

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示	高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)
2013年1月北京市PM _{2.5} 区域来源解析	李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)
2013年1月北京市一次空气重污染成因分析	程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)
上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征	常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)
厦门春季PM ₁₀ 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析	张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)
硫氧同位素示踪南京北郊大气PM _{2.5} 中硫酸盐来源	魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)
结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程	包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)
春季华东高山背景区域PM _{2.5} 和PM _{2.5-10} 中水溶性无机离子特征	苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)
落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究	杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)
四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征	何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)
深圳市船舶排放清单与时空特征研究	杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)
超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性	孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)
空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征	张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)
基于氢氧稳定同位素的黄土高原下二次蒸发效应	靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)
黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响	张永领,王明仕,董玉龙(1249)
调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响	王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)
春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响	于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)
降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析	任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)
北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价	钟惠舟,韦朝海(1277)
丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析	李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)
三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例	操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)
营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响	王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪(1301)
一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究	杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)
昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析	梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)
河道曝气提升河流水质的WASP模型研究	朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)
γ辐射降解水中的盐酸丙沙星的研究	祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)
电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收	陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)
Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水	孙文静,王亚旻,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)
生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素	孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)
308 nm光作用下α-Fe ₂ O ₃ 表面HNO ₃ 的光解	陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)
L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚	何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)
酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究	许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)
枯草芽孢杆菌对土霉素和2-甲基异冰片的降解动力学特性	马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)
嗜碱降解菌筛选及其对焦化废水强化处理	李静,李文英(1385)
Fe ³⁺ 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N ₂ O释放的影响	李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)
内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究	赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)
利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻	王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)
进水渗滤液总氮和BOD ₅ /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响	杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)
重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析	师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)
湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析	张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)
沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响	苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)
施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响	王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)
不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复	邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)
陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价	齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)
有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响	王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)
玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究	程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)
硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响	向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)
丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响	郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)
滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究	陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)
不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系	吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)
工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析	王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)
《环境科学》征订启事(1216)	
《环境科学》征稿简则(1248)	
信息(1163,1194,1248,1424)	

北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价

钟惠舟, 韦朝海*

(华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006)

摘要: 通过调查北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷生成潜能(trihalomethane formation potential, THMFP), 评价其作为水源水的风险。为此, 于2013年和2014年不同时段分别采集北江和广州河段不同地点的表层水样品254个。254个样品经过0.45 μm滤膜过滤后, 采用UFC(uniform formation condition)法对水样进行加氯消毒实验, 使用气相色谱(GC-ECD)法分析THMFP, 基于美国环保署(USEPA, 1997)的风险模型计算THMFP的致癌风险和非致癌风险, 使用致癌风险潜能灵敏性方法寻找致癌风险因子。结果发现, 三卤甲烷(trihalomethane, THMs)的生成潜能顺序为: 三氯甲烷(chloroform, CF) > 一溴二氯甲烷(bromodichloromethane, BDCM) > 二溴一氯甲烷(dibromochloromethane, DBCM) > 三溴甲烷(bromoform, BF), 其中三氯甲烷生成总量在101.92~2590.85 μg·L⁻¹范围内, 约占THMs总量的96.17%。以饮用途径计算THMs非致癌风险和致癌风险, 所有采样点THMs非致癌风险范围在2.03×10⁻⁷~1.00×10⁻⁵之间, 均不大于1.0×10⁻⁵(USEPA推荐风险阈值), 而致癌风险平均值分别为2.91×10⁻⁴(男性)和3.30×10⁻⁴(女性), 所有采样点THMs的致癌风险均高于USEPA推荐的风险阈值(1.0×10⁻⁶)。两江流域不同的是, 北江流域的BDCM致癌风险范围为2.50×10⁻⁵~6.37×10⁻⁴, 其风险值约为CF的2倍, BDCM是北江THMs致癌风险的主要来源, 而珠江广州河段的CF是致癌风险的主要来源, 其风险范围处于2.26×10⁻⁵~7.22×10⁻⁴之间。经致癌风险潜能灵敏性分析发现CF是致癌风险主要因子, 以北江和珠江广州河段为饮用水源是不安全的, 需要考虑预处理。

