

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 ₄ 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 ₁₀ 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,王敏燕	(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 ₂ 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,路风,杨廷钊,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,张炯,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,林岍璇,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 ₃ ⁻ 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(VOCs)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	况烨,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)
<i>Geobacter sulfurreducens</i> 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)
环境激素氯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)

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¹, 周达诚^{1*}, 王保强^{1,2}, 梁艳红¹

(1. 华南理工大学环境科学与工程学院, 广州 510006; 2. 香港中文大学生命科学学院, 香港 999077)

摘要: 以珠江水体为研究对象, 利用 XAD 树脂分离溶解性有机物 (DOC) 中的腐殖质及其他有机组分. 考察了珠江中 DOC 的质量浓度、组成分布、SUVA₂₅₄ 和三卤甲烷生成势 (THMFP), 并分析有机物的组成与三卤甲烷生成势 (THMFP) 之间的关系. 结果表明, 珠江水域在广东省内的 DOC 质量浓度为 0.7 ~ 33.0 mg·L⁻¹, THMFP 为 30.39 ~ 1 091.52 μg·L⁻¹, 两者呈正比例线性相关. 在空间分布上, 各支流的 DOC 质量浓度和 THMFP 均沿下游方向逐渐增加, 而腐殖质在 DOC 中所占的质量分数却沿下游方向逐渐递减. 在加氯实验中, 腐殖质是珠江中最主要的消毒副产物前驱物 (产生了珠江中 64.6% 的三卤甲烷), 其三卤甲烷生成活性 (STHMFP) 是其他有机组分的 2 倍以上. 另一方面, SUVA₂₅₄ 和腐殖质的质量分数呈正比例线性相关, 说明 SUVA₂₅₄ 对珠江水中消毒副产物前驱物也有一定的指示作用.

关键词: 珠江; 溶解性有机物 (DOC); 腐殖质; 消毒副产物; 三卤甲烷

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2012)09-3076-07

Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water

HE Hong-wei¹, ZHOU Da-cheng¹, WANG Bao-qiang^{1,2}, LIANG Yan-hong¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. School of Life Sciences, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: Dissolved organic carbon (DOC) in the Pearl River system in Guangdong Province was fractionated by using XAD resins into humic substances and other fractions. The concentration and distribution of DOC, SUVA₂₅₄, trihalomethanes formation potential (THMFP) and relationships between DOC and THMFP were analyzed. The 2-year study demonstrated that the DOC concentration of Pearl River ranged from 0.7 to 33.0 mg·L⁻¹. On the other hand, the trihalomethanes formation potential (THMFP) in Pearl River was 30.39-1 091.52 μg·L⁻¹, which showed a linear relationship with the DOC concentration. Spatially, the DOC concentration and THMFP increased downstream along each tributary; however, the humic substances mitigated to the opposite. During the chlorination, humic substances were the main precursors of disinfection by-products (generating 64.6% of THM) in Pearl River and the specific trihalomethanes formation potential (STHMFP) of humic substances was over 2 times higher as the other fractions. In addition, SUVA₂₅₄ was proved to provide a reference indicator in testing the precursors of disinfection by-products.

Key words: Pearl River; dissolved organic carbon (DOC); humic substances; disinfection by-products (DBP); trihalomethanes (THM)

珠江是我国南方径流量最大的河流, 主要由西江、北江、东江和珠江三角洲诸河组成 (见图 1)^[1]. 近年来, 随着我国工农业的高速发展, 珠江的水质受到了较严重的污染, 其主要污染来源为工业废水和生活污水^[2]. 根据 2008 年珠江水资源公报报道^[3], 每年排入珠江的工业废水及生活污水的总量达到了 $8.8 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $3.9 \times 10^9 \text{ m}^3$. 珠江广东段是广东省众多城市的饮用水来源^[4,5], 也是工业废水、生活污水的主要容纳水体. 庞大的污水排放必然增加水中溶解性有机物 (dissolve organic carbon, DOC) 的浓度和改变有机物的组成, 继而影响其消毒过程中三卤甲烷 (包括氯仿、一氯二溴甲烷、二氯一溴甲烷、溴仿)^[6~15] 等有害物质的生成

能力, 即三卤甲烷生成势 (trihalomethanes formation potential, THMFP, 指在足够加氯量的条件下, 在与氯反应足够长的时间后, 水中所能产生 4 种三卤甲烷的最大量^[16]).

在消毒副产物的研究当中, 有机物的组成可以按其疏水性能的不同分为疏水性酸性物质 (hydrophobic acid, HPOA)、疏水性中性物质 (hydrophobic neutral, HPON)、过渡亲水性酸性

收稿日期: 2011-11-26; 修订日期: 2012-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20877024); 国家自然科学基金重点项目 (21037001); 香港特区政府研究资助局优配研究项目 (477610)

作者简介: 何洪威 (1986 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为饮用水消毒副产物, E-mail: bruce.1986@live.cn

* 通讯联系人, E-mail: ACHOW@clemson.edu

物质(transphilic acid, TPHA)、过渡亲水性中性物质(transphilic neutral, TPHN)和亲水性酸性物质(hydrophilic acid, HPIA)^[17]. 一般疏水性组分会被划分为腐殖质, 其他组分则为非腐殖质. 腐殖质是天然水体中消毒副产物的主要前驱物. 鉴

于不同有机组分的三卤甲烷生成活性(specific trihalomethanes formation potential, STHMFP, 指单位质量有机物的三氯甲烷生成势)有所不同, 水体中 DOC 的浓度和组成变化将直接影响其 THMFP.

