

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

**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

我国4个WMO/GAW本底站大气CH<sub>4</sub>浓度及变化特征 ..... 方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳(2917)

我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源 ..... 李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙(2924)

2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析 ..... 李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海(2932)

厦门市冬春季灰霾期间大气PM<sub>10</sub>中多环芳烃的污染特征及来源分析 ..... 钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红(2939)

气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用 ..... 王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J(2946)

松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征 ..... 张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超(2953)

河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究 ..... 赵亚娟,龚巍巍,栾胜基(2960)

印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选 ..... 马英歌(2967)

烹调油烟中挥发性有机物的排放初探 ..... 何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,周爱佳(2973)

生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究 ..... 胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟(2979)

分期布液生物滴滤床净化H<sub>2</sub>S废气性能研究 ..... 刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪(2987)

粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究 ..... 孟阳,王书肖(2993)

太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价 ..... 刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁(3000)

巢湖水质与流域农业投入的关联性研究 ..... 张燕,高翔,张洪(3009)

巢湖十五里河水花生生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性 ..... 李如忠,李峰,周爱佳(3014)

巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价 ..... 刘恩峰,杜臣昌,羊向东,沈吉(3024)

巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性 ..... 陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼(3031)

丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究 ..... 雷沛,张洪,单保庆(3038)

水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响 ..... 刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤(3046)

平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究 ..... 杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波(3051)

江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析 ..... 刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功(3057)

太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价 ..... 甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩(3064)

南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究 ..... 刘静,路凤,杨延钊,徐娜,王田妮(3070)

珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系 ..... 何洪威,周达诚,王保强,梁艳红(3076)

东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价 ..... 王若师,许秋瑾,张娴,魏群山,颜昌宙(3083)

深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究 ..... 孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉(3089)

福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响 ..... 高文华,杜永芬,王丹丹,高抒(3097)

渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨 ..... 蔡文倩,刘录三,乔飞,林尚璇,周娟(3104)

地下水污染防治区划体系构建研究 ..... 王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(3110)

北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析 ..... 陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(3117)

川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的存储和运移 ..... 杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风(3124)

改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究 ..... 董锡臻,石宝友,解岳,王东升(3132)

水溶液中臭氧和溴离子的反应研究 ..... 俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇(3139)

HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布 ..... 张晗,董秉直(3144)

不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSC<sub>s</sub>)产生机制研究 ..... 卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才(3152)

不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响 ..... 况焯,周琰,王清萍,陈祖亮(3160)

多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水 ..... 李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶(3167)

三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水中的脱氮研究 ..... 徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮(3172)

改性花生壳对水中镉的动态吸附研究 ..... 龙腾,易筱筠,党志(3177)

硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能 ..... 王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军(3182)

海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型 ..... 罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰(3189)

营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复 ..... 张著,高大文,袁向娟,勾倩倩(3197)

生物表面活性剂强化污泥水解的研究 ..... 易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平(3202)

厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定 ..... 刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波(3208)

阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究 ..... 李绍峰,朱静,李铁晶(3214)

农业废物堆肥中高产漆酶新菌株的分离鉴定及酶学性质研究 ..... 任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明(3220)

糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定 ..... 李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云(3228)

餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析 ..... 刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕(3236)

共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究 ..... 吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳(3241)

*Geobacter sulfurreducens*对汞的甲基化及其影响因素研究 ..... 邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳(3247)

单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应 ..... 武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷(3253)

金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价 ..... 杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新(3261)

环境激素氧氟菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响 ..... 董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵(3266)

地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究 ..... 金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳(3272)

焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯化特征 ..... 刘敬勇,孙水裕(3279)

城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例 ..... 于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞(3288)

NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析 ..... 连静,刘俊新(3295)

《环境科学》征订启事(3037) 《环境科学》征稿简则(3151) 信息(2999,3030,3096,3227)

# 东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价

王若师<sup>1,3</sup>, 许秋瑾<sup>2</sup>, 张娴<sup>1</sup>, 魏群山<sup>1</sup>, 颜昌宙<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 为阐明东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染物的分布特征与风险水平, 对研究区域内 9 个区县 45 个水样中的常规水质指标和铁、铜、锰、锌、砷、铬、汞、铅、镉等金属污染物浓度进行了分析检测, 并应用美国环境保护署推荐的环境健康风险评价模型, 对不同类型的水源地进行了健康风险评价。结果表明, 该研究区域的金属致癌风险较高, 其中最高的致癌风险来自水库中的铬, 成人和儿童分别达到  $1.14 \times 10^{-4} \cdot a^{-1}$  和  $2.14 \times 10^{-4} \cdot a^{-1}$ , 江河、水库和地下水的金属总致癌风险超过了 ICRP 推荐的可接受风险水平  $5.0 \times 10^{-5} \cdot a^{-1}$ ; 该区域金属非致癌风险较低, 均在 EPA 推荐的可接受范围内。该研究区域金属污染物的优先控制顺序为铬 > 砷 > 铅 > 铁 > 锌, 饮用水源地的风险值排序为水库 > 江河 > 地下水 > 山泉。