关键词: 三卤甲烷; 表层水; 分布; 风险; 珠江

中图分类号: X522; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1277-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.04.019

Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources

ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai*

(School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to investigate the risk of trihalomethane formation potential (THMFP) in finished waters as drinking water sources, 70 samples, 114 samples, and 70 samples were collected in November 2013, April 2014 and July 2014, respectively from different locations in the Beijiang River and the Pearl River. After filtration by 0.45 μm filter membrane, a total of 254 samples were chlorinated using Uniform Formation Condition (UFC) method for determining their THM Formation Potential (THMFP). The cancer risk and non-cancer risk of THMs were estimated using USEPA risk assessment model while dominant factors for total risk potential were estimated using sensitivity analysis. Among four THM species, chloroform (CF) was the highest ranging from 101.92-2590.85 μg·L⁻¹, followed by bromodichloromethane (BDCM), dibromochloromethane (DBCM) and bromoform (BF). Chloroform, the major THMs speciation, accounted for 96.17% of total THMs. Non-cancer and cancer risk from ingesting THMs was estimated. The result indicated that non-cancer risk of THMs level ranged from 2.03×10⁻⁷ to 1.00×10⁻⁵ and was not more than 1.0×10⁻⁵, the minimum or negligible non-cancer risk level defined by the USEPA. The average cancer risk of THMs was 2.91×10⁻⁴ for male and 3.30×10⁻⁴ for female in the two rivers, respectively, exceeding the minimum or negligible risk level defined by the USEPA (1.0×10⁻⁶). The difference of cancer risk between the two rivers was that BDCM ranging from 2.50×10⁻⁵ to 6.37×10⁻⁴ was approximately twice that of CF in Beijing River. BDCM played an important role in the total risk in the Beijiang River while CF played an important role in the total risk in the Pearl River, Guangzhou. Sensitivity analysis showed that CF played an important role in the estimation of total risk potential, and that the direct utilization of water sources from Beijiang River and the Pearl River Guangzhou is dangerous, thus pretreatment is necessary before chlorination.

Key words: trihalomethanes; surface water; distribution; risk; the Pearl River

北江和珠江广州段受纳的大量工业废水、生活污水和农业污水增加水体中溶解性有机物(dissolved organic carbon, DOC)的浓度^[1], 影响加氯消毒过程中消毒副产物的生成潜能(disinfection byproduct formation potential, DBPFP)^[2]。市政用水必须经过消毒以防病原体和水生疾病的传播, 消毒过程中会生成一系列具有致癌性的消毒副产物

(disinfection by-products, DBPs)^[3], 如包括三氯甲烷(chloroform, CF)、一溴二氯甲烷

收稿日期: 2014-09-23; 修订日期: 2014-12-03

基金项目: 国家自然科学基金委员会-广东省联合重点基金项目(U1201234)

作者简介: 钟惠舟(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为饮用水消毒副产物, E-mail: 820267038@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: cecwei@scut.edu.cn

(bromodichloromethane, BDCM)、一氯二溴甲烷(dibromochloromethane, DBCM)和三溴甲烷(bromoform, BF)在内的三卤甲烷。

