

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第3期

Vol.33 No.3

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

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究	陈颖军,蔡伟伟,黄国培,李军,张干(673)
天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究	王圣杰,张明军,王飞腾,李忠勤(679)
兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究	赵素平,余晔,陈晋北,刘娜,何建军(687)
不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征	杨柳,吴焯,宋少洁,郝吉明(694)
南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析	王红磊,朱彬,沈利娟,康汉青,刁一伟(701)
西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送	李小飞,张明军,李亚举,王圣杰,黄小燕,马潜,马雪宁(711)
海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化	曹秀红,任景玲,张桂玲,张金娥,杜金洲,朱德弟(720)
大辽河口痕量元素砷的河口混合行为	简慧敏,姚庆祯,于立霞,田琳(727)
渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价	徐亚岩,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁(732)
青岛近岸表层海水中 PAHs 的分布特征及物源初步解析	李先国,邓伟,周晓,唐旭利,魏新运,王岩(741)
广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降	孔祥胜,祁士华,黄保健,张原,李杰(746)
上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别	董辰寅,张卫国,王冠,马鸿磊,刘圆,刘莹,叶雷平,俞立中(754)
溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用	王树芳,王丽亚,王晓红,林沛,刘久荣,辛宝东,贺国平(760)
地下水污染风险评估中特征污染物量化方法探讨	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(771)
用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究	高清端,张薛,赵璇,赵刚(777)
菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响	邓可,刘素美,张桂玲,陆小兰,张经(782)
南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响	胡和兵,刘红玉,郝敬峰,安静(794)
上海都市农业村域地表水非点源氮素的时空分异特征	王楠,毛亮,黄海波,张进忠,周培(802)
不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化	何小艳,赵洪涛,李叙勇,连宾,王小梅(810)
新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究	何丽君,马邕文,王金泉,李东亚,王艳(817)
改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制	李宇,刘贤君,张兴旺,雷乐成(825)
卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究	江涛,吴霓,钟艳,江天久(832)
芽孢杆菌 B1 胞外活性物质对球形棕囊藻的溶藻特性研究	李蕾,赵玲,尹平河(838)
底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究	储昭升,张玉宝,金相灿,徐颖,杨红君(844)
新型无极准分子光源深度处理水相中含 N-杂环化合物	叶招莲,汪斌,路娟娟,李峰,张仁熙(849)
La/Ce 掺杂钛基二氧化铅电极的制备及电催化性能研究	郑辉,戴启洲,王家德,陈建孟(857)
DTT 对三苯基甲染料脱色的研究	潘涛,刘大伟,任随周,郭俊,孙国萍(866)
pH 及络合剂对亚铁活化 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 氧化去除活性艳蓝的影响研究	张成,王金泉,马邕文,王艳,黄明智,兰明(871)
臭氧降解高浓度腐殖酸动力学	郑可,周少奇,杨梅梅(879)
采用体积信息熵表征颗粒污泥系统稳定性及其稳定机制	李志华,姬晓琴,李胜,谢磊,赵海龙,王晓昌(885)
活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系	李婷,王毅力,冯晶,徐萌(889)
不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究	周曼,杨昌柱,濮文虹,罗应东,龚建宇(896)
颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响	李志华,曾金锋,李胜,姬晓琴,王晓昌(903)
氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较	郭昌梓,彭党聪,陈雪梅,王丹(910)
生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响	朱海风,周立祥,王电站(916)
2 种不同生物接触氧化工艺性能差异的微生物生态研究	钱殷,全向春,裴元生,马景赞,陶锟(922)
微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响	范分良,黄平容,唐勇军,李兆君,梁永超(932)
干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征	贾晓红,李新荣,周玉燕,李元寿(938)
密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究	王淑芳,王效科,欧阳志云(946)
外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响	莫艳华,汤佳,张仁铎,李方舟(952)
低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素的吸附作用	姚佳佳,康福星,高彦征(958)
液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响	吴威,姜林,陈家军,彭胜(965)
基于 PPI 的土地利用优化研究	武晓峰,李婷(971)
若尔盖高原湿地藻类多样性研究	陈曦,刘如钢,王艳芬,张洪勋(979)
3 种杀真菌剂对 AM 真菌侵染和黄芩生长的影响	贺学礼,王平,马丽,孟静静(987)
崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征	郑艳玲,侯立军,陆敏,谢冰,刘敏,李勇,赵慧(992)
厌氧条件下 2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解	卢晓霞,陈超琪,张姝,欧阳,尹力,吴蔚(1000)
重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响	熊士昌,尹华,彭辉,何宝燕,龙焰,叶锦韶,张娜,彭素芬(1008)
有机农药滴滴涕和毒死蜱生物降解机制的分子模拟研究	林玉珍,曾光明,张斌,陈明,蒋敏,张嘉超,鲁伦慧,刘利锋(1015)
高效木薯渣分解复合菌群 RXS 的构建及其发酵特性研究	何江,毛忠贵,张庆华,张建华,唐蕾,张宏建(1020)
四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征	童子林,刘元璐,胡真虎,袁守军(1028)
上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究	陈闯,邓良伟,信欣,郑丹,刘刈,孔垂雪(1033)
《环境科学》征稿简则(878) 《环境科学》征订启事(1007) 信息(759, 770, 870, 1027)	

海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化

曹秀红¹, 任景玲^{1*}, 张桂玲¹, 张金娥¹, 杜金洲², 朱德弟³

(1. 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100; 2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 3. 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