**关键词:** 重金属; 饮用水; 健康风险评价; 致癌风险; 非致癌风险; 东江

中图分类号: X52; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)09-3083-06

## Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin

WANG Ruo-shi<sup>1,3</sup>, XU Qiu-jin<sup>2</sup>, ZHANG Xian<sup>1</sup>, WEI Qun-shan<sup>1</sup>, YAN Chang-zhou<sup>1</sup>

(1. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to clarify the distribution characteristics and risk levels of heavy metals in typical drinking water sources of towns in Dongjiang River Basin, several regular water quality indexes as well as concentrations of Fe, Cu, Mn, Zn, As, Cr, Hg, Pb and Cd were analyzed in the 45 random water samples of 9 towns in the study area. The risk assessment was conducted according to different drinking water types using the environmental health risk assessment model recommended by U. S. EPA. The results indicated that the metal carcinogenic risk is relatively high in this area. The highest carcinogenic risk was from Cr in reservoir water, with the risk for adult people reaching  $1.14 \times 10^{-4} \cdot a^{-1}$  and the risk of children reaching  $2.14 \times 10^{-4} \cdot a^{-1}$ . Total carcinogenic risk of reservoir, river and underground water exceeded the accepted level of  $5.0 \times 10^{-5} \cdot a^{-1}$  as suggested by ICRP while all the non-carcinogenic risk levels were within the acceptable range. The primary control sequence of metal pollution in this area was Cr > As > Pb > Fe > Zn; the risk value of different drinking water sources descended in this order: reservoir > river > underground water > mountain spring.

**Key words:** heavy metals; drinking water; health risk assessment; carcinogenic risk; con-carcinogenic risk; Dongjiang River

近年来我国农村供水改水工程进展迅速, 中东部地区农村乡镇集中供水率已达到了 43.3%。但随着我国的经济发展和人口的迅速增长, 乡镇饮用水安全问题也日益引起人们的关注。乡镇饮用水源的污染十分复杂: 一方面, 农业生产及农村非点源污染是乡镇饮用水源环境安全的潜在风险; 另一方面, 乡镇企业的发展特别是一些城市的重污染企业转移到乡镇, 也可能进一步加剧了水源地的污染。乡镇饮用水源量小且分散, 水体缓冲和自净能力较弱, 广大农村饮用水处理设施远远落后于城市, 直接饮用地表水和浅层地下水的农村居民饮水卫生状况难以保障。全国有 3 亿多农村人口存在饮用水安全问题, 部分地区癌症发病率居高不下, 广东省韶关、河源市部分村镇由于长期饮用含放射性、有害矿物质污染水, 新生儿发育不全<sup>[1]</sup>。

重金属是水环境中常见的污染物, 具有高稳定性、不可降解性、可累积性等特点<sup>[2,3]</sup>。通过饮用水途径暴露一定剂量的重金属可导致包括致癌效应在内的多种负面健康效应<sup>[4]</sup>, 例如饮水型的长期砷暴露会对神经系统、皮肤、动脉血管产生严重危害<sup>[5-7]</sup>。

健康风险评价 (health risk assessment, HRA) 是通过估算有害因子对人体不良影响发生的概率来评价暴露于该有害因子的个体健康受到影响的危险<sup>[8,9]</sup>。目前, 国内饮用水源健康风险评价工作多见于对城市水体的研究<sup>[10-13]</sup>, 对农村饮用水源, 特别是典型乡镇饮用水源有毒污染物的健康风险尚未得

收稿日期: 2011-11-16; 修订日期: 2012-01-09

基金项目: 国家环保公益性行业科研专项 (200909054); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-Q02-01)

作者简介: 王若师 (1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境风险评价与管理, E-mail: rswang@iue.ac.cn

\* 通讯联系人, E-mail: czyan@iue.ac.cn

到系统研究. 此外, 现有的分析方法多为区域间风险的比较或区域内风险随时间的变化特征研究, 少有针对不同类型饮用水源地进行的研究. 本研究调查了东江中下游流域典型乡镇不同类型饮用水源地的重金属污染物分布特征, 并针对成人和儿童分别进行了致癌和非致癌健康风险评价, 在此基础上提出该地区的饮用水源地环境风险管理对策与建议.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况与水样采集分析

东江是珠江水系的主要河流之一, 发源于江西省寻乌县, 南流入广东省境内, 多年平均径流量 326.6 亿  $m^3$ , 是广州、深圳、河源、惠州、东莞等地的主要供水水源, 总供水人口超过 3 000 万. 东江流域是我国城市化和经济发展速度最快的地区之一, 选择该流域作为典型乡镇饮用水源地研究区域具有较强代表性.

本研究的采样点主要分布在东江中下游流域的河源市和惠州市两地. 研究区域乡镇饮用水源地的主要类型为: 水库、江河、山泉和地下水 (浅层地下水). 该地区有一定程度的工业发展和一定数量的中小工业企业, 涉及照明、电子、化工等行业, 水环境污染类型属于混合型污染 (包括农业面源及化工、电子等工业点源污染).