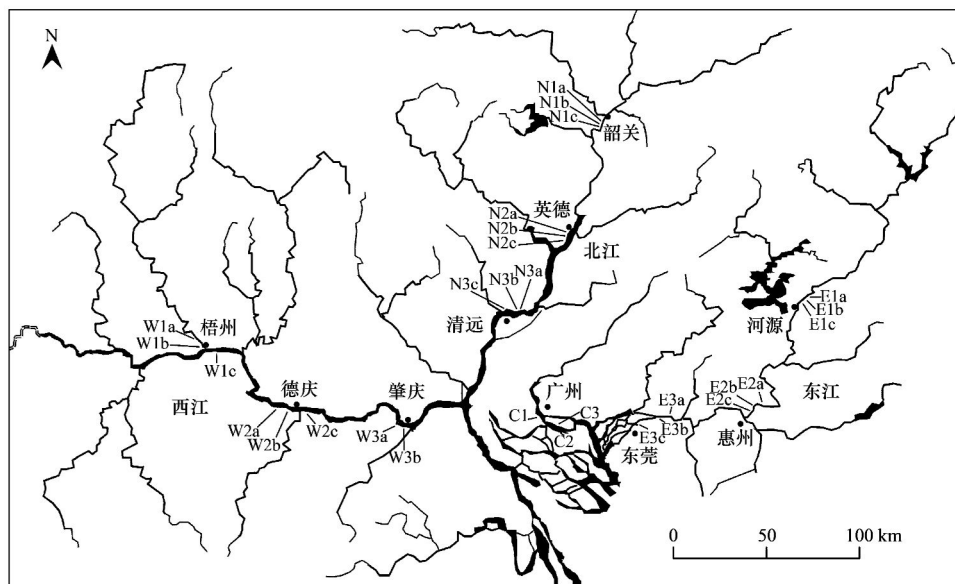


图1 珠江流域及采样点分布示意

Fig. 1 Map showing mainstream and tributaries of Pearl River

为了解 DOC 浓度及其组成对 THMFP 的影响, 本研究在调查珠江水体 DOC 的空间分布及组成特征的基础上, 通过加氯实验, 测量不同水体的 THMFP. 主要目的是了解饮用水源中有机物浓度及组成与消毒副产物生成势的关系, 为相关部门降低饮用水中的消毒副产物提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样方法

采样时间为 2007 ~ 2008 年的 1、4、7 和 10 月. 采样地点包括西江段(梧州[W1]、德庆[W2]、肇庆[W3])、北江段(韶关[N1]、英德[N2]、清远[N3])、东江段(河源[E1]、惠州[E2]、东莞[E3])以及 3 条支流的交汇处(广州[C])等 10 个城市, 每个城市分别在上中下游设有 3 个不同的采样点, 并标记为 a、b、c(其中肇庆只有 2 个采样点, 分别为 W3a 和 W3b), 共 29 个采样点(见图 1). 样品的采集位置为沿岸水深 50% ~ 75% 处, 每次采集 2 L 水量的样品于高密度聚乙烯瓶内, 样品在采集后 24 h 内保存在冰箱中, 并用 0.2 μm 的过滤膜(Millipore)进行过滤. 过滤后的水样储存在 4℃ 的环境中以备分析.

1.2 实验方法

DOC 质量浓度的测定采用日本 Shimadzu 公司出产的总有机碳分析仪(TOC-V CPN), 其检测下限为 0.05 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. UVA_{254} 是指在波长为 254 nm 处的单位比色皿光程下的紫外吸光度. UVA_{254} 的测定采用美国 Thermo Scientific 公司生产的分光光度计(Evolution 300 UV-Vis). SUVA_{254} 由 UVA_{254} 除以 DOC 质量浓度得到, 其单位为 $\text{L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$. SUVA_{254} 与芳香类有机物有着密切关系, 是广泛用于指示消毒副产物的前驱物^[17, 18]. 有机组分的分离实验采用 XAD 树脂多级分馏法^[19~23], 见图 2. 实验所用的 XAD-8 和 XAD-4 树脂由美国 Sigma-Aldrich 公司生产.