摘要: 利用氢化物发生原子荧光法对 2006 年 12 月和 2007 年 8 月航次海南东部河流、河口、近岸及地下水中的总溶解态无机砷 (total dissolved inorganic arsenic, TDIAs, $\text{As}^{5+} + \text{As}^{3+}$) 进行了测定. 2006 年 12 月万泉河及河口、文昌/文教河及河口、近岸 TDIAs 的浓度分别为 4.0 ~ 9.4、1.3 ~ 13.3、13.3 ~ 17.3 $\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 2007 年 8 月万泉河及河口、文昌/文教河及河口、近岸、地下水 TDIAs 的浓度分别为 1.6 ~ 15.5、2.4 ~ 15.9、10.8 ~ 17.6、未检出 ~ 41.7 $\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$. 结果表明, 万泉河及文昌/文教河河流、河口 TDIAs 的浓度不存在显著性季节变化, 较我国及世界其它河流、河口偏低, 处于自然状态. 砷在万泉河口和文昌/文教河口混合过程中均表现为保守混合. 以文昌/文教河为例, 初步估算出 2007 年文昌/文教河口地下水向沿岸砷的输送通量为 1 153 $\text{mol} \cdot \text{a}^{-1}$, 约为文昌/文教河入海通量的二分之一, 表明海南东部沿岸地下水也是沿岸海区砷的主要来源之一.

关键词: 总溶解态无机砷; 分布; 季节变化; 海南东部; 河口和近岸

中图分类号: X131.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)03-0720-07

Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan

CAO Xiu-hong¹, REN Jing-ling¹, ZHANG Gui-ling¹, ZHANG Jin-e¹, DU Jin-zhou², ZHU De-di³

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 3. Second Institute of Oceanography, State Ocean Administration, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The concentrations of total dissolved inorganic arsenic (TDIAs) were measured by Hydride Generation-Atomic Fluorescence Spectrometry (HG-AFS). Two cruises were carried out in the river, estuary, coastal area and groundwater of eastern Hainan in December 2006 and August 2007. The concentrations of TDIAs in the Wanquan and Wenchang/Wenjiao rivers and their estuaries, coastal area in December 2006 were 4.0-9.4, 1.3-13.3, 13.3-17.3 $\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The concentrations of TDIAs in the Wanquan and Wenchang/Wenjiao rivers and their estuaries, coastal area in August 2007 were 1.6-15.5, 2.4-15.9, 10.8-17.6 $\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. There was no significantly seasonal variation of TDIAs in the rivers and estuaries during the dry and wet seasons. Compared with other areas in the world, the concentration of TDIAs in the Eastern Hainan remained at pristine levels. TDIAs showed conservatively mixing in the both estuaries. The concentration of TDIAs of groundwater was below detection limit (BDL)-41.7 $\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$. The submarine groundwater discharge (SGD) to the coastal area was estimated in the drainage basin of Wenchang/Wenjiao river based on the average concentration of TDIAs in the groundwater and SGD water discharge, with the value of 1 153 $\text{mol} \cdot \text{a}^{-1}$. Budget estimation indicated that the SGD discharge is one of the important sources of arsenic in the coastal area.

Key words: total dissolved inorganic arsenic; distribution; seasonal variation; Eastern Hainan; estuary and coastal area

砷是自然界普遍存在的痕量元素, 天然水体中主要以 +5 价的砷酸盐和 +3 价的亚砷酸盐形式存在^[1]. 砷及其化合物的毒性主要取决于它的价态, 此外与有机基团结合越多, 其毒性越小^[2]. 地下水中砷的浓度偏高且变化范围较大, 约为 6.7 ~ 66 666.7 $\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[1], 如果地下水中砷的浓度过高会影响人及其他动植物的健康. 砷酸盐与磷酸盐的化学结构相似, 可被浮游植物摄取, 替代磷进入其生化转移系统, 可能阻断生物体的某些重要功能, 如氧

化磷酸化作用^[3], 进而对水体环境造成影响. 世界未污染河流中溶解态砷的背景值为 1.3 ~ 10.7 $\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[1], 而受污染的河流溶解态砷的浓度很高, 如西班牙西南部 Tinto 河流, 由于上游酸性矿山废液

收稿日期: 2011-04-21; 修订日期: 2011-07-18

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

作者简介: 曹秀红 (1985 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为痕量元素海洋生物地球化学, E-mail: caoye. 2143603@163.com

* 通讯联系人, E-mail: renjingl@ouc.edu.cn

的排放,溶解态砷的浓度高达 $10\,667\text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[4]. 河口是生态系统的重要组成部分,是河流与海洋的重要纽带,为鱼类、贝类及水生植物提供所需生存环境^[5],砷在河口的行为很大程度上依赖于河流径流,具有明显的季节变化^[6],浓度一般 $<53.3\text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[1]. 河口中砷的含量会影响生态系统的健康,已成为国际关注的热点问题.

目前国外学者对大洋^[7~9]、河口^[10, 11]研究较多,国内的研究主要涉及陆架边缘海,如黄东海^[12, 13]、渤海^[14, 15],在一些河口及海湾也展开了相关的工作,如长江口^[16]、黄河口^[14]、胶州湾^[17~20]、桑沟湾^[21]等. 对于海南东部河流、河口中砷的研究则尚未见报道. 本研究以海南东部的万泉河及河口、文昌/文教河及河口、近岸海域及地下水为研究对象,初步分析了总溶解态无机砷的分布特征、季节变化及其影响因素,以期为我国河流、河口砷的相关研究提供基础资料.

表 1 万泉河及文昌/文教河水文特征^[25, 26]

Table 1 Hydrographic parameters of Wanquan river and Wenchang/Wenjiao river								
河名	源地	长度 /km	流域面积 /km ²	水量 /m ³ ·s ⁻¹	降雨量/mm			
					春季 (3~5月)	夏季 (6~8月)	秋季 (9~11月)	冬季 (12~2月)
万泉河(琼中)	五指山东坡	163.0	3 683.0	166.0	524.7	775.3	1 102.1	132.3
文教河(海口)	文昌坡口村	56.0	522.0	11.6	332.2	680.7	549.8	89.4
文昌河(海口)	文昌斗牛	37.1	380.9	9.1				

调查区域包括海南东部万泉河及河口、文昌/文教河及河口、海南东部近岸地下水及东部近岸珊瑚礁礁盘以内水域. 分别于 2006 年 12 月和 2007 年 8 月进行了 2 个航次的调查,其中万泉河上游的调查区域 2 个航次差异较大. 采样站位如图 1 所示.