采样区域涉及惠州市的惠城区、惠阳区、大亚湾经济技术开发区、惠东县、博罗县、龙门县, 及河源市的源城区、和平县、东源县等 9 个区县, 研究区域地图和采样点分布见表 1 和图 1. 丰水期采样时间为 2010 年 7 月, 另于 2011 年 1 月进行了枯水期采样, 其结果与丰水期采样结果差别较小. 由于数据量过大, 同时考虑到研究区域的自然气候状况, 认为丰水期的水质状况更具有区域整体代表性, 因此采用丰水期数据进行健康风险评价.

表 1 东江流域典型乡镇饮用水源地采样点分布统计

Table 1 Distribution of sample points for typical township drinking water sources of towns in Dongjiang River Basin

县区	江河	水库	山泉	地下水	总数
惠阳区	2	5	0	1	8
惠城区	2	1	0	0	3
大亚湾区	0	2	0	0	2
惠东县	2	2	1	2	7
博罗县	0	6	1	3	10
龙门县	0	1	0	0	1
源城区	0	1	0	0	1
东源县	2	1	2	1	6
和平县	1	1	4	1	7
总计	9	20	8	8	45

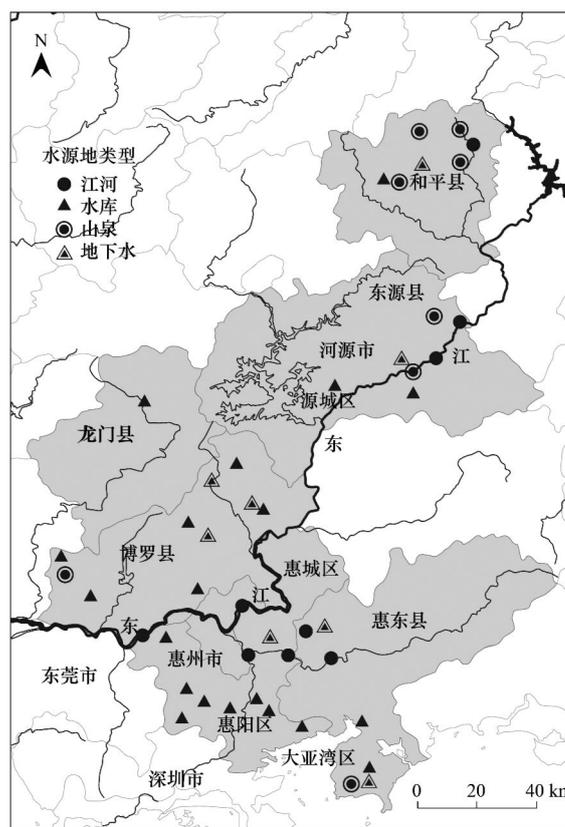


图 1 东江流域典型乡镇饮用水源地采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sample points for typical township drinking water sources of towns in Dongjiang River Basin

使用便携式水质分析仪对水样的温度、pH 值、电导率、溶解氧、化学耗氧量 (COD) 等水质基本指标进行现场分析检测.

使用洁净的棕色玻璃瓶进行水样采集, 避光储存在 2 ~ 5℃ 的冰箱中. 使用总有机碳分析仪 (湿法) (TOC-VWP) 分析测试水样的总有机碳 (TOC) 含量. 使用连续流动注射分析仪 (LACHAT QC8500) 分析测试水样的氨氮、亚硝酸盐、硝酸盐、正磷酸盐含量.

将重金属待测水样置于 PET 塑料容器中保存, 每个水样设置 2 个平行样, 经 0.45  $\mu m$  滤膜过滤, 滴入浓硝酸进行酸化, 将 pH 调至 2 以下, 密封保存. 配制铁、铜、锰、锌、砷、铬、汞、铅、镉标准物质混合溶液配制浓度梯度为 1、10、20、50、100  $\mu g \cdot L^{-1}$  的标准曲线, 使用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) (Agilent 7500cx) 上机分析. 经检验, 待测物质的相对标准偏差 (RSD) 均低于 15%, 符合 USEPA 的要求 (RSD < 30%).