北江和珠江广州河段提供生产、生活和生态用水,作为水资源的珠江段流域在加氯消毒过程中产生的三卤甲烷对人体有直接的健康风险。至今已超过 600 种消毒副产物被发现和证实^[4, 5]具有“三致性”,人体长期使用含有消毒副产物的水会引起致癌和不良的生殖反应^[6]。目前,国内关于流域水体三卤甲烷生成潜能(trihalomethane formation potential, THMFP)的研究集中在作为水源地的城市河段、黄浦江^[7]和珠江水系的部分流域^[8, 9],重点研究消毒副产物和其光学指标的关系,而鲜有全流域 THMFP 的分布和风险评价研究。消毒副产物致癌风险评价主要通过自来水厂出水^[10],供水设施出水^[11]和游泳池^[12, 13]中消毒副产物浓度的检测,使用美国环保署(USEPA)推荐的风险计算模型来加以评价,而很少涉及流域饮用水源地的风险评价。因此,以北江和珠江流域广州河段为水源地,对表层水加氯消毒实验,调查 THMFP 的分布,通过风险潜能灵敏性分析评价流域 THMs 的致癌风险和非致癌风险,建立致癌风险参数对致癌风险的影响关系,以期为北江和广州河段水体 THMs 风险管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样时间为 2013 年 11 月、2014 年 4 月和 2014 年 7 月,3 个时间段分别采集 70、114 和 70 个表层水样品。包括北江(韶关市至佛山市三水区段)和珠江流经广州河段共 38 个采样点,按上游到下游的原则依次编号,如图 1 所示。采样位置在 5%~10% 水深处,每次使用高密度聚四氟乙烯内衬采样瓶采集 1 L 水样,采样瓶顶部不留空气。将共采集的 254 个样品于 24 h 内放入 2℃ 冰箱中保存。

1.2 样品预处理

采集的水样经过 0.45 μm、50 mm 直径的水系滤膜(津隆)过滤,以减少水样中的胶体、悬浮物和微生物的影响。经过滤后的水样保存于 2℃ 的环境中,以备分析。

1.3 试剂和分析条件

(1) 试剂 实验过程中使用的消毒剂(4% 的 NaClO)、甲基叔丁基醚(methyl tertiary butyl ether, MTBE)和 THMs 均购自 Sigma-Aldrich 公司。THMs 标准样(色谱纯)按 USEPA 的标准方法配制。4 种

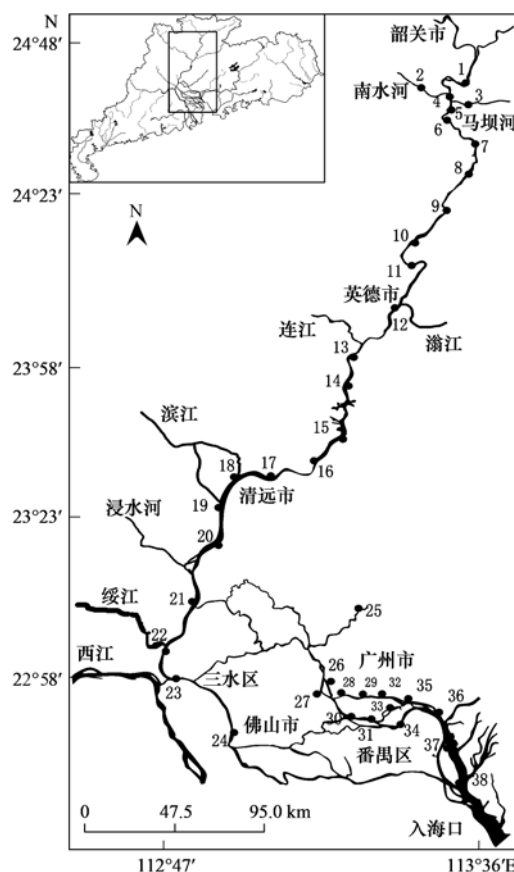


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites

三卤甲烷标样为:三氯甲烷、一溴二氯甲烷、一氯二溴甲烷和三溴甲烷。

(2) 分析条件 三卤甲烷由带电子捕获器的气相色谱(Agilent 7089)分析。色谱柱为 HP-5 安捷伦(Agilent 19091 J-413)毛细管色谱柱,内径 30 × 0.25 μm。GC 温控程序如下:

35℃ $\xrightarrow{10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}}$ 100℃ $\xrightarrow{40^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}}$ 220℃
(6 min) (5 min) (2 min)