THMFP 的检测是对各采样点每年(1 月和 7 月)的样品进行加氯实验所得. 加氯实验采用 Summers 等^[24]所发明的 UFC(uniform formation conditions)方法, 该方法改良了美国环境保护署和美国公共健康安全协会所公布的原有方法^[25, 26]. UFC 实验条件: 温度为 $20^\circ\text{C} \pm 1.0^\circ\text{C}$, pH 值为 8 ± 0.2 , 培养时间为 $24 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$, 24 h 后游离余氯为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. UFC 实验完成后, 样品中生

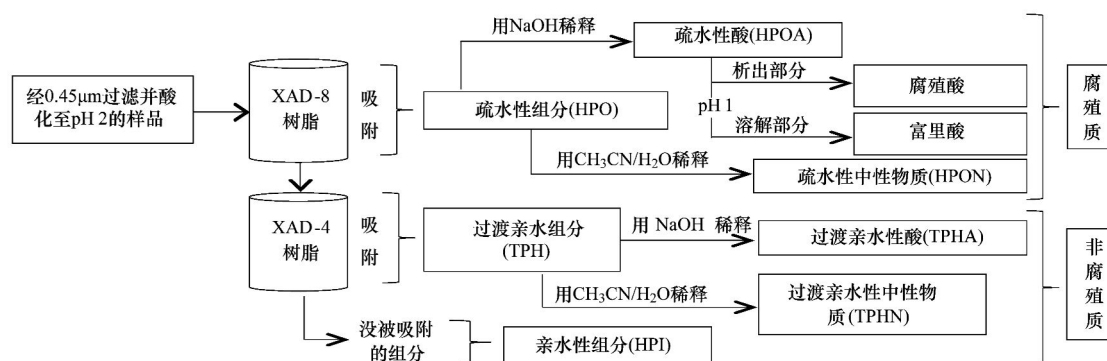
图2 XAD树脂的多级分馏法^[17]

Fig. 2 Hierarchical fractionation procedure

成的 THM 先用甲基叔丁基醚 (methyl tert-butyl ether, MTBE) 作溶剂进行液-液分离萃取, 萃取液再用由美国 Hewlett Packard 公司生产的气相色谱仪 (5890 Series II) 检测 THM 的质量浓度. 实验中的消毒剂 4% 的 NaOCl 溶液、MTBE 和 THM 样品均由美国 Sigma-Aldrich 公司生产. THM 标准样 (色谱纯) 按 USEPA 的标准方法配制. 另外, 本研究同时分析 THM 中溴代物所占的比例, 并且用溴取代因子 (bromine substitution factor, BSF) 表示^[27].

$$\text{BSF} = \frac{\sum_{n=0}^3 n [\text{CHCl}_{(3-n)}\text{Br}_n]}{3 \sum_{n=0}^3 \text{CHCl}_{(3-n)}\text{Br}_n} \times 100\%$$

$$0 \leq \text{BSF} \leq 100\%$$

式中, 分子项代表 THM 结合的溴原子总数; 分母项代表 THM 结合的卤原子总数

为进一步研究珠江水中不同有机组分如何影响 THMFP, 本研究将采用多元线性回归的分析方法, 分析各有机组分与 THMFP 的关系. 对多元回归方程的分析由统计软件 SPSS (16.0) 实现, 并且分析方法采用逐步法 (stepwise), 其显著系数设定为 Sig. < 0.05.

2 结果与讨论

2.1 珠江中 DOC 的分布与组成特征

表 1 归纳了各采样点的 DOC 质量浓度、SUVA₂₅₄ 值及相关的水质指标. 珠江水体中 DOC 质量浓度范围为 0.7 ~ 33.0 mg·L⁻¹. 其中, 各支流的 DOC 的质量浓度大小为: 西江 (0.7 ~ 4.3 mg·L⁻¹) < 北江 (1.3 ~ 12.8 mg·L⁻¹) < 东江 (2.7 ~ 20.5 mg·L⁻¹) < 广州地区 (8.5 ~ 33.0 mg·L⁻¹). 在空间分布上, 各支流的 DOC 质量浓度从上游至下游逐渐

增加, 最终在各支流出口处 (广州) 达到最高 (见表 1). DOC 的这种分布特征主要是由水体流向及沿途城市污水排放所致. 各支流上游城市所排放的污水随水流沿下游流动并与下游城市排放污水叠加造成下游水体 DOC 质量浓度的增加. 此外, 珠江广东段下游城市一般较上游城市经济发达, 发达城市 (如广州) 的水资源占有量少, 污水排放量大也是造成下游城市 DOC 质量浓度较高的主要原因. 根据广东省水资源公报统计数据^[28], 广州市水资源量 (约 1.6 × 10¹⁰ m³) 以及年降水量 (约 9.5 × 10⁹ m³) 只有各支流入口城市的一半左右, 如韶关和河源的水资源量分别约为 3.3 × 10¹⁰ m³ 和 3.0 × 10¹⁰ m³, 其降水量为 2.0 × 10¹⁰ m³ 和 1.7 × 10¹⁰ m³. 然而广州作为全省污水排放量最大的城市, 其年入河废污水量高达 1.87 × 10⁹ m³, 对比之下韶关和河源仅为 2.98 × 10⁸ m³ 和 3.62 × 10⁸ m³.