### 1.2 健康风险评价模型

水环境健康风险评价是环境健康风险评价的重

要组成部分,是建立水体污染与人体健康定量联系的一种评价方法,其目的是通过水体污染物危害鉴定、污染物暴露评价和污染物与人的剂量反应关系分析等定量评估水体污染物对人体健康危害的潜在风险<sup>[14]</sup>。尽管当前各国对水体污染健康风险评价的方法和模型表现形式不尽相同,但其原理基本一致,并且都包括致癌与非致癌风险评价模型两部分<sup>[15~17]</sup>。

一般认为,只要有微量的致癌风险物存在,即会对人体健康产生危害<sup>[16]</sup>。致癌风险常用风险值(RISK)表示,其评价模型表达式如下<sup>[18~20]</sup>:

$$R_i = (D_i \cdot SF_i) / 70$$

若结果 > 0.01, 则按高剂量暴露计算:

$$R_i = [1 - \exp(-D_i \cdot SF_i)] / 70$$

一般认为,非致癌物只有在超过某一阈值时才会对人体健康产生危害<sup>[16]</sup>。非致癌风险通常用风险指数(HI)描述,其评价模型表达式如下<sup>[18~20]</sup>:

$$H_i = [D_i / (RfD_i \cdot 70)] \cdot 10^{-6}$$

式中,  $R_i$  为化学致癌物  $i$  经饮水暴露产生的人均年致癌风险( $a^{-1}$ );  $H_i$  为非致癌物  $i$  经饮水暴露产生的人均年健康风险( $a^{-1}$ );  $D_i$  为有毒物质  $i$  经饮水暴露的单位体重日均暴露剂量 [ $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$ ];  $SF_i$  为化学致癌物  $i$  经饮水暴露摄入的致癌系数 [ $mg^{-1} \cdot (kg \cdot d)$ ];  $RfD_i$  为非致癌物  $i$  饮水途径的日均推荐剂量 [ $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$ ]; 70 为平均寿命(a)。模型参数值见表 2, 部分数据空缺表明该物质尚无 EPA 或其他卫生环境组织收录认可的毒理学实验结果数据。

表 3 东江流域典型乡镇饮用水源地水质常规指标

Table 3 Traditional water quality index of typical township drinking water sources of towns in Dongjiang River Basin

指标	江河		水库		山泉		地下水	
	检出范围	平均值	检出范围	平均值	检出范围	平均值	检出范围	平均值
pH 值	6.30~7.55	6.84	6.57~9.15	7.81	6.10~8.93	7.05	5.08~7.65	6.44
电导率/ $\mu S \cdot cm^{-1}$	41.0~136.0	84.1	30.0~142.0	47.6	22.0~104.0	52.6	42.0~374.0	167.3
溶解氧/ $mg \cdot L^{-1}$	5.41~8.80	7.42	7.06~19.82	9.50	7.08~10.78	8.37	6.00~10.57	8.39
TOC/ $\mu g \cdot L^{-1}$	816.1~2249.0	1491.7	939.0~8635.5	2098.0	204.1~2236.0	808.4	64.7~1354.5	343.4
COD/ $mg \cdot L^{-1}$	0.68~2.04	1.17	0.69~3.06	1.29	0.24~1.79	0.90	0.41~2.58	1.06
亚硝酸盐/ $\mu g \cdot L^{-1}$	7.0~413.0	0.0674	nd~136.0	13.9	nd~9.8	3.9	3.0~11.8	6.6
硝酸盐/ $mg \cdot L^{-1}$	nd~1.77	0.61	nd~7.11	0.65	nd~1.03	0.23	0.08~2.28	0.98
氨氮/ $mg \cdot L^{-1}$	0.21~2.20	0.75	0.15~1.48	0.40	nd~0.22	0.13	0.10~0.54	0.21
正磷酸盐/ $\mu g \cdot L^{-1}$	5.9~26.3	14.8	5.4~48.1	8.7	nd~14.4	7.5	6.0~22.9	11.1

东江流域典型乡镇饮用水源地金属元素浓度分布见表 4。在进行检测的 7 种重金属和 2 种常规金属元素中, 镉仅在江河水中检出 1 次, 可以认为镉不是该研究区域显著的重金属污染物。

与文献[26]规定的重金属浓度进行对比, 各类

饮水途径日均暴露剂量  $D_i$  按照成人和儿童分别计算, 公式如下<sup>[18~20]</sup>:

$$\text{成人: } D_i = 1.5 \cdot c_i / 64.3$$

$$\text{儿童: } D_i = 1.0 \cdot c_i / 22.9$$

式中,  $c_i$  为化学致癌物  $i$  的浓度 ( $mg \cdot L^{-1}$ ); 1.5 为成人日均饮水量 ( $L \cdot d^{-1}$ )<sup>[21,22]</sup>; 64.3 为广东省成年男子平均体重 ( $kg$ )<sup>[24]</sup>; 1.0 为儿童日均饮水量 ( $L \cdot d^{-1}$ )<sup>[23,24]</sup>; 22.9 为广东省 7 岁儿童平均体重 ( $kg$ )<sup>[25]</sup>。

表 2 模型参数 SF 和 RfD 值

Table 2 SF and RfD values of model parameters

重金属	SF		RfD	
	$/mg^{-1} \cdot (kg \cdot d)$	参考	$/mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	参考
铁			0.70000	PPRTV
锰			1.40000	IRIS
铜			0.04000	HEAST
锌			0.30000	IRIS
砷	1.50000	IRIS	0.00030	IRIS
铬	0.50000	NJEPA	0.00300	IRIS
汞			0.00016	CALEPA
铅	0.00850	CALEPA		
镉			0.00050	IRIS