1.2 分析方法

河流及河口样品用 1 L 采样瓶在船头逆流方向采集,现场温、盐数据由多参数水质仪测得. 采样瓶和样品瓶在使用前均用 1:5 盐酸浸泡 1 周,取出后先后用蒸馏水和 Milli-Q 水冲洗干净,装入双层洁净塑料袋中备用. 溶解态无机砷样品采集后在 2 h 内即在简易洁净操作台中用处理过的 Nalgene 滤器和 0.45 μm 醋酸纤维滤膜(经 pH = 2 的盐酸浸泡, Milli-Q 水洗至中性)过滤,过滤后水样立刻放入冰柜低温速冻(−20℃).

总溶解态无机砷样品的测定采用氢化物发生原子荧光光谱法,即在 1 mol·L⁻¹的盐酸介质中,海水中的砷先用预还原剂硫脲-抗坏血酸还原为 As³⁺,然后被 NaBH₄ 还原为 AsH₃,进入原子荧光光谱仪测定. 该法对 TDIAs 的检测限为 0.1 nmol·L⁻¹,对

1 样品采集与分析

1.1 调查水域概况

海南岛属热带季风岛屿型气候,气候变化呈半年交替. 海南岛河流受降水补给,发源于中部山地向四周海岸呈放射状分布^[22]. 其中东部的水系主要包括万泉河和文昌/文教河. 万泉河是海南省第三大河流,发源于琼中县五指山的风门岭,向东流经霖田、乘坡、灯心岭、牛路岭、会山至合石咀,与北源的定安水汇合后,再流经石壁、龙江、嘉积,至博鳌港注入南海^[23]. 文教河是文昌县最大河流,文昌河上游建有 3 个水库,2 条河流汇入八门湾经清澜港入海. 清澜港位于海南岛东北部文昌县境内,有内湾和外湾两部分组成,内湾是八门湾,呈丁字形;外湾是高隆湾,呈椭圆形^[24]. 八门湾潮汐为不规则日潮混合潮,日潮约 15~18 d,半日潮约 11 d^[22]. 具体相关河流水文特征见表 1.

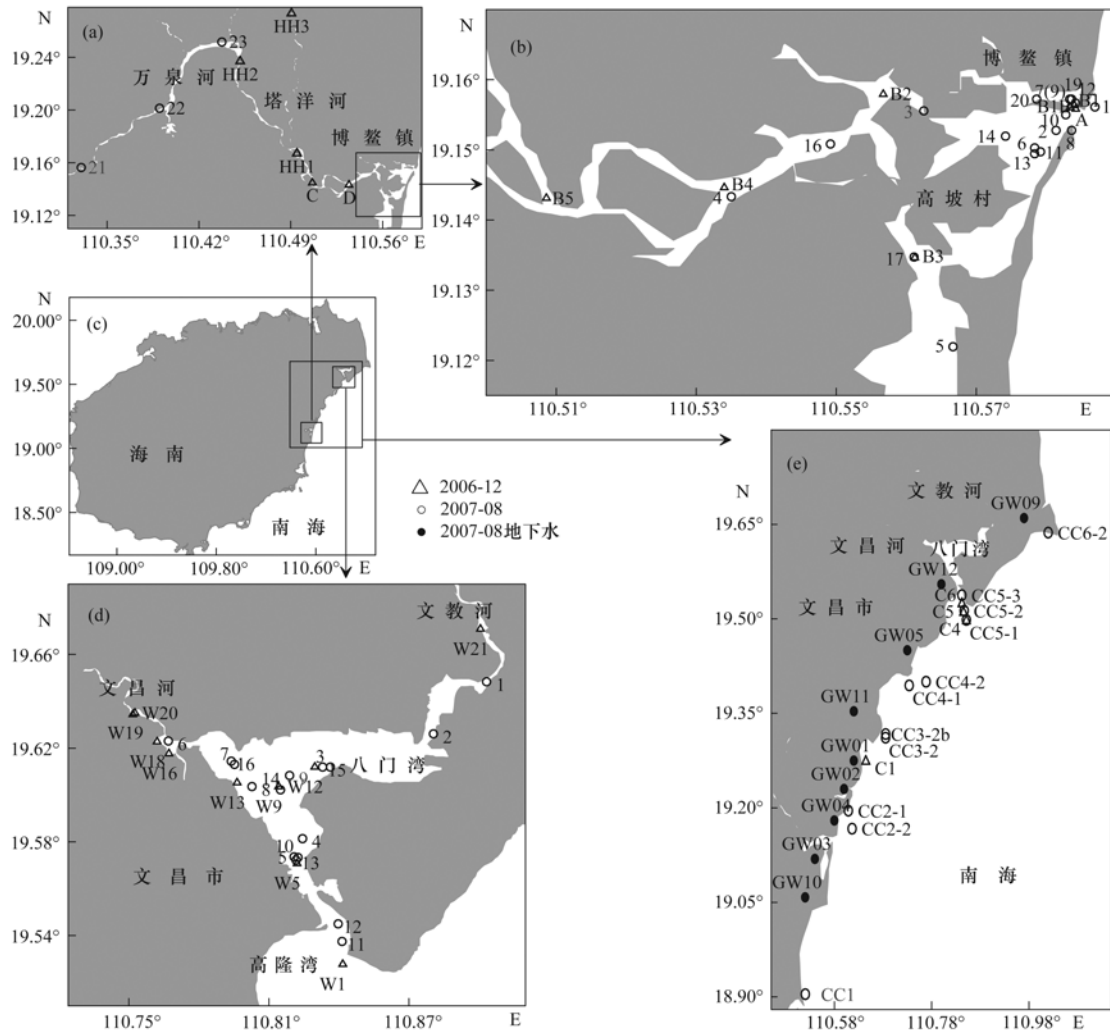
1.3 nmol·L⁻¹样品测定的相对标准偏差 <6.7%.