珠江水体中 DOC 主要由疏水性酸 (17.4% ~ 61.0%)、亲水性酸 (10.0% ~ 51.4%) 和过渡亲水性酸 (17.3% ~ 30.4%) 组成, 其他组分所占据比例较低, 如疏水性中性物质 (1.4% ~ 13.1%) 和过渡亲水性中性物质 (1.4% ~ 14.4%), 见表 1. 随着各支流的流动方向, 疏水性物质的质量分数呈现下降趋势, 过渡亲水性物质则变化较小, 而亲水性物质则呈现上升趋势. 疏水性物质的主要来源为当地生态系统 (地表植物, 农业回灌水和土壤)^[19], 众多文献证明一般天然水体中疏水性组分的质量分数会大于 50%^[29, 30]. 这种情况仅出现在北江和东江几个上游城市水体中, 反映了上游城市水资源量和降水量充足, 污水排放量相对较少, 其水体仍然接近天然水体; 而下游城市水资源量和降水量较少, 污水排放量大, 导致疏水性有机组分严重下降. 以最低的广州为例, 其疏水性物质所占的质量分数仅在 20% 左

右. 对比各支流中有机组分的数据可知, 西江上下游的疏水性组分质量分数变化 (39.0% ~ 44.4%) 较北江 (29.9% ~ 63.0%) 和东江 (28.6% ~ 63.3%) 小, 这也反映了西江作为珠江主干, 水径流量大, 污水可能受到稀释, 从而导致有机组分受周边城市所排放的污水影响最小.

表1 珠江上各采样点的地理位置、DOC 质量浓度、SUVA₂₅₄ 以及相关水质指标¹⁾

Table 1 Geological information, DOC concentration and SUVA ₂₅₄ of the Pearl River										
地点	DOC /mg·L ⁻¹	腐殖质		非腐殖质			SUVA ₂₅₄ /L·(mg·m) ⁻¹	THMFP /μg·L ⁻¹	BSF /%	
		HPOA /%	HPON /%	TPHA /%	TPHN /%	HPIA /%				
西江	W1a	0.96 ± 0.06	41.5 ± 1.5	2.9 ± 0.6	24.9 ± 1.2	3.5 ± 0.7	27.3 ± 1.1	2.91 ± 0.04	48.1 ± 5.1	12.5 ± 1.4
	W1b	1.03 ± 0.07	41.0 ± 1.3	2.9 ± 0.4	25.5 ± 1.2	3.9 ± 0.7	26.8 ± 1.0	2.90 ± 0.04	48.0 ± 6.9	14.0 ± 1.2
	W1c	1.30 ± 0.10	40.0 ± 1.5	2.6 ± 0.3	26.8 ± 0.9	2.0 ± 0.6	28.6 ± 1.5	2.99 ± 0.11	54.5 ± 3.7	14.0 ± 0.6
	W2a	1.94 ± 0.10	39.6 ± 1.1	1.4 ± 0.3	30.1 ± 1.1	1.4 ± 0.3	27.5 ± 1.2	2.81 ± 0.06	92.4 ± 8.1	14.5 ± 0.3
	W2b	2.09 ± 0.10	40.8 ± 1.1	2.1 ± 0.2	29.6 ± 0.7	2.6 ± 0.5	24.9 ± 1.0	2.74 ± 0.10	91.2 ± 8.0	15.0 ± 0.0
	W2c	2.20 ± 0.11	38.5 ± 1.0	3.3 ± 0.3	29.4 ± 0.7	3.8 ± 0.5	25.1 ± 0.3	2.59 ± 0.11	102.9 ± 7.7	11.0 ± 0.6
	W3a	3.43 ± 0.18	36.5 ± 0.9	2.8 ± 0.5	29.5 ± 0.6	3.8 ± 0.6	27.5 ± 1.0	2.36 ± 0.08	143.8 ± 7.6	18.0 ± 1.7
	W3b	3.53 ± 0.20	36.9 ± 0.7	2.1 ± 0.3	28.3 ± 0.7	3.9 ± 0.7	28.9 ± 0.9	2.34 ± 0.08	157.9 ± 18.6	13.5 ± 0.9
北江	N1a	1.61 ± 0.08	56.5 ± 1.2	6.5 ± 0.9	18.0 ± 1.5	7.1 ± 1.3	11.9 ± 0.5	3.50 ± 0.07	72.7 ± 2.2	11.5 ± 0.9
	N1b	1.80 ± 0.08	51.5 ± 1.2	8.8 ± 1.2	18.9 ± 1.2	8.3 ± 1.1	12.6 ± 0.8	3.26 ± 0.06	91 ± 1.2	14.0 ± 2.9
	N1c	2.14 ± 0.07	49.5 ± 0.7	7.8 ± 1.1	19.8 ± 0.9	7.9 ± 0.9	15.1 ± 0.8	3.01 ± 0.04	98.9 ± 3.7	12.0 ± 0.0
