出较强的陆源特性。按照 EF 值将元素来源分为三类^[36]:EF 值在 1 左右为陆源;EF > 10 为人为来源;EF 介于 1 ~ 10 则为混合来源。文昌/文教河重金属富集因子均介于 1 ~ 10 之间,所以 Cr、V、Zn 来源应以陆源为主,但同时也受人为污染影响。Cu 是生物必需微量元素,在颗粒物有机物结合态中所占比例较大^[34],在表 3 中 Cu 与 Al 相关性差而与 Mn、POP 有较弱相关性,表明 Cu 受陆源影响弱,可能是受水体氧化还原环境及生活、养殖污

水影响。

利用因子分析方法简要分析文昌/文教河颗粒态重金属组成的主要影响因素。提取因子分析中能够解释总方差 86% 的 3 个因子进行分析,如表 4。

因子 1 的方差贡献为 49%,远高于其它因子,因而因子 1 对颗粒态重金属化学的组成及分布具有决定意义。因子 1 以 Al、Fe 等为主要载荷;文昌/文教河处于热带湿润高温环境,化学风化作用较强^[37],而海南岛化学风化速率又高于世界平均水平^[38],风化的岩石、土壤碎屑中 Al 主要存在于矿物晶格中,所以该因子代表了流域的侵蚀作用,表明文昌/文教河颗粒态重金属主要受颗粒物来源、组成的影响。通过表 3 各参数间相关性可以看出,Al 与 Mn、Cr、V、Zn 之间显著相关,可知因子 1 同时



由于近岸数据少(7 个),所以图中未显示出误差棒;
图中虚线分别表示 EF 为 2 和 5

图 4 万泉河、文昌/文教河河流、河口及东部近岸
颗粒态重金属富集因子箱式图

Fig. 4 Box plot of enrichment factor of particulate heavy metal
in Wanshan and Wenchang/Wenjiao Rivers and their estuaries
and the eastern coastal area of Hainan

部分支配着 Mn、Cr、V、Zn 的来源. 在因子 2 中以 Mn、Ni、Cu、POP 为主, 占总方差贡献的 23%. Mn 的分布易受氧化还原环境影响, 在还原环境中易从颗粒物中迁出, Mn 与 Al 的相关性较差, 表明 Mn 已经受到水体环境的影响. 文昌/文教河养殖区水体中各种营养元素已经富集, 其中 DON(溶解有机氮)平均占到 TDN(溶解总氮)的 72%^[27], 养殖过程中饲料投放、虾苗排泄及尸体分解等引入的大量有机物质分解也使得水体中 CH₄ 处于过饱和状态^[39], 而水体中较高的 DOC 和 POC 浓度也主要是受到周边的养殖及红树林影响^[18], 另外据估算, 文昌市排入河流中的生活污水及工业废水可达 $14.7 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ^[27], 以上信息表明生活及养殖排污向水体中排放大量有机质, 有机质降解会导致水体环境的改变, 最终影响颗粒物中 Mn 的循环, 同时城市排污及养殖使用的药物会造成重金属含量增加, 从表 4 中也可以看出, 因子 2 同时支配着 Cu、Zn、Ni 的来源, 所以认为因子 2 体现了水体氧化还原环境改变及生活养殖污水排放的影响. 因子 3 的贡献为 14%, 以 BSi(生物硅)、POP 为主, BSi 主要由于硅藻、放射虫和海绵骨针等吸收溶解态硅酸盐形成硅质细胞壁而转化成颗粒态生物硅^[40,41], 以 BSi 为主要载荷代表水体中硅质细胞生物的富集作用.