2 结果与讨论

2.1 万泉河、文昌/文教河总溶解态无机砷的分布及季节变化

表 2 给出了 2006 年 12 月和 2007 年 8 月万泉河及河口、文昌/文教河及河口、海南东部近岸温度、盐度及总溶解态无机砷的浓度范围及平均浓度. 由表 2 看出,万泉河上游 TDIAs 的浓度在 2 次观测期间不存在明显的季节性差异(*t* 检验, *P* < 0.05). 而文昌/文教河上游 TDIAs 的 2006 年 12 月浓度略低于 2007 年 8 月,造成这种季节性差异的主要原因可能是 2 年观测覆盖区域的差异. 2006 年文昌/文教河上游观测区域主要集中在文昌河,而 2007 年的观测则主要集中在文教河. 文昌河上游 TDIAs 的平均浓度(1.7 nmol·L⁻¹)低于文教河上游(4.6 nmol·L⁻¹).

文昌/文教河、万泉河 2 条河流流域岩石土壤类型及风化特点相似,但是 2007 年文昌/文教河中 TDIAs 的浓度显著高于万泉河,这主要是由于万泉



(a) 万泉河; (b) 万泉河口; (c) 海南总图; (d) 文昌/文教河及河口; (e) 2006.12 近岸、2007.8 近岸及地下水

图 1 海南万泉河及河口、文昌/文教河及河口、海南东部近岸海水及地下水采样站位示意

Fig. 1 Sampling locations in the Wanquan and Wenchang/Wenjiao rivers and their estuaries, coastal area and groundwater of eastern Hainan

河与文昌/文教河 2 条河流的流域特点及流域周边人为活动扰动情况不同造成的. 万泉河水质较清, 径流量较大, 且流域内人为活动扰动相对较轻; 而文昌/文教河径流较小, 受降雨、养殖污水等人为活动扰动相对较为严重^[27]. 据 2007 年海南省环境状况公报显示, 文昌/文教河水质均达到或优于Ⅲ类标准, 万泉河的水质均达到或优于Ⅱ类标准^[28]. 由此可见万泉河、文昌/文教河中 TDIAs 的含量主要受河流流域特点及周边人为活动扰动的影响.

2.2 万泉河口、文昌/文教河口总溶解态无机砷的行为

图 2 给出了万泉河口、文昌/文教河口总溶解态无机砷随盐度的变化, 其中万泉河、文昌河、文教河分别以 D 站、6 站、2 站为河流/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. 万泉河口与文昌/文教河口, TDIAs 的浓度在 2 次观测期间均不存在显著性差异 (t 检验, $P < 0.05$). 砷在万泉河口与文昌/文教河口混合过程中表现的行为基本一致, 随着盐度的增大, TDIAs 浓度逐渐增大, 呈良好的线性关系. 万泉河、文昌文教河 TDIAs 的平均浓度分别为 3.7 、 $3.2 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 小于海南东部近岸海域 ($15.8 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$), 小于南海北部大亚湾与大鹏湾之间海域 ($18.9 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$)^[29], 所以河口区砷的源是外海, TDIAs 的浓度随着河海混合过程自河流向河口、近岸逐渐增大. 说明万泉河口与文昌/文教河口混合过程中砷主要表现为保守混合行为, 没有明显的溶出与清除过程发生.

砷在不同河口河海混合过程中表现的行为差异很大. 砷在一些河口表现出保守性, 比如 Thames 河

表 2 海南东部万泉河及河口、文昌/文教河及河口、近岸海域温度、盐度及总溶解态无机砷的浓度¹⁾

Table 2 Temperature, salinity and concentrations of TDIAs in the Wanquan and Wenchang/Wenjiao rivers and their estuaries, Coastal area of Eastern Hainan					
时间(年-月)	地点	温度/℃	盐度	TDIAs/ nmol·L ⁻¹	样本数
2006-12	万泉河	—	0	4.0	2
	万泉河口	—	0~20.5 (4.6±7.6)	5.3~9.4 (7.0±1.6)	7
	文昌/文教河	—	0~7.8 (2.7±4.4)	1.3~2.7 (1.8±0.8)	3
	文昌/文教河口	—	7.8~31.0 (23.1±9.7)	2.7~13.3 (7.6±3.7)	7
	近岸	—	0~33.1	13.3~17.6 (15.3±1.6)	6
2007-08	万泉河	—	0	1.6~4.8 (3.6±1.1)	6
	万泉河口	25.1~31.7 (28.2±2.2)	0~33.9 (10.9±10.1)	3.7~15.5 (7.9±3.7)	19
	文昌/文教河	27.0	0~2.8 (0.9±1.6)	2.4~6.1 (4.5±1.9)	3
	文昌/文教河口	27.3~31.2 (27.3±1.1)	8.9~33.3 (21.9±6.8)	6.9~15.9 (11.1±2.6)	13
	近岸	27.1~31.1 (29.1±1.4)	22~34.6 (31.0±4.3)	10.7~17.6 (16.1±1.7)	17