	N2a	3.24 ± 0.27	41.3 ± 0.8	7.5 ± 0.7	21.4 ± 0.7	7.1 ± 1.0	22.8 ± 0.8	2.50 ± 0.09	151.4 ± 20.6	13.0 ± 0.0
	N2b	3.55 ± 0.32	37.4 ± 0.6	11.5 ± 1.3	21.8 ± 1.1	7.3 ± 1.6	22.6 ± 1.1	2.54 ± 0.07	156.3 ± 22.0	14.0 ± 0.0
	N2c	4.13 ± 0.30	30.5 ± 0.6	13.1 ± 0.7	17.3 ± 1.3	14.4 ± 0.9	24.8 ± 1.1	2.10 ± 0.09	178.4 ± 15.7	16.0 ± 1.2
	N3a	5.53 ± 0.36	20.1 ± 0.9	13.0 ± 1.1	27.1 ± 1.4	12.8 ± 0.8	27.0 ± 2.0	1.79 ± 0.05	259.5 ± 13.1	14.0 ± 0.0
	N3b	7.34 ± 0.44	18.4 ± 0.5	12.6 ± 1.2	26.5 ± 1.3	13.3 ± 0.8	29.3 ± 1.4	1.70 ± 0.08	290.9 ± 24.2	15.0 ± 0.0
	N3c	10.84 ± 0.40	18.3 ± 0.6	11.6 ± 0.6	23.1 ± 0.4	12.6 ± 0.9	34.4 ± 0.5	1.49 ± 0.10	436.4 ± 13.6	20.0 ± 0.0
东江	E1a	3.29 ± 0.17	61.0 ± 0.8	2.3 ± 0.3	24.6 ± 0.9	2.1 ± 0.4	10.0 ± 0.6	3.61 ± 0.09	152.6 ± 12.0	10.0 ± 0.0
	E1b	3.61 ± 0.20	54.6 ± 1.3	2.0 ± 0.4	27.6 ± 1.3	2.6 ± 0.4	13.1 ± 1.4	3.30 ± 0.15	198.1 ± 21.9	23.0 ± 0.0
	E1c	3.44 ± 0.18	55.4 ± 1.2	1.8 ± 0.4	25.9 ± 0.8	2.1 ± 0.4	14.9 ± 0.8	3.03 ± 0.09	NA	NA
	E2a	3.89 ± 0.19	48.3 ± 1.2	4.5 ± 0.7	21.3 ± 0.8	4.1 ± 0.4	21.9 ± 0.6	2.61 ± 0.06	194.4 ± 7.5	13.0 ± 0.0
	E2b	4.85 ± 0.22	38.0 ± 1.8	5.0 ± 0.4	25.3 ± 0.6	5.5 ± 0.6	26.3 ± 1.0	2.56 ± 0.09	242.7 ± 17.6	21.0 ± 0.0
	E2c	5.88 ± 0.24	38.8 ± 1.1	3.1 ± 0.6	29.6 ± 0.3	2.8 ± 0.4	25.8 ± 1.0	2.25 ± 0.08	266.4 ± 15.8	13.0 ± 0.0
	E3a	8.50 ± 0.44	25.3 ± 0.8	3.5 ± 0.3	30.4 ± 0.9	3.9 ± 0.7	37.0 ± 1.0	1.87 ± 0.07	364.2 ± 29.9	12.5 ± 0.9
	E3b	10.15 ± 0.70	26.3 ± 1.1	2.9 ± 0.5	28.1 ± 1.4	3.9 ± 0.9	38.9 ± 1.4	1.90 ± 0.05	391.1 ± 46.1	26.0 ± 1.2
	E3c	12.35 ± 1.58	26.1 ± 1.1	2.5 ± 0.4	30.1 ± 0.8	1.6 ± 0.5	39.6 ± 0.9	1.96 ± 0.07	520.0 ± 105.1	27.0 ± 2.9
广州	C1	16.61 ± 1.99	21.4 ± 1.0	3.0 ± 0.5	26.3 ± 0.7	3.6 ± 1.2	45.8 ± 1.3	1.58 ± 0.06	412.7 ± 88.8	34.5 ± 2.6
	C2	22.75 ± 2.04	21.0 ± 0.6	1.9 ± 0.4	24.5 ± 0.8	3.1 ± 0.9	49.5 ± 1.0	1.55 ± 0.08	651.6 ± 85.1	43.5 ± 2.6
	C3	25.75 ± 2.20	17.4 ± 0.4	2.1 ± 0.4	25.5 ± 0.6	3.6 ± 0.8	51.4 ± 0.9	1.24 ± 0.06	811.7 ± 121.8	48.0 ± 1.2