1.4 实验方法

DOC 由 TOC 仪(Liqui TOC,德国)测得,检测下限为 0.05 mg·L⁻¹。UV₂₅₄ (ultraviolet absorbance at 254 nm) 是指在波长为 254 nm 处的单位比色皿光程下的紫外吸光度,可由紫外-可见分光光度计(Evolution 300, Thermo)测得, SUVA₂₅₄ (specific ultraviolet absorbance at 254 nm) 是 UV₂₅₄ 与 DOC 比值,单位是 L·(mg·m)⁻¹。具体实验方法:先将 DOC 稀释至 3 mg·L⁻¹ 以下,加氯实验采用 Summer 等^[14] 改良的 UFC 方法,具体步骤是:温度控制在 20℃ ± 1.0℃,用 2 mg·L⁻¹ 硼酸缓冲液调节 pH 值为 8 ± 0.2,在暗室反应 5 d,5 d 后游离余氯为 5.0 mg·L⁻¹

$\pm 0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 加氯实验在 60 mL 螺纹管进行,用余氯比色计(哈希 PC II, USA)测定其中余氯浓度,取 5 d 后游离余氯为 $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的反应液,加入 100 μL 10% Na_2SO_3 溶液抑制余氯反应. 生成的 THMs 先用 MTBE 作溶剂进行液-液分离萃取,萃取液由带电子捕获器的气相色谱(gas chromatography with an electronic capture detector, GC-ECD)依据美国环保署(USEPA551.1)方法检测 THMs 浓度.

1.5 三卤甲烷的饮用途径风险评价

饮用途径的风险可分为化学物质致癌风险和化学物质非致癌风险. 基于所检测的 THMFP,总三卤甲烷致癌风险(total THMs cancer risk, TTHM Cancer Risk)按式(1)计算:

$$\text{TTHM Cancer Risk} = \sum_{n=0}^3 \text{Risk}_{\text{CHCl}_{(3-n)}\text{Br}_n} \quad (1)$$

某一化合物的饮用途径致癌风险按式(2)计算:

$$R_{\text{oral}} = \text{CDI}_{\text{oral}} \times \text{SF}_{\text{oral}} \quad (2)$$

式中, SF_{oral} (slope factor)为某一特定化学物质的潜在因子或斜率因子, $[\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}]^{-1}$. 其值可在 USEPA 的综合风险信息系 统(integrated risk information system, IRIS)中查得. CDI_{oral} (chronic daily intake): 某一特定化学物质通过饮用途径的单位体重日均暴露剂量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$,使用式(3)计算所得:

$$\text{CDI}_{\text{oral}} = (\text{CW} \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}) / (\text{BW} \times \text{AT}) \quad (3)$$

式中,化合物浓度 CW (concentration of the chemical in water) 为 THMs 实测浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 饮用水摄入速率,IR(ingestion rate)^[15],USEPA 推荐 $2 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$; 暴露频率 EF(exposure frequency) 为 $365 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$; 平均寿命 ED(exposure duration): 74 a(男性)和 78 a(女性)^[16]. 体重 BW(body weight) 为 67.7 kg (男性)和 59.6 kg (女性)^[16]; 平均暴露时间 AT(average time) 为 $365 \times 74 \text{ d}$ (男性)和 $365 \times 78 \text{ d}$ (女性)^[17].

化学非致癌物质风险使用式(4)计算:

$$\text{非致癌风险} = (\text{CDI}_{\text{oral}} / \text{RfD}) \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中, CDI_{oral} : 同式(2)中的 CDI_{oral} , $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$; RfD(reference doseage) 为参考剂量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 10^{-6} 为单位转换系数. 在致癌风险评价模型中,IR, BW 和 AT 等参数综合参考了 USEPA 的推荐值和我国国家统计局的统计值. 表 1 归纳了三卤甲烷风险计算所用的 SF_{oral} 和 RfD.

此外,使用式(5)计算溴取代因子(bromine substitution factor, BSF)^[18]:

$$\text{BSF} = \frac{\sum_{n=0}^3 n(\text{CHCl}_{(3-n)}\text{Br}_n)}{3 \sum_{n=0}^3 \text{CHCl}_{(3-n)}\text{Br}_n} \times 100\% \quad (5)$$

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

式中,三卤甲烷的单位是 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. BSF 表示溴代甲烷占三卤甲烷的比例,当 $\text{BSF} = 0$ 时,表示产物只有 CHCl_3 ; 当 $\text{BSF} = 100$ 时,表示产物只有 CHBr_3 .