1) 括号内为平均值及标准偏差

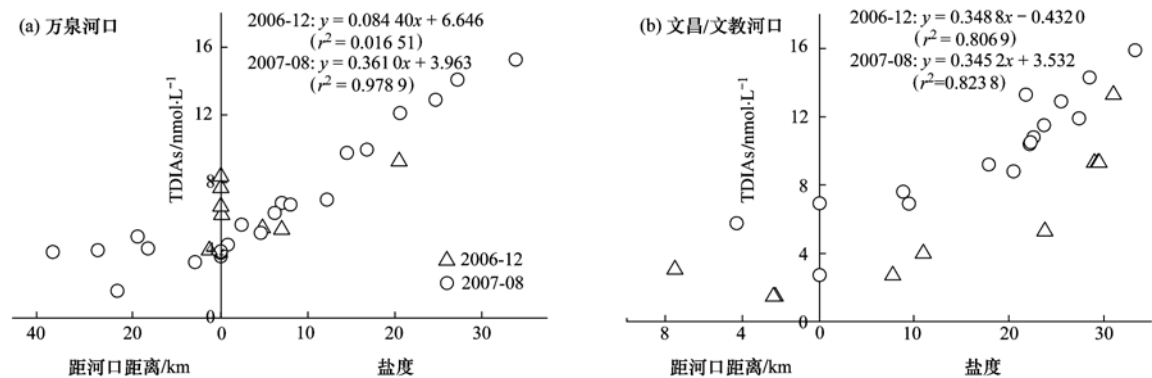


图 2 2006 年 12 月、2007 年 8 月万泉河口及文昌/文教河口 TDIAs 的行为

Fig. 2 Behavior of TDIAs in the Wanquan estuary and Wenchang/Wenjiao estuary in Dec. 2006 and Aug. 2007

口^[30]、Humber 河口^[31]、Krka 河口^[10]、长江口^[16],但一些河口由于存在悬浮颗粒物的吸附解吸、沉积物再悬浮过程中间隙水底界面的溶出或迁移、与氧化铁的结合及人为输送等因素的影响,表现出非保守的混合行为,比如法国的 Seine 河口^[6],Scheldt 河口^[11].

2.3 海南东部近岸海水及地下水总溶解态无机砷的分布

海南东部近岸海水中 TDIAs 的平均浓度 (15.8 nmol·L⁻¹) 略低于开阔大洋中的平均浓度 (22.7 nmol·L⁻¹)^[32],略高于河流、河口的浓度. 2006 年冬季与 2007 年夏季近岸海水中 TDIAs 浓度无显著性的季节差异 (*t* 检验, *P* < 0.05). 由图 3 (a) 可以看出,万泉河口及文昌/文教河口附近的站位表层海水中 TDIAs 浓度低于其他站位,表明近岸海水中砷的

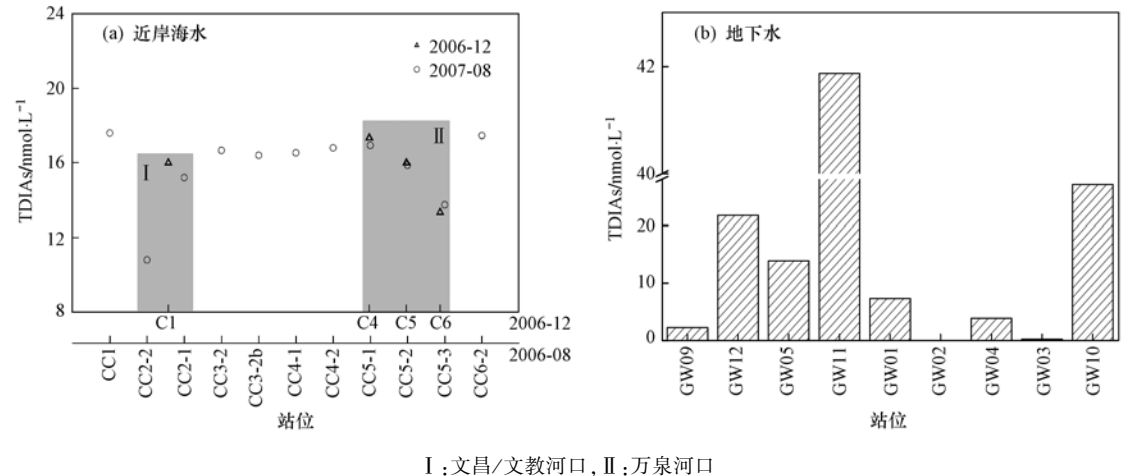


图 3 海南东部近岸海水及地下水中 TDIAs 的含量

Fig. 3 Concentrations of TDIAs in the Coastal area and groundwater in the eastern of Hainan

浓度受低砷河流稀释的影响。

2007 年 8 月海南东部地下水中 TDIA_s 的浓度范围为:未检出~41.7 nmol·L⁻¹,平均浓度为(11.4 ± 14.4) nmol·L⁻¹[见图 3 (b)],与 Allard 提出的地下水背景值 6.7~12.0 nmol·L⁻¹[³³]接近,低于世界卫生组织(world health organization, WHO)所规定的饮用水标准 133.3 nmol·L⁻¹[³⁴],说明海南岛东部沿岸地下水不存在明显的砷污染。对比不同站位地下水样品中 TDIA_s 浓度可以发现,10、11、12 站较其它站位偏高,这种差异主要是采样位置不同造成的。10、11、12 站的地下水样品分别采自万宁市龙滚镇、琼海市长坡镇金钱水库旁的边山村和文昌市清澜开发区锦坑村附近,这些采样点位于人为活动密集区,受生活污水的影响,TDIA_s 的浓度较其它区域偏高。

海南东部地下水 TDIA_s 浓度高于万泉河、文昌/文教河,甚至在 11 站出现 41.7 nmol·L⁻¹高值,说明人类活动对海南东部地下水 TDIA_s 的含量已经产生了影响。海南周边的养殖活动及红树林生态系统使该区域有机碳的含量较高[³⁵],有机质在微生物还原的过程中会导致 FeOOH 发生还原反应溶解并释放其中吸附的砷酸盐,可能是地下水中 TDIA_s 含量较高的另一主要原因。地下水样品中含氮营养盐的还原型浓度与氧化型浓度之比($[\text{NO}_2^-] + [\text{NH}_4^+]/[\text{NO}_3^-]$)可以从侧面反映水体的氧化还原环境,研究结果发现 5、11、12 站地下水样品中($[\text{NO}_2^-] + [\text{NH}_4^+]/[\text{NO}_3^-]$)的比值分别为 1.00、0.09、0.15[²⁷],说明部分站位地下水的硝酸盐被还原为亚硝酸盐或铵盐。此外,地下水的还原性环境还可以由