1) 所有数值表达为平均值 ± 标准差, NA 代表没有检测

2.2 THMFP 及与 DOC 各组分间的关系

各采样城市的 THMFP 分布与 DOC 的分布基本相似, 也呈现上游城市低下游城市高的特点 (见表 1). 线性回归分析表明 DOC 与 THMFP 呈现显著的正线性相关 (见表 2). 因此, 各支流的 THMFP 大小分布也与 DOC 的分布一致 (见表 1). 另外, 回归方程斜率表征了该流域 DOC 的 STHMFP (见表 2). 各支流的 STHMFP 分布与 DOC 相反: 西江 (41.2 μg·mg⁻¹) > 北江 (40.6 μg·mg⁻¹) > 东江 (36.6 μg·mg⁻¹) > 广州地区 (30.6 μg·mg⁻¹). 该结果表明, 尽管部分流域受废水排放影响导致 DOC 质量浓度和 THMFP 较高, 但该流域中有机物的 STHMFP

却较低. 这也表明工业废水和生活污水中所含有机物的 STHMFP 比天然水体中的有机物要低.

表2 珠江各支流中 THMFP 与 DOC 质量浓度之间的关系¹⁾

Table 2 Relationship between concentration of DOC and THMFP in the tributaries of Pearl River		
地点	关系式	R ²
西江	THMFP = 41.21 × DOC + 7.36	0.964
北江	THMFP = 40.63 × DOC + 10.12	0.996
东江	THMFP = 36.56 × DOC + 48.53	0.990
广州	THMFP = 30.56 × DOC - 17.03	0.907

1) THMFP 单位为 μg·L⁻¹, DOC 单位为 mg·L⁻¹

针对腐殖质 (疏水性酸 + 疏水性中性物质) 一般为天然水体的主要消毒副产物前驱物, 其质量分

数的变化将直接影响水体中 DOC 的 STHMFP. 利用 SPSS 的多元线性回归分析,对珠江水中的腐殖质和非腐殖质组分进行 STHMFP 的分析对比. 发现珠江水体中所含的腐殖质的 STHMFP 约为其他组分的 2.5 倍(见表 3). 根据腐殖质在 DOC 中所占的平均质量分数(42.0%)可以推算,珠江中 64.6% 的 THM 来源于腐殖质. 因此,测定珠江中的疏水性组分能够同时指示水中的消毒副产物的生成势和腐殖质的质量分数,与相关研究结果基本一致^[17, 31].

表 3 不同机组分的质量浓度与 THMFP 的关系系数¹⁾

Table 3 Coefficients between organic fractions and THMFP

地点	腐殖质 ²⁾	非腐殖质 ²⁾	截距	R ²
珠江整体	58.24	23.09	24.87	0.953
西江	108.24	NA ³⁾	0.72	0.966
北江	42.66	40.03	7.95	0.996
东江	54.60	33.19	19.53	0.987
广州	NA	38.55	-7.65	0.941

1) 表中数据是经过 SPSS 多元线性回归分析,采用的统计方法为逐步法,所显示结果均为显著性较好 Sig. < 0.05,拟合程度(R²)最高的模型参数; 2) 是不同组分对 THMFP 的偏系数,代表不同组分的 STHMFP,其单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$; 3) NA 为 SPSS 根据其统计的显著相关系数(Sig. > 0.05)所剔除的变量

然而在各支流的分析中显示(见表 3),在 DOC 质量浓度较低的流域(如西江),其腐殖质的 STHMFP 要明显高于珠江整体的水平,1 mg 腐殖质能产生 108.24 μg 的 THM,而非腐殖质却没有与 THMFP 显著性相关(Sig. > 0.05). 在 DOC 质量浓度较高的流域(如北江和东江),其腐殖质的 STHMFP 则低于珠江整体水平,而非腐殖质的 STHMFP 则高于珠江中非腐殖质的整体水平. 在 DOC 质量浓度最高的广州,其 THMFP 甚至只跟非腐殖质显著相关. 该结果表明流域之间随着 DOC 质量浓度的提高,腐殖质的 STHMFP 会逐渐减少,而非腐殖质的 STHMFP 则会逐渐增加,并且在某些 DOC 质量浓度较高的地区会由非腐殖质成为 THMFP 的决定因素. 有机组分的 STHMFP 在流域之间的差异也反映了工业废水和生活污水中所含有的腐殖质可能拥有较低的 STHMFP,非腐殖质则拥有较高的 STHMFP,从而使得废水排放量大的地区其 THMFP 受非腐殖质的影响较大.

另外,腐殖质中并非所有物质的 STHMFP 均大于非腐殖质. 珠江水体中被分离出来的 5 个有机组分的质量浓度与 THMFP 的多元线性关系为:

$$\text{THMFP} = 89.27 \times \text{HPON} + 42.11 \times \text{HPOA} + 47.86 \times \text{TPHA} + 15.36 \times \text{HPIA} + 27.74$$

$$(R^2 = 0.954)$$

腐殖质中 HPON 的 STHMFP 明显要高于 HPOA,而非腐殖质中的 TPHA 组分的 STHMFP 也略高于 HPOA,TPHN 的变化则对 THMFP 没有明显影响(Sig. > 0.05). HPIA 在分离的所有有机组分当中呈现最低的 STHMFP. 结合珠江中各有机组分所占的平均质量分数 HPOA(36.9%)、TPHA(25.4%)、HPON(5.1%)、TPHN(5.3%)、HPIA(27.3%)和 STHMFP 推算, HPOA 和 TPHA 是珠江中最主要的两大消毒副产物前驱物,分别会产生 42.7% 和 33.4% 的 THM.