表 1 三卤甲烷风险计算的斜率因子¹⁾

Table 1 Slope factors of THMs for risk calculation				
化合物	CHCl_3	CHCl_2Br	CHClBr_2	CHBr_3
$\text{SF}_{\text{oral}}/[\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{day})^{-1}]^{-1}$	0.006 1	0.062	0.064	0.007 9
$\text{RfD}/\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{day})^{-1}$	0.01	0.02	0.02	0.02

1) 来自风险评价信息系统(risk assessment information system, RAIS, 2005), http://rais.orml.gov/homepage/rap_docs.shtml

1.6 致癌风险潜能灵敏性分析

致癌风险潜能灵敏性是用于寻找致癌风险因子的方法^[19]. 在致癌风险评价过程,式(2)~(4)中的所有参数,包括 CF($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、BDCM($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、DBCM($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、BF($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、TTHMs($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、IR($\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$)、EF($\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$)、ED(a)、BW(kg) 和 AT(a),将这些参数的具体数值以雷达图形式在不同坐标轴展示,表示参数对致癌风险计算值影响的大小. 各参数之间相互独立,互不影响. 某参数的数值越大表示该参数对 THMs 致癌风险影响越大,即判断该参数为致癌风险因子.

2 结果与讨论

2.1 THMs 生成潜能水平和 BSF 空间分布

由于 4 种 THMs 的致癌风险计算值对 TTHMs 的致癌风险贡献不同,而 BSF 的大小反映 THMs 中溴代甲烷产物占 THMs 总量的比例,进而影响 TTHMs 的致癌风险大小. 因此,TTHMs 致癌风险分析的前提是分析 THMs 的生成潜能水平,即 4 种 THMs 的比例.

使用 UFC 法对采集的 254 个样品进行加氯消毒实验,然后使用 GC-ECD 检测加氯实验后产生的

4 种 THMs 的浓度,使用(5)式计算 BSF 值,列举不同采样点的 THMFP 和 BSF 的平均值. THMFP 和 BSF 值的分布如图 2 所示.

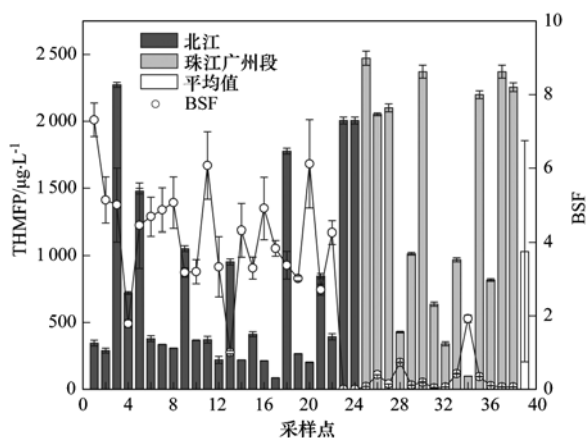


图 2 北江和珠江广州河段水体的 THMFP 和 BSF 分布

Fig. 2 Distribution of THMFP and BSF in the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou

在加氯实验过程中,THMs 的总量为 $101.92 \sim 2590.85 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,4 种 THMs 的平均值分别是: $976.34 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (CF), $50.73 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (BDCM), $2.37 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (DBCM), $1.24 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (BF),THMs 的浓度($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)比大约为: CF: BDCM: DBCM: BF = 1 671: 63: 2: 1,其中三氯甲烷约占 THMs 总量的 96.17%.

总体来看,珠江广州河段水体中 THMFP 的含量总体上大于北江的 THMFP. 采样点 3、5、13、18、21、23、24、25、26、27、30、35、37 和 38 的 THMFP 浓度均大于平均值($1030.69 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),这些采样点分布在北江流域的污水河道汇入口,有工业分布的城市周边区域和人口密集地区,其余分布在农田区域,森林区域采样点的 THMFP 浓度均低于平均值. THMFP 的空间分布呈现城市周边区域和人口密集地区较高的特征.