2.4 与世界其它河流对比

表 5 给出文昌/文教河、万泉河与世界其它河流颗粒态重金属浓度的对比. 多瑙河是欧洲污染比较严重的河流, 颗粒物中 Zn 的浓度达到文昌/文教河的 16 倍, 美国密西西比河 Zn 浓度也要高于万泉河, Cr 浓度则相对较低. 文昌/文教河污染较为严重, 但重金属浓度仍低于污染比较严重的长江、珠

表 3 文昌/文教河金属元素与其它参数间相关性系数矩阵¹⁾

	Table 3 Correlation coefficients matrix between metal and other parameters in Wenchang/Wenjiao River									
	Al	Fe	Mn	Cr	Cu	Ni	V	Zn	BSi	POP
Al	1									
Fe	0.923 **	1								
Mn	0.603 *	0.605 *	1							
Cr	0.728 **	0.817 **	0.100	1						
Cu	0.007	-0.038	-0.406	0.146	1					
Ni	0.412	0.449	-0.344	0.823 *	0.360	1				
V	0.723 **	0.773 **	0.314	0.630 *	0.082	0.408	1			
Zn	0.781 **	0.799 **	0.821 **	0.377	-0.187	0.043	0.622 *	1		
BSi	-0.099	-0.147	0.063	-0.356	0.132	-0.290	-0.337	0.223	1	
POP	0.318	0.110	-0.210	0.271	0.426	0.420	0.005	0.363	0.157	1

1) 表中数据为相关系数 r, * 表示在 0.05 水平显著相关; ** 表示在 0.01 水平显著相关

江,高于泥沙量最大的黄河.与海南岛处在同纬度地区的南帕拉伊巴河,Cr 浓度低于万泉河及文昌/文教河而 Cu、Zn 浓度相对较高,主要与它们所处的不同的土壤背景及周边人为活动等影响因素有关.文昌/文教河几乎所有重金属浓度都高于中国大陆土壤背景值,通过上文分析也发现多种元素呈现出轻度污染,应引起相关部门注意.

表 4 文昌/文教河颗粒态重金属因子分析结果

Table 4 Result of principal factor analysis for particulate heavy metals of Wenchang/Wenjiao River

项目	因子 1	因子 2	因子 3
Fe	0.975	-0.112	-0.084
Al	0.954	-0.072	0.044
Cr	0.828	0.392	-0.315
Zn	0.795	-0.488	0.098
V	0.828	0.077	0.335
Mn	0.538	-0.782	0.090
Ni	0.528	0.742	-0.258
Cu	0.025	0.688	0.345
BSi	-0.120	-0.123	0.897
POP	0.290	0.600	0.457

表 5 文昌/文教河及万泉河颗粒态重金属与世界其它河流对比

Table 5 Comparison of heavy metal in the suspended particles between Wenchang/Wenjiao River, Wanquan River and other rivers

河流	Cr	Cu	Ni	V	Zn	文献
文昌/文教河	163	36	97	64	89	本研究
万泉河	117	43	20	113	129	本研究
长江	250	148	67	—	315	[5]
黄河	94	22	52	—	52	[11]
珠江	70	51	61	—	212	[14]
南帕拉伊巴河	81	75	—	—	297	[42]
多瑙河	103	328	—	34	1 934	[43]
密西西比河	80	45	55	—	193	[44]
中国大陆土壤背景值	54	20	23	76	67	[30]

3 结论

(1)文昌/文教河及万泉河颗粒态重金属分布随盐度增加呈现先降低后升高的趋势.归一化后重金属在万泉河分布均匀,文昌/文教河变化较大,主要体现了水体污染状况.

(2)由颗粒物中各重金属富集因子计算结果表明,文昌/文教河 Cr、Ni 处于中度污染水平,Cu、V、Zn 污染较轻;重金属在万泉河污染较轻.

(3)元素相关性及因子分析表明,在影响颗粒物化学组成的主要因素中,岩石、土壤风化碎屑来源占主要地位,同时也受到水体氧化还原环境改变及生活养殖污水排放的影响.

致谢:衷心感谢华东师范大学河口海岸学国家重点实验室、国家海洋局第二海洋研究所、海南省

海洋开发规划设计研究院以及中国海洋大学海洋生物地球化学实验室成员在航次样品采集、实验室样品分析和数据分析讨论过程中给予的帮助.感谢中国海洋大学化学化工学院李铁老师在样品测定过程中的指导.