## 2 结果与讨论

### 2.1 水质分析

东江流域典型乡镇饮用水源地水质常规指标见表 3。其中, 江河和水库中的总有机碳(TOC)含量明显高于山泉和地下水, 说明江河和水库水源受到一定程度的有机污染。各项指标中, 江河的氨氮含量超过文献[26]规定的  $0.5 mg \cdot L^{-1}$ 。

型水源的铁、铅检出浓度均存在超标, 江河及地下水中的锰检出浓度存在超标, 其他金属浓度无超标。

另外, 研究区域内金属元素浓度有较明显的地域分布特征: 下游惠州市惠阳区、惠城区水样的铬浓度高于其他区县, 该地区是惠州市主要工业区, 拥

有多个电子信息产业园及全国最大的照明电器产业制造基地,惠州市的工业污染水排放相当严重<sup>[27,28]</sup>,当地的工业点源污染可能是铬污染物的主要来源。上游河源市地区的铁、锰、锌、铅浓度高

于下游,河源是粤东的主要矿产区,盛产铁、钛、钨、锡、稀土等资源,位于该市的大顶铁矿是广东省第一大型铁矿,分析其铁、锰、锌、铅的浓度偏高与当地的自然地质条件和矿产开采有密切关系。

表 4 东江流域典型乡镇饮用水源地金属污染物检测结果/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

重金属	江河		水库		山泉		地下水		参考标准 <sup>[26]</sup>
	检出范围	检出率/%	检出范围	检出率/%	检出范围	检出率/%	检出范围	检出率/%	
铁	190.5~1 055.0	100.0	20.4~668.7	100.0	12.5~870.5	100.0	15.1~826.8	100.0	300.00
锰	24.56~542.50	100.0	3.55~99.40	100.0	0.34~12.11	100.0	0.85~653.80	100.0	100.00
铜	0.79~11.82	100.0	0.48~8.16	100.0	0.04~5.03	100.0	0.99~18.09	100.0	1 000.00
锌	nd~94.99	66.7	nd~242.20	75.0	nd~228.90	62.5	0.95~167.90	100.0	1 000.00
砷	0.09~1.19	100.0	nd~0.37	70.0	nd~0.10	75.0	nd~1.95	62.5	10.00
铬	nd~17.23	66.7	nd~46.44	85.0	nd	0.0	nd~8.44	37.5	50.00
镉	nd~0.52	12.5	nd	0.0	nd	0.0	nd	0.0	5.00
汞	0.007~0.030	100.0	0.010~0.041	100.0	0.016~0.020	100.0	0.012~0.020	100.0	1.000
铅	11.07~116.10	100.0	6.42~16.94	100.0	5.26~24.49	100.0	6.84~14.62	100.0	10.00

## 2.2 健康风险评价

依据各个水样的金属元素浓度数据,按照模型和参数可以计算得到研究区域内各类供水水源的金属污染物人均年致癌风险和非致癌风险,评价结果见表 5 和表 6。考虑到结果的数量级,其中致癌风险在风险值  $>1.00\text{E}-06$  时加和进总风险;非致癌风险在风险值  $>1.00\text{E}-09$  时加和进总风险。结果显示,儿童的重金属健康风险高于成人,与成人相比,儿童是更加敏感的受体,受到重金属的危害更大,因此应对儿童的饮用水安全进行更严格的控制和管理。

从表 5 中可以看出,研究区域的重金属致癌风险偏高,成人和儿童的总致癌风险分别在  $1.18\text{E}-04 \sim 3.84\text{E}-06$  和  $7.20\text{E}-06 \sim 2.21\text{E}-04$  之间。其中江河、水库和地下水的人均年致癌风险接近或超过了国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险水平  $5.0 \times 10^{-5} \cdot \text{a}^{-1}$ 。水源地类型的致癌风险大小排序为:水库  $>$  江河  $>$  地下水  $>$  山泉。江河、水库和地下水的致癌风险来源排序为:铬  $>$  砷  $>$  铅;山泉水为:铅  $>$  砷  $>$  铬(没有检出)。

从表 6 中可以看出,成人和儿童的总非致癌风险分别在  $2.02\text{E}-08 \sim 9.50\text{E}-08$  和  $3.79\text{E}-08 \sim$

$1.79\text{E}-07$  之间,均小于  $10^{-6} \cdot \text{a}^{-1}$ ,认为是可以接受的风险水平。水源地类型的非致癌风险大小排序为:水库  $>$  江河  $>$  地下水  $>$  山泉。江河的非致癌风险来源物质排序依次为:砷  $>$  铁  $>$  铬;水库为:铬  $>$  锌  $>$  砷  $>$  铁;山泉为:铁  $>$  锌  $>$  汞  $>$  砷;地下水为:砷  $>$  铬  $>$  铁。