其中较高的甲烷浓度来证明,例如文昌市清澜开发区锦坑村 12 站地下水的 CH₄ 含量高达 1 045.28 nmol·L⁻¹。地下水的还原性环境会导致砷酸盐被还原为毒性相对较大的亚砷酸盐从而对沿岸居民的健康带来潜在的影响,因此需要对地下水中不同形态砷的含量进行长期监测。

在近岸海区,地下水输送可能是陆源物质进入海洋环境的主要途径之一[³⁶],沿海地区海底地下水排放在北美和欧洲等发达地区受到了越来越多的重视,被认为是一个重要的海岸带陆海相互作用过程[³⁷]。研究地下水排放通量(submarine groundwater discharge, SGD)的方法很多,应用比较广泛的是地球化学示踪法[³⁸]。Swarzenski 等[³⁶]利用 Ra 同位素的示踪法研究了 Tampa Bay 地下水的排放通量及营养物质通过地下水的输送通量。根据镭同位素地球化学示踪法计算出海南东北部沿岸的 SGD 为 $9.65 \times 10^7 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ [²⁷],地下水(其中,站位 9 和 12 为文昌/文教河口附近的站位)TDIA_s 的平均浓度为 12.0 nmol·L⁻¹,根据公式 $\text{SGD} \times c_{\text{TDIA}_s}$,初步计算出 2007 年 8 月海南文昌/文教河口地下水向沿岸砷的输送通量为 $1\,153 \text{ mol} \cdot \text{a}^{-1}$ 。根据 Boyle 等[³⁹]提出的箱式模型,初步估算出文昌/文教河砷的人海通量($Q_R \times c_{\text{TDIA}_s}$)为 $2\,090 \text{ mol} \cdot \text{a}^{-1}$,因此,海南东部沿岸地下水输送也是沿海岸区砷的主要来源之一。

2.4 海南东部河流、河口总溶解态无机砷与其它河口、海湾浓度的对比

表 3 给出了万泉河及河口、文昌/文教河及河口 TDIA_s 的浓度与国内、外部分河口、海湾的对比。对比可见海南东部河流、河口 TDIA_s 的浓度明显偏低,

表 3 万泉河及河口、文昌/文教河及河口总溶解态无机砷与其它河口、海湾的对比¹⁾

Table 3 Comparison of TDIA_s concentrations in Wanquan and Wenchang/Wenjiao rivers and their estuaries with other estuary and bay

海区	TDIA _s /nmol·L ⁻¹	时间	文献
万泉河	1.6~4.8 (3.7)	2006-12, 2007-08	本研究
万泉河口	3.7~15.5 (7.7)	2006-12, 2007-08	本研究
文昌/文教河	1.3~6.1 (3.2)	2006-12, 2007-08	本研究
文昌/文教河口	2.7~15.9 (9.9)	2006-12, 2007-08	本研究
Zenne 河	12.9~48.0	2003-12	[41]
渤海湾	13.7~18.8	2008-04	[15]
胶州湾	7.7~28.3	2001-08, 2001-10	[20]
桑沟湾	13.1 ± 5.0	2006-04, 2006-07, 2006-11, 2007-01	[21]
长江口	13.5~25.2 (17.9)	2004-09	[16]
珠江口	17.8~25.8 (22.3); 18.2~41.2 (25.8)	1999-07, 2000-01	[42]
Scheldt 河口	25.6~53.4	1997-07, 1998-04, 1998-09, 1999-02, 1999-04, 2001-05, 2001-07	[11]
Thames 河口	97.8 ± 5.7	1989-02	[31]
Gironde 河口	14.2~20.2	1994-05, 1995-05	[43]

1) 括号内为平均值

与世界未污染河流中砷的背景值范围 ($1.3 \sim 10.7 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$)^[1]接近. 主要原因在于海南东部河流、河口 TDIA_s 的浓度受人为活动的影响相对较小, 处于自然状态. 另外的一个可能原因在于海南的岩石类型与土壤, 海南的岩石类型为花岗岩、砂岩、火成岩及变质岩, 其中花岗岩含砷量为 $0.18 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 砂岩含砷量 $0.6 \sim 9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 火成岩及变质岩中含砷量几乎为 0^[40], 所以海南河流、河口含砷量总体偏低.

3 结论

(1) 海南东部万泉河及河口、文昌/文教河及河口、近岸 2006 年 12 月 TDIA_s 浓度范围分别为 $4.0 \sim 9.4$ 、 $1.3 \sim 13.3$ 、 $13.3 \sim 17.3 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 2007 年 8 月浓度范围分别为 $1.6 \sim 15.5$ 、 $2.4 \sim 15.9$ 、 $10.8 \sim 17.6 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 在 2 次观测期间均不存在显著的季节性差异, 与世界其他河流、河口相比较低, 处于原始水平.

(2) 万泉河口与文昌/文教河口混合过程中砷主要表现为保守混合行为, TDIA_s 浓度自河流向河口、近岸逐渐增大.

(3) 地下水中总溶解态无机砷浓度低于世界卫生组织所规定的饮用水标准, 不存在砷污染, 其中海南文昌/文教河口地下水向沿岸砷的输送通量约是文昌/文教河砷的入海通量的 55%, 也是沿岸海区砷的主要来源之一.

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实验室成员在各个航次中协助采样.