2.3 SUVA₂₅₄对珠江中消毒副产物前驱物的指示作用
在珠江水体中 SUVA₂₅₄ 的范围为 1.1 ~ 4.1 L·(mg·m)⁻¹,与腐殖质的质量分数呈正比例线性相关(见图 3).

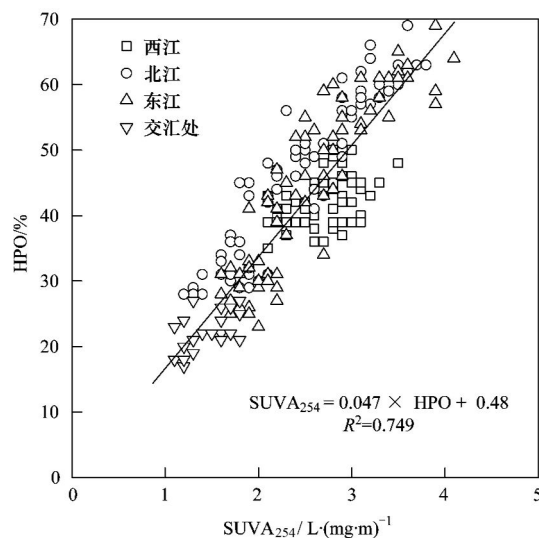


图 3 SUVA₂₅₄与腐殖质质量分数的关系

Fig. 3 Relationship between SUVA₂₅₄ and humic fraction

SUVA₂₅₄通常用于指示水样中消毒副产物的前驱物(如腐殖质)和芳香类有机物的质量分数^[18, 32],并且 SUVA₂₅₄在珠江各支流呈现出与 DOC 质量浓度分布相反的趋势(见表 1),即各支流上游城市高,下游低. 从而可以推断出各支流上游城市水体中含腐殖质和芳香烃类有机物的比例相对下游城市高,与本研究实测结果一致.

2.4 溴代甲烷的分布特征

由于采样地点位于沿海地区,所以有可能受海水倒灌影响,水中会含有一定浓度的溴离子. 在氯消毒过程中,水中的溴离子会导致溴代甲烷的生成,并且溴代消毒副产物的细胞毒性和遗传毒性一般是氯代消毒副产物的 10 倍以上^[33]. 表 1 显示了各采样点的 BSF. 珠江中各采样城市的 BSF 通常在 20%

以下,只有广州地区的 BSF 高达 48.0%,是其他城市的 2 倍以上. BSF 的数值一般会随着 DOC/Br 比值的降低而增加. 根据珠江中 BSF 及 DOC 的分布,可以推断广州地区水体中的溴离子浓度远高于其他上游城市. 虽然水中存在的溴离子不会对消毒副产物的量浓度产生明显的影响,但是会增加消毒副产物的质量浓度和毒性^[17, 34, 35]. 因此,控制当地的溴离子浓度可以在一定程度上降低消毒副产物的质量浓度和毒性.

3 结论

(1) 珠江中 DOC 的分布与组成特征:珠江中各支流的 DOC 质量浓度和 THMFP 均沿下游方向逐渐增加,但腐殖质所占的质量分数却逐渐递减. 在珠江中,DOC 质量浓度跟 THMFP 呈现良好的线性关系. 因此,珠江各支流的 DOC 质量浓度和 THMFP 水平均为:西江 < 北江 < 东江 < 广州地区. 另外,珠江中仅有少数上游城市的水体中疏水性组分的质量分数会大于 50%,反映了上游城市水资源量和降水量充足,污水排放量相对较少,其水体仍然接近天然水体;而下游城市水资源量和降水量较少,污水排放量大,导致疏水性有机组分严重下降,以最低的广州为例仅有 20% 左右. 除此以外,西江上下游的疏水性组分质量分数变化较北江和东江小,也反映西江中的有机组分受周边城市所排放的污水影响最小.

(2) THMFP 与有机组分的关系:THMFP 同时受腐殖质和非腐殖质组分的影响. 根据珠江整体数据分析,腐殖质是最主要的三卤甲烷的前驱物,其 STHMFP 约为非腐殖质的 2.5 倍,产生了珠江中 64.6% 的 THM. 然而在各支流因为当地生态环境和废水排放的情况有所不同,腐殖质对 THMFP 的影响会随着该流域 DOC 水平的增加而降低,非腐殖质的影响则会增加. 并且在某些 DOC 质量浓度较高的地区会由非腐殖质成为 THMFP 的决定因素. 另外, SUVA₂₅₄ 与腐殖质有良好的线性关系,可以用于指示珠江水中消毒副产物的前驱物.

(3) 广州地区的 BSF 明显高于其他采样城市,表明该地区水体中的溴离子浓度远高于其他上游城市,并且所生成的消毒副产物具有更高的毒性.

参考文献:

[1] Reckhow D A, Rees R L S, Bryan D. Watershed sources of disinfection byproduct precursors[J]. Journal of Water Science and Technology, Part A, 2004, 4(4): 61-69.

[2] Li Y T, Li F B, Zhang T B, *et al.* Pollution assessment, distribution and sources of PAHs in agricultural soils of Pearl River Delta-the biggest manufacturing base in China[J]. Environmental Science and Health, 2007, 42(13): 1979-1987.

[3] 水利部. 珠江水资源公报[EB/OL]. <http://www.pearlwater.gov.cn/xxcx/szygg/08gb/index.htm>, 2010-8-31.

[4] Zhao J L, Ying G G, Wang L, *et al.* Determination of phenolic endocrine disrupting chemicals and acidic pharmaceuticals in surface water of the Pearl Rivers in South China by gas chromatography-negative chemical ionization-mass spectrometry[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(2): 962-974.

[5] 广东省统计局. 广东省 2010 年第六次全国人口普查主要数据公报[EB/OL]. http://www.gov.cn/gzdt/2011-05/11/content_1861651.htm, 2011-05-10.

[6] Gunten U V, Driedger A, Gallard H, *et al.* By-products formation during drinking water disinfection: a tool to assess disinfection efficiency[J]. Water Research, 2001, 35(8): 2095-2099.