健康总风险为致癌物质和非致癌物质所产生的健康风险之和,本研究中,致癌金属所产生的健康风险数量级为  $10^{-7} \sim 10^{-4}$ ,而非致癌金属所产生的健康风险数量级为  $10^{-11} \sim 10^{-8}$ ,占总风险比例不到 1%。因此,该地区饮用水源的金属健康风险主要来自致癌金属,致癌风险的分布代表了该地区的健康风险格局。本研究区域的水库型饮用水源地中,铬是最大风险重金属,其次为锌,此结果与张华俊<sup>[29]</sup>对广东省供水水库重金属表层沉积物的风险研究结果一致。

另外,本研究的健康风险评价结果存在一定程度的不确定性,主要来自于:①污染物浓度分布的不确定性,主要受水源地和供水方式的季节变化影响;②暴露参数的不确定性,人群饮水习惯存在较大差异。

表 5 东江流域典型乡镇饮用水源地金属污染物人均年致癌风险/ $\text{a}^{-1}$

重金属	江河		水库		山泉		地下水	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
砷	1.51E-05	2.82E-05	2.20E-06	4.11E-06	1.08E-06	2.01E-06	1.02E-05	1.90E-05
铬	2.44E-05	4.57E-05	1.14E-04	2.14E-04	0.00E+00	0.00E+00	1.74E-05	3.27E-05
铅	5.88E-06	1.10E-05	1.94E-06	3.63E-06	2.77E-06	5.18E-06	2.09E-06	3.92E-06
合计	4.54E-05	8.49E-05	1.18E-04	2.21E-04	3.84E-06	7.20E-06	2.98E-05	5.57E-05

表 6 东江流域典型乡镇饮用水源地金属污染物人均年非致癌风险/a<sup>-1</sup>Table 6 Average annual non-carcinogenic risk caused by metal pollution of typical township drinking water sources of towns in Dongjiang River Basin/a<sup>-1</sup>

重金属	江河		水库		山泉		地下水	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
铁	1.90E-08	3.56E-08	4.69E-09	8.78E-09	9.20E-09	1.72E-08	7.42E-09	1.39E-08
锰	2.36E-09	4.42E-09	2.95E-10	5.52E-10	7.65E-11	1.43E-10	2.11E-09	3.95E-09
铜	2.35E-09	4.40E-09	1.46E-09	2.74E-09	1.43E-09	2.68E-09	3.66E-09	6.85E-09
锌	2.23E-09	4.17E-09	5.70E-09	1.07E-08	4.62E-09	8.66E-09	4.07E-09	7.61E-09
砷	3.34E-08	6.25E-08	4.88E-09	9.13E-09	2.39E-09	4.47E-09	2.26E-08	4.24E-08
铬	1.63E-08	3.04E-08	7.57E-08	1.42E-07	0.00E+00	0.00E+00	1.17E-08	2.18E-08
汞	2.48E-09	4.64E-09	2.55E-09	4.78E-09	2.58E-09	4.84E-09	2.43E-09	4.54E-09
合计	7.81E-08	1.46E-07	9.50E-08	1.79E-07	2.02E-08	3.79E-08	5.40E-08	1.01E-07

由健康风险评估结果和图 2 可以看出,儿童是比成人更加敏感的风险受体,受到重金属的危害更大,因此应针对儿童的饮用水安全进行更严格的控制和管理. 致癌重金属铬、砷和铅的污染控制管理应作为本研究区域饮用水源环境风险管理的重点对象. 铬是东江中下游流域饮用水源产生致癌和非致癌风险最主要的金属污染物,铬的污染主要由工业引起,主要来自电镀、金属加工、制革、油漆、印染等行业,在本研究中,铬的高风险值分析与惠州地区发达的电子工业和照明产业有关. 砷的污染同样主要来源于工业生产,主要用于

制造硬质合金、电子元件等. 铅的重要工业用途是制造蓄电池,本研究中铅的污染分析与当地的地质状况和上游的矿产业有关. 研究表明,东江中下游频繁的人类经济活动对东江水质存在着较大影响,工业点源污水排放引起的河水污染十分明显,鲁垠涛等<sup>[30]</sup>在对东江流域污染源的分析研究中也得到了相同观点.

同时,铁和锌的毒性虽然较小,但由于该区域的自然地质中蕴含较多,已在水环境中累积达到了需要警戒的程度,特别是地下水在岩层迁移中富集了较多的矿物元素,也应引起一定的重视.