参考文献:

- [1] 张丽洁,王贵,姚德,等.近海沉积物重金属研究及环境意义[J].海洋地质动态,2003,19(3):6-9.
- [2] 朱伯万,薛怀友.江苏扬中长江漫滩沉积物重金属垂向分布特征及其背景值确定方法[J].江苏地质,2006,30(3):187-190.
- [3] Li X D, Wai O W H, Li Y S, *et al.* Heavy metal distribution in sediment profiles of the Pearl River estuary, South China[J]. Applied Geochemistry, 2000, 15(5): 567-581.
- [4] Attrill M J, Thomes R M. Heavy metal concentrations in sediment from the Thames Estuary, UK[J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, 30(11): 742-744.
- [5] Song Y X, Ji J F, Mao C P, *et al.* Heavy metal contamination in suspended solids of Changjiang River—environmental implications[J]. Geoderma, 2010, 159(3-4): 286-295.
- [6] 李然,李嘉,赵文谦.水环境中重金属污染研究概述[J].四川环境,1997,16(1):18-22.
- [7] Turner A, Millward G E. Suspended particles: their role in estuarine biogeochemical cycles[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, 55(6): 857-883.
- [8] 池俏俏,朱广伟.太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物中重金属的含量[J].环境化学,2005,24(5):582-585.
- [9] Zhang J. Heavy metal compositions of suspended sediments in the Changjiang (Yangtze River) estuary: significance of riverine transport to the ocean[J]. Continental Shelf Research, 1999, 19(12): 1521-1543.
- [10] Che Y, He Q, Lin W Q. The distributions of particulate heavy metals and its indication to the transfer of sediments in the Changjiang Estuary and Hangzhou Bay, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, 46(1): 123-131.
- [11] Huang W W, Jing Z, Zhou Z H. Particulate element inventory of the Huanghe (Yellow River): A large, high-turbidity river[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56(10): 3669-3680.
- [12] 丁鲁刚,胡剑锋,郭博书.清水河地段黄河悬沙表层沉积物中重金属本底值测定[J].内蒙古工业大学学报(自然科学版),1999,18(4):304-308.
- [13] Qiao S Q, Yang Z S, Pan Y J, *et al.* Metals in suspended sediments from the Changjiang (Yangtze River) and Huanghe (Yellow River) to the sea, and their comparison[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 74(3): 539-548.
- [14] Zhang J, Liu C L. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China—weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, 54(6): 1051-1070.
- [15] 黄财宾,李云海,陈坚,等.泉州湾悬浮颗粒物中重金属的分布特征及其影响因素[J].环境科学,2010,31(5):1167-