[7] Lee K J, Kim B H, Hong J E, *et al.* A study on the distribution of chlorination by-products (CBPs) in treated water in Korea[J]. Water Research, 2001, 35(8): 2861-2872.

[8] Malliarou E, Collins C, Graham N, *et al.* Haloacetic acids in drinking water in the United Kingdom[J]. Water Research, 2005, 39(12): 2722-2730.

[9] Nieuwenhuijsen M J, Toledano M B, Eaton N E, *et al.* Chlorination disinfection byproducts in water and their association with adverse reproductive outcomes: a review[J]. Occupational and Environmental Medicine, 2000, 57(2): 73-85.

[10] Rodriguez M J, Sérodes J B, Levallois P. Behavior of trihalomethanes and haloacetic acids in a drinking water distribution system[J]. Water Research, 2004, 38(20): 4367-4382.

[11] Kanokkantarapong V, Marhaba T F, Panyapinyopon B, *et al.* FTIR evaluation of functional groups involved in the formation of haloacetic acids during the chlorination of raw water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 136(2): 188-196.

[12] Panyapinyopon B, Marhaba T F, Kanokkantarapong V, *et al.* Characterization of precursors to trihalomethanes formation in Bangkok source water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 120(1-3): 229-236.

[13] Xie Y F. Disinfection byproducts in drinking water: formation, analysis, and control[M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 2003.

[14] USEPA. Integrated Risk Information System[EB/OL]. <http://www.epa.gov/iris>, 2012-2-24.

[15] GB 5749-2006. 生活饮用水卫生标准[S].

[16] 林细萍, 卢益新, 张德明. THMFP 及 HAAFP 的测定方法[J]. 中国给水排水, 2003, 19(10): 98-100.

[17] Chow A T, Gao S, Dahlgren R A. Physical and chemical fractionation of dissolved organic matter and trihalomethane precursors: A review[J]. Water Supply Research and

- Technology, 2005, **54**(8): 475-507.
- [18] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamasch B A, *et al.* Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon [J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(20): 4702-4708.
- [19] Aiken G R, McKnight D M, Thorn K A, *et al.* Isolation of hydrophilic organic acids from water using nonionic macroporous resins[J]. Organic Geochemistry, 1992, **18**(4): 567-573.
- [20] Croue J P, Korshin G V, Benjamin M M. Characterization of natural organic matter in drinking water[M]. Denver: American Water Works Association, 2000.
- [21] Leenheer J A. Comprehensive approach to preparative isolation and fractionation of dissolved organic carbon from natural waters and wastewaters [J]. Environmental Science and Technology, 1981, **15**(5): 578-587.
- [22] Leenheer J A, Croue J P. Characterizing aquatic dissolved organic matter [J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(1): 18a-26a.
- [23] Thurman E M, Malcolm R L. Preparative isolation of aquatic humic substances[J]. Environmental Science and Technology, 1981, **15**(4): 463-466.
- [24] Summers R S, Hooper S M, Shukairy H M, *et al.* Assessing DBP yield: uniform formation conditions [J]. American Water Works Association, 1996, **88**(6): 80-93.
- [25] USEPA. EPA Methods 551. 1 and 552. 2-Methods for the Determination of Organic Compounds in Drinking Water Supplement III[M]. Cincinnati: USEPA, 1995.
- [26] American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater[M]. Washington, DC: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2005.
- [27] Hua G H, Reckhow D A, Kim J. Effect of bromide and iodide ions on the formation and speciation of disinfection byproducts during chlorination[J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(9): 3050-3056.
- [28] 高可华, 幸成, 李湘姣, 等. 2008 广东省水资源公报[M]. 广州: 广东省水利厅, 2008. 1-47.
- [29] Thurman E M. Organic geochemistry of natural waters [M]. Netherlands: Dordrecht, 1985.
- [30] Perdue E M, Ritchie J D. Dissolved organic matter in freshwaters [J]. Treatise on Geochemistry, 2004, **5**(1): 273-318.
- [31] 刘艳芳, 王启山, 岳尚超, 等. 基于疏水性能及相对分子质量分析消毒副产物前体物[J]. 给水排水, 2011, **37**(7): 128-131.
- [32] Traina S J, Novak J, Smeck N E. An ultraviolet absorbance method of estimating the percent aromatic carbon content of humic acids[J]. Environmental Quality, 1990, **19**(1): 151-153.
- [33] Plewa M J, Wagner E D, Mitch W A. Comparative mammalian cell cytotoxicity of water concentrates from disinfected recreational pools [J]. Environmental Science and Technology, 2011, **45**(9): 4159-4165.
- [34] Richardson S D, Thruston A D, Rav-Acha C, *et al.* Tribromopyrrole, brominated acids, and other disinfection byproducts produced by disinfection of drinking water rich in bromide[J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(17): 3782-3793.
- [35] Sun Y X, Wu Q Y, Hu H Y, *et al.* Effect of bromide on the formation of disinfection by-products during wastewater chlorination[J]. Water Research, 2009, **43**(9): 2391-2398.

CONTENTS

CH ₄ 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 ₁₀ -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 ₂ 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 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 ₃ 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