参考文献:

- [1] Smedley P L, Kinniburgh D G. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters [J]. *Applied Geochemistry*, 2002, **17**(5): 517-568.
- [2] 刘演兵, 韩恒斌. 砷形态分析方法研究进展[J]. *环境科学进展*, 1994, **2**(4): 1-14.
- [3] Howard A G, Comber S D W, Kifle D, *et al.* Arsenic speciation and seasonal changes in nutrient availability and micro-plankton abundance in Southampton Water, UK[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1995, **40**(4): 435-450.
- [4] Sánchez-Rodas D, Luis Gómez-Ariza J, Giraldez I, *et al.* Arsenic speciation in river and estuarine waters from southwest Spain[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **345**(1-3): 207-217.
- [5] Dauvin J C, Desroy N, Janson A L, *et al.* Recent changes in estuarine benthic and suprabenthic communities resulting from the development of harbour infrastructure [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, **53**(1-4): 80-90.
- [6] Michel P, Chiffoleau J F, Averty B, *et al.* High resolution profiles for arsenic in the Seine Estuary. Seasonal variations and net fluxes to the English Channel [J]. *Continental Shelf Research*, 1999, **19**(15-16): 2041-2061.
- [7] Cutter G A, Cutter L S. Behavior of dissolved antimony, arsenic, and selenium in the Atlantic Ocean [J]. *Marine Chemistry*, 1995, **49**(4): 295-306.
- [8] Cutter G A, Cutter L S. Metalloids in the high latitude North Atlantic Ocean: sources and internal cycling [J]. *Marine Chemistry*, 1998, **61**(1-2): 25-36.
- [9] Cutter G A, Cutter L S, Featherstone A M, *et al.* Antimony and arsenic biogeochemistry in the western Atlantic Ocean[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2001, **48**(13): 2895-2915.
- [10] Seyler P, Martin J M. Arsenic and selenium in a pristine river-estuarine system: the Krka (Yugoslavia) [J]. *Marine Chemistry*, 1991, **34**(1-2): 137-151.
- [11] De Gieter M, Elskens M, Baeyens W. Fluxes and major transport routes of arsenic in the Scheldt estuary [J]. *Marine Chemistry*, 2005, **95**(1-2): 15-30.
- [12] Cheng Y, Ren J L, Li D D, *et al.* Distribution of dissolved inorganic arsenic and its seasonal variations in the coastal area of the East China Sea[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2006, **5**(3): 243-250.
- [13] Ren J L, Zhang J, Li D D, *et al.* Behavior of dissolved inorganic arsenic in the Yellow Sea and East China Sea [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, **57**(11-12): 1035-1046.
- [14] Huang W W, Martin J M, Seyler P, *et al.* Distribution and behaviour of arsenic in the Huang He (Yellow River) estuary and Bohai Sea[J]. *Marine Chemistry*, 1988, **25**(1): 75-91.
- [15] Duan L Q, Song J M, Li X G, *et al.* The behaviors and sources of dissolved arsenic and antimony in Bohai Bay[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, **30**(14): 1522-1534.
- [16] 姚庆祯, 张经. 长江口及邻近海域痕量元素砷、硒的分布特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 33-38.
- [17] 李静, 张敏秀, 徐潮, 等. 胶州湾表层海水中砷的存在形态[J]. *山东海洋学院学报*, 1981, **11**(3): 32-38.
- [18] 肖虹滨, 赵夕旦, 史致丽. 胶州湾中砷(V)还原初步研究[J]. *青岛海洋大学学报*, 1995, **25**(3): 338-342.
- [19] 肖虹滨, 赵夕旦. 胶州湾东部水体、浮游植物和沉积物中的砷[J]. *青岛海洋大学学报 (自然科学版)*, 1996, **26**(3): 340-346.
- [20] Ren J L, Zhang J, Li D D, *et al.* Speciation and seasonal variations of dissolved inorganic arsenic in Jiaozhou Bay, North China[J]. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2007, **7**(6): 655-671.
- [21] 闫哲, 任景玲, 刘素美, 等. 桑沟湾总溶解态无机砷的分布与季节变化[J]. *海洋环境科学*, 2008, **27**(5): 432-436.
- [22] 王颖. 海南岛海岸环境特征[J]. *海洋地质动态*, 2002, **18**

- (3): 1-9.
- [23] 宗子就, 荆帆, 沙平, 等. 海南万泉河水资源保护规划研究[J]. 自然资源学报, 1996, **11**(2): 187-192.
- [24] 陈则实. 中国海湾志第十一分册(海南省海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1999. 59-79.
- [25] 曾昭璇, 曾宪中. 海南岛自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 111-136.
- [26] 张黎明, 魏志远, 漆智平. 近30年海南不同地区降雨量和蒸发量分布特征研究[J]. 中国农学通报, 2006, **22**(4): 403-407.
- [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] 海南省国土环境资源厅. 海南省环境状况公报[R]. 海口: 2007. 2-5.
- [29] 程岩. 胶州湾、东海及南海部分海区中溶解态砷的行为[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005. 58.
- [30] Millward G E, Kitts H J, Ebdon L, *et al.* Arsenic in the Thames Plume, UK[J]. Marine Environmental Research, 1997, **44**(1): 51-67.
- [31] Millward G E, Kitts H J, Ebdon L, *et al.* Arsenic species in the Humber Plume, UK[J]. Continental Shelf Research, 1997, **17**(4): 435-454.
- [32] Andreae M O, Andreae T W. Dissolved arsenic species in the Schelde estuary and watershed, Belgium[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1989, **29**(5): 421-433.
- [33] Allard B. Groundwater[A]. In: Salbu B, Steinnes E, (eds.). Trace elements in natural waters[M]. Boca Raton: CRC Press, 1995. 151-176.
- [34] World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality [M]. (4th ed). Geneva: WHO Press, 2011. 178.
- [35] 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.
- [36] Swarzenski P W, Reich C, Kroeger K D, *et al.* Ra and Rn isotopes as natural tracers of submarine groundwater discharge in Tampa Bay, Florida[J]. Marine Chemistry, 2007, **104**(1-2): 69-84.
- [37] 贾国东, 黄国伦. 海底地下水排放: 重要的海岸带陆海相互作用过程[J]. 地学前缘, 2005, **12**(1): 29-35.
- [38] 苏妮, 张磊, 张耀玲, 等. 沿岸地下水排放通量[J]. 水文地质工程地质, 2009, **36**(3): 45-50.
- [39] Boyle E, Collier R, Dengler A T, *et al.* On the chemical mass-balance in estuaries [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1974, **38**(11): 1719-1728.
- [40] Mandal B K, Suzuki K T. Arsenic round the world: a review [J]. Talanta, 2002, **58**(1): 201-235.
- [41] Baeyens W, de Brauwere A, Brion N, *et al.* Arsenic speciation in the River Zenne, Belgium [J]. Science of the Total Environment, 2007, **384**(1-3): 409-419.
- [42] Yao Q Z, Zhang J, Qin X G, *et al.* The behavior of selenium and arsenic in the Zhujiang (Pearl River) Estuary, South China Sea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, **67**(1-2): 170-180.
- [43] Michel P, Boutier B, Herbland A, *et al.* Behaviour of arsenic on the continental shelf off the Gironde estuary: role of phytoplankton in vertical fluxes during spring bloom conditions [J]. Oceanologica Acta, 1998, **21**(2): 325-333.

CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China	CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-peí, <i>et al.</i> (673)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains	WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, <i>et al.</i> (679)
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou	ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, <i>et al.</i> (687)
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions	YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, <i>et al.</i> (694)
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (701)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, <i>et al.</i> (711)
Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	CAO Xiu-hong, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (720)
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary	JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, <i>et al.</i> (727)
Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay	XU Ya-yan, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (732)
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment	LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (741)
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, <i>et al.</i> (746)
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai	DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, <i>et al.</i> (754)
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification	WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (771)
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge	GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (777)
Influence of <i>Ruditapes philippinarum</i> Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay	DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (782)
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing	HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (794)
Temporal and Spatial Variation of Non-Point Source Nitrogen in Surface Water in Urban Agricultural Region of Shanghai	WANG Nan, MAO Liang, HUANG Hai-bo, <i>et al.</i> (802)
Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff	HE Xiao-yan, ZHAO Hong-tao, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (810)
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland	HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (817)
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism	LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, <i>et al.</i> (825)
Production of Peroxide Hydrogen in <i>Chattonella ovata</i> Hong Kong Strain	JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, <i>et al.</i> (832)
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of <i>Bacillus</i> sp. B1 on <i>Phaeocystis globosa</i>	LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he (838)
Effects of Sediment on the Growth of <i>Microcystis</i> and <i>Anabaena</i> in Yanghe Reservoir	CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (844)
New-Type Electroless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution	YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, <i>et al.</i> (849)
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes	ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (857)
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT	PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, <i>et al.</i> (866)
Influences of pH and Complexing Agents on Degradation of Reactive Brilliant Blue KN-R by Ferrous Activated Persulfate	ZHANG Cheng, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (871)
Degradation Kinetics of Ozone Oxidation on High Concentration of Humic Substances	ZHENG Ke, ZHOU Shao-qi, YANG Mei-mei (879)
Index of Stability and Its Mechanisms of Aerobic Granular System Using Volume-based Information Entropy	LI Zhi-hua, JI Xiao-qin, LI Sheng, <i>et al.</i> (885)
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage	LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, <i>et al.</i> (889)
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age	ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (896)
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification	LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, <i>et al.</i> (903)
Optimization and Comparison of Nitrogen and Phosphorus Removal by Different Aeration Modes in Oxidation Ditch	GUO Chang-zi, PENG Dang-cong, CHENG Xue-mei, <i>et al.</i> (910)
Effect of Acidification on the Dewaterability of Sewage Sludge in Bioleaching	ZHU Hai-feng, ZHOU Li-xiang, WANG Dian-zhan (916)
Microbial Ecology Analysis of the Biofilm from Two Biological Contact Oxidation Processes with Different Performance	QIAN Yin, QUAN Xiang-chun, PEI Yuan-sheng, <i>et al.</i> (922)
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity	FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, <i>et al.</i> (932)
Storages and Distributed Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen During the Succession of Artificial Sand-Binding Vegetation in Arid Desert Ecosystem	JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, <i>et al.</i> (938)
Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China	WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun (946)
Impact of Microbial Aggregating Agents on Soil Aggregate Stability Under Addition of Exogenous Nutrients	MO Yan-hua, TANG Jia, ZHANG Ren-duo, <i>et al.</i> (952)
Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids	YAO Jia-jia, KANG Fu-xing, GAO Yan-zheng (958)
Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil	WU Wei, JIANG Lin, CHEN Jia-jun, <i>et al.</i> (965)
Study on the Land Use Optimization Based on PPI	WU Xiao-feng, LI Ting (971)
Research on Algal Diversity in Zoige Alpine Wetland	CHEN Xi, LIU Ru-yin, WANG Yan-fen, <i>et al.</i> (979)
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, <i>et al.</i> (987)
Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer	ZHENG Yan-ling, HOU Li-jun, LU Min, <i>et al.</i> (992)
Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition	LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, <i>et al.</i> (1000)
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus	XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (1008)
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation	LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (1015)
Construction of a Microbial Consortium RXS with High Degradation Ability for Cassava Residues and Studies on Its Fermentative Characteristics	HE Jiang, MAO Zhong-gui, ZHANG Qing-hua, <i>et al.</i> (1020)
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines	TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, <i>et al.</i> (1028)
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor	CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, <i>et al.</i> (1033)

《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3月15日 33卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 3 Mar. 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

国内外公开发行人