- 1175.
- [16] 王宝灿, 陈沈良, 龚文平, 等. 海南岛港湾海岸的形成与演变[M]. 北京: 海洋出版社, 2006. 75-104.
- [17] 陈鹏, 高建华, 朱大奎, 等. 海岸生态交错带景观空间格局及其受开发建设的影响分析——以海南万泉河口博鳌地区为例[J]. 自然资源学报, 2002, **17**(4): 509-514.
- [18] 田丽欣, 吴莹, 林晶, 等. 冬季海南省东北部河流及近岸海区有机碳的分布特征[J]. 热带海洋学报, 2010, **29**(5): 136-141.
- [19] 任景玲, 姜喆, 张桂玲, 等. 海南万泉河、文昌/文教河口溶解态铝的分布及季节差异[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2011, **41**(S1): 283-290.
- [20] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志第十一分册[M]. 北京: 海洋出版社, 1994. 59-78.
- [21] Soto-Jiménez M F, Pérez-Osuna F. Distribution and normalization of heavy metal concentrations in mangrove and lagoonal sediments from Mazatlán Harbor (SE Gulf of California) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, **53**(3): 259-274.
- [22] 刘素美, 张经. 沉积物中重金属的归一化问题——以 Al 为例[J]. 东海海洋, 1998, **16**(3): 48-55.
- [23] Sondi I, Juračić M, Pravdić V. Sedimentation in a disequilibrium river-dominated estuary: the Raša river estuary (Adriatic Sea, Croatia) [J]. Sedimentology, 1995, **42**(5): 769-782.
- [24] 茅志昌. 长江河口盐水入侵锋研究[J]. 海洋与湖沼, 1995, **26**(6): 643-649.
- [25] Zhang J, Huang W W, Wang Q. Concentration and partitioning of particulate trace metals in the Changjiang (Yangtze River) [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 1990, **52**(1-2): 57-70.
- [26] Loring D H. Normalization of heavy-metal data from estuarine and coastal sediments[J]. ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil, 1991, **48**(1): 101-115.
- [27] Liu S M, Li R H, Zhang G L, *et al.* The impact of anthropogenic activities on nutrient dynamics in the tropical Wenchanghe and Wenjiaohe Estuary and Lagoon system in East Hainan, China[J]. Marine Chemistry, 2011, **125**(1-4): 49-68.
- [28] 魏志远, 郭彬, 漆智平. 海南省文昌市水稻土重金属污染评价[J]. 安徽农业科学, 2009, **37**(35): 17616-17619.
- [29] Li Y H. Geochemical cycles of elements and human perturbation [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1981, **45**(11): 2073-2084.
- [30] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. Environmental Geology, 2000, **39**(6): 611-627.
- [31] 朱维晃, 杨元根, 毕华, 等. 海南土壤中 Zn, Pb, Cu, Cd 四种重金属含量及其生物有效性的研究[J]. 矿物学报, 2004, **24**(3): 239-244.
- [32] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究 [J]. 环境科学, 1991, **12**(4): 12-19.
- [33] Morel F M M, Price N M. The biogeochemical cycles of trace metals in the oceans [J]. Science, 2003, **300**(5621): 944-947.
- [34] 黄薇文, 张经, 刘敏光, 等. 黄河口底质中重金属的存在形式[J]. 山东海洋学院学报, 1985, **15**(1): 137-145.
- [35] Atkinson C A, Jolley D F, Simpson S L. Effect of overlying water pH, dissolved oxygen, salinity and sediment disturbances on metal release and sequestration from metal contaminated marine sediments[J]. Chemosphere, 2007, **69**(9): 1428-1437.
- [36] Hsu S C, Wong G T F, Gong G C, *et al.* Sources, solubility, and dry deposition of aerosol trace elements over the East China Sea[J]. Marine Chemistry, 2010, **120**(1-4): 116-127.
- [37] Liu S M, Hong G H, Zhang J, *et al.* Nutrient budgets for large Chinese estuaries [J]. Biogeosciences, 2009, **6**(10): 2245-2263.
- [38] 李丹. 中国东部若干入海河流化学特征与入海通量研究 [D]. 华东师范大学, 2009. 1-7.
- [39] 韩玉, 张桂玲, 赵玉川. 海南东部沿岸河流和潟湖中溶存甲烷的分布及通量[J]. 热带海洋学报, 2012, **31**(2): 87-95.
- [40] 叶曦雯, 刘素美, 张经. 生物硅的测定及其生物地球化学意义[J]. 地球科学进展, 2003, **18**(3): 420-426.
- [41] 李延伟, 刘素美, 朱卓毅, 等. 万泉河口悬浮颗粒态磷和硅的分布特征及收支估算[J]. 海洋学报, 2011, **33**(6): 180-188.
- [42] Salomão M S M B, Molisani M M, Ovalle A R C, *et al.* Particulate heavy metal transport in the lower Paraíba do Sul River basin, southeastern, Brazil [J]. Hydrological Processes, 2001, **15**(4): 587-593.
- [43] Yiğiterhan O, Murray J W. Trace metal composition of particulate matter of the Danube River and Turkish rivers draining into the Black Sea [J]. Marine Chemistry, 2008, **111**(1-2): 63-76.
- [44] Presley B J, Trefry J H, Shokes R F. Heavy metal inputs to Mississippi Delta sediments [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 1980, **13**(4): 481-494.

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