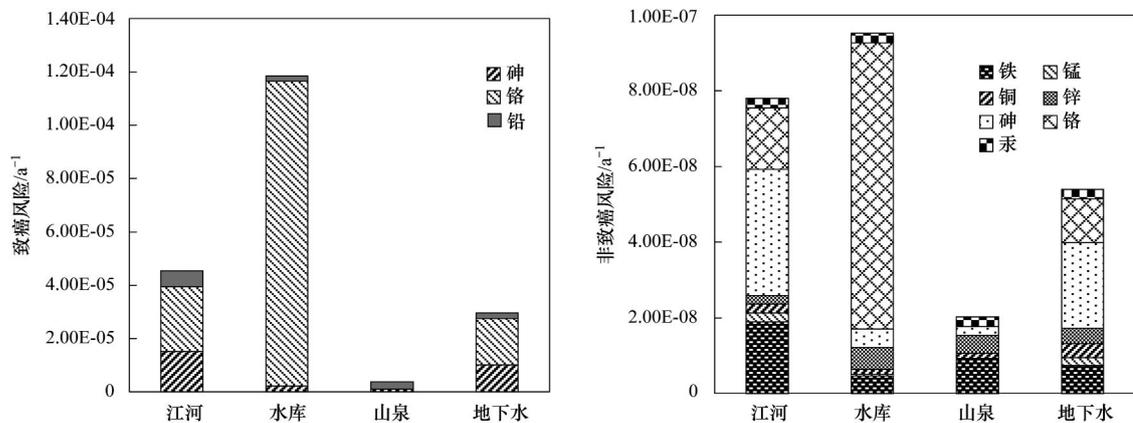


图 2 东江流域典型乡镇饮用水源地金属污染物成人人均年致癌风险与人均年非致癌风险分布柱状图

Fig. 2 Histogram of average annual carcinogenic risk and non-carcinogenic risk of adult people caused by metal pollution of typical township drinking water sources of towns in Dongjiang River Basin

饮用水源地的管理策略通常取决于常规水质指标与标准的对比,在一定程度上弱化了未超标的有毒有害因子对人群健康可能造成的危害. 从本研究的结果可看出,虽然某些金属的检出浓度不存在超标,但由于其毒性较大,在进行了健康风险评估之后,成为了主要风险来源物质. 因此,如果能将饮用水源的健康风险评估列入常规的水质监测和环境评价工作中,将健康风险评估与水质评价相结合,能更

全面地掌握饮用水水环境质量,及时了解饮用水安全状况,有助于加强饮用水源地的风险管理,制定和实施相应的污染物控制策略.

需要指出的是,本研究采用的是 USEPA 的人体健康暴露风险评估方法,由于人体对重金属的主要摄入途径为消化道方式,因此暴露途径只考虑了饮用水途径,没有考虑其他的暴露途径,如食物摄入、皮肤暴露等. 同时一些暴露参数参照 USEPA 的给定值,

是否适用于具体情况需要验证. 因此, 本研究还有待深入探讨, 结果的不确定性也有待进一步分析.

### 3 结论

(1) 研究区域重金属致癌风险较高, 江河和水库的人均年致癌风险超过了 ICRP 的可接受标准, 非致癌风险在可接受范围之内. 该地区典型乡镇饮用水源的主要重金属健康风险为致癌风险.

(2) 与成人相比, 儿童是更加敏感的受体, 重金属对儿童造成的危害更大.

(3) 研究区域各种饮用水源地类型的重金属健康风险由大到小排序, 依次是: 水库 > 江河 > 地下水 > 山泉. 其中, 水库供水水源的健康风险最高, 需要重点控制管理; 山泉供水水源的健康风险最低, 是该研究区域的最佳饮用水源类型.

(4) 按照对于总健康风险的贡献百分比, 该研究区域金属污染物的优先控制顺序依次为: 铬 > 砷 > 铅 > 铁 > 锌 > 锰.

(5) 对于不同的水源地类型, 首要控制的金属污染物对应如下, 水库: 铬; 江河: 砷、铬; 地下水: 砷、铬; 山泉: 铅.

### 参考文献:

- [ 1 ] 陈吉宁. 新农村建设中的环境问题及对策研究专题报告 [ R ]. 北京: 中国环境与发展国际合作委员会, 2006. 1-4.
- [ 2 ] Kavcar P, Sofuoglu A, Soguoğlu S C. A health risk assessment for exposure to trace metals via drinking water ingestion pathway [ J ]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2009, **212**(2): 216-227.
- [ 3 ] Muhammad S, Shah M T, Khan S. Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of Kohistan region, northern Pakistan [ J ]. *Microchemical Journal*, 2011, **98**(2): 334-343.
- [ 4 ] Li S Y, Zhang Q F. Risk assessment and seasonal variations of dissolved trace elements and heavy metals in the Upper Han River, China [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **181**(1-3): 1051-1058.
- [ 5 ] Hughes M F. Arsenic toxicity and potential mechanisms of action [ J ]. *Toxicology Letters*, 2002, **133**(1): 1-16.
- [ 6 ] IARC. Arsenic and arsenic compounds [ R ]. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans. Lyon, IARC, 1980. 39-142.
- [ 7 ] 柳晓娟, 刘文菊, 林爱军, 等. 中草药砷含量特征及其健康风险初步评价 [ J ]. *环境科学*, 2010, **31**(12): 3036-3042.
- [ 8 ] 白志鹏, 王珺, 游燕. 环境风险评价 [ M ]. 北京: 高等教育出版社, 2009. 58-59.
- [ 9 ] U. S. NRC. Risk assessment in the Federal Government: managing the process [ M ]. Washington DC: National Academy Press, 1983.
- [ 10 ] 高继军, 张力平, 黄圣彪, 等. 北京市饮用水源水重金属污染物健康风险的初步评价 [ J ]. *环境科学*, 2004, **25**(2): 47-50.
- [ 11 ] 黄奕龙, 王仰麟, 谭启宇, 等. 城市饮用水源地水环境健康风险评价及风险管理 [ J ]. *地学前缘*, 2006, **13**(3): 162-167.
- [ 12 ] 王秋莲, 张震, 刘伟. 天津市饮用水源地水环境健康风险评价 [ J ]. *环境科学与技术*, 2009, **32**(5): 187-190.
- [ 13 ] 邹滨, 曾永年, Benjamin F, 等. 城市水环境健康风险评价 [ J ]. *地理与地理信息科学*, 2009, **25**(2): 94-98.
- [ 14 ] U. S. EPA. The Risk Assessment Guidelines of 1986 [ R ]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, U. S. EPA, 1986.
- [ 15 ] 何星海, 马世豪, 李安定, 等. 再生水利用健康风险暴露评价 [ J ]. *环境科学*, 2006, **27**(9): 1912-1915.
- [ 16 ] 曾光明, 卓利, 钟政林, 等. 水环境健康风险评价模型及其应用 [ J ]. *水电能源科学*, 1997, **15**(4): 28-33.
- [ 17 ] 仇付国, 王敏. 城市污水再生利用化学污染物健康风险评价 [ J ]. *环境科学与管理*, 2007, **32**(2): 186-188.
- [ 18 ] 王进军, 刘占旗, 古晓娜, 等. 环境致癌物的健康风险评价方法 [ J ]. *国外医学(卫生学分册)*, 2009, **36**(1): 50-57.
- [ 19 ] U. S. EPA. Guidelines for Exposure Assessment [ R ]. Washington DC: Office of Health and Environmental Assessment, U. S. EPA, 1992. 186.
- [ 20 ] 段小丽, 聂静, 王宗爽, 等. 健康风险评价中人体暴露参数的国内外研究概况 [ J ]. *环境与健康杂志*, 2009, **26**(4): 370-374.
- [ 21 ] 中国营养学会. 中国居民膳食指南 [ M ]. 拉萨: 西藏人民出版社, 2009.
- [ 22 ] 马冠生. 中国四大城市居民饮水习惯调查报告 [ R ]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2011.
- [ 23 ] EPA/600/P-95/002Fa. Exposure factors handbook [ S ]. Washington DC: U. S. EPA, 1997.
- [ 24 ] EPA/600/R-06/096F. Child-specific exposure factors handbook [ S ]. Washington DC: U. S. EPA, 2008.
- [ 25 ] 广东省体育局. 广东省第二次国民体质监测公报 [ EB/OL ]. [http://www.gdsports.net/html/tzjc/2008\\_08\\_08\\_11\\_5339.html](http://www.gdsports.net/html/tzjc/2008_08_08_11_5339.html), 2008-8-8.
- [ 26 ] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准 [ S ].
- [ 27 ] 袁继森. 东江流域水质污染与水环境保护对策研究 [ J ]. *惠州大学学报(自然科学版)*, 1999, **19**(4): 101-104.
- [ 28 ] 金辉. 东江干流东莞段水质研究 [ J ]. *环境科学研究*, 2001, **14**(3): 48-51.
- [ 29 ] 张华俊. 广东省典型供水水库沉积物氮盐及重金属研究 [ D ]. 广州: 暨南大学, 2010. 35-37.
- [ 30 ] 鲁海涛, 唐常源, 陈建耀, 等. 东江干流河水的来源、水质及水资源保护 [ J ]. *中国生态农业学报*, 2008, **16**(2): 367-372.

## CONTENTS

CH <sub>4</sub> Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China .....	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources .....	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games .....	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM <sub>10</sub> -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen .....	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split .....	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area .....	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households .....	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories .....	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils .....	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF .....	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Trickling Filter for H <sub>2</sub> S Gas Treatment .....	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization .....	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Chaohu and Assessment of Its Applicability .....	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin .....	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake .....	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification .....	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake .....	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir .....	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir .....	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China .....	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province .....	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu .....	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin .....	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water .....	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin .....	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen .....	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast .....	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay .....	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System .....	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain .....	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan .....	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons .....	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O <sub>3</sub> with Bromide Ion in Aqueous Solution .....	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors .....	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds .....	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values .....	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor .....	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor .....	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells .....	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides .....	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter .....	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery .....	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant .....	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria .....	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium .....	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting .....	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash .....	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste .....	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes .....	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors .....	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress .....	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities .....	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i> .....	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash .....	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature .....	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen .....	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants .....	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

# 《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9月15日 33卷 第9期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 9 Sep. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮局	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