Chow 等^[20]对美国的 Sacramento Rivers 和 San Joaquin Rivers 进行长达一年的 THMs 统计研究发现,THMFP 能达到的 $1444 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的浓度. 北江的 BSF 比珠江广州河段大 91.29%,由于溴的取代反应而生成溴代甲烷,THMs 由一溴代甲烷向二溴代甲烷和三溴代甲烷转变. BSF 的增大,使 THMFP 有减小的趋势^[20]. 说明北江水体在加氯消毒过程中会生成较多的溴代甲烷,而广州河段则以 CF 为主要生成物.

2.2 DOC 和 SUVA₂₅₄ 值

水体中的腐殖质被认为是 THMs 的前体物^[21]. 一般来说,天然水体中含 50% 以上的腐殖质^[22]. SUVA₂₅₄用于描述天然水体中芳香性,其值越高表明

芳香性物质越多^[23],所以,测定 DOC 和计算 SUVA₂₅₄ 的值用以分析 THMs 前体物的寡众. 各采样点的 DOC 和 SUVA₂₅₄ 值如图 3 所示. 采样点 1~24 为北江流域,25~38 为珠江广州河段. 北江流域的 DOC 范围在 $1.46 \sim 50.99 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间. 采样点 3、5、13、18、21、23、24 分布在北江流域的污水河道汇入口上下游,周边有工业分布的城市区域和人口密集的地区. 在北江流域范围,DOC 产生波动的原因是: 外源 DOC 的输入导致北江水体中 DOC 值升高,而水体自净作用则使 DOC 值降低. 从 SUVA₂₅₄ 变化值可看出,污水排放口和人口密集区域的水体芳香性物质含量较高,导致 THMs 前体物含量较高.

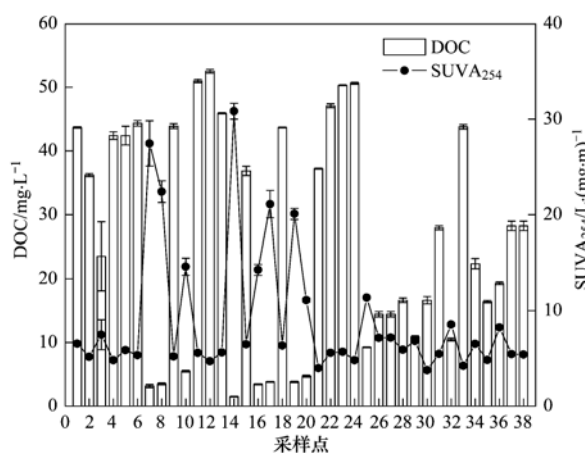


图 3 各采样点的 DOC 和 SUVA₂₅₄ 的值

Fig. 3 DOC and SUVA₂₅₄ from different sampling sites

珠江广州河段的 DOC 值的范围在 $9.23 \sim 43.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,相对于北江而言,珠江广州河段的平均 DOC 浓度和 SUVA₂₅₄ 维持在一个较低的水平,由于支流汇流的稀释作用,DOC 和水体的芳香性物质的含量较低.

虽然在腐殖质含量较多的水体中会产生较高 THMFP^[24],何洪威等^[8]发现珠江水体在加氯消毒过程中产生的 64.6% THMs 来源于腐殖质,但对比图 2 和图 3 可以发现,在腐殖质含量较高的采样点,THMFP 在平均值范围内,外源 DOC 的输入是使得 THMFP 升高的主要原因,也增加了北江和珠江广州河段作为饮用水源地的风险.

2.3 DOC、SUVA₂₅₄ 和 THMs 之间的关系

DOC、SUVA₂₅₄ 和 THMs 分布的差异,表明不同采样点的 DOC 化学结构存在差异,导致 THMFP 的不同. 为了分析 THMs 前体物化学结构的共同特征,使用 SPSS 软件对所有采样点的 DOC、SUVA₂₅₄ 和 4 种 THMs 进行相关性分析,结果列于表 2 中.

表 2 DOC、SUVA₂₅₄和 THMs 之间的关系矩阵¹⁾ (n = 254)

	DOC	SUVA ₂₅₄	CF	BDCM	DBCM	BF	THMs
DOC	1	-0.661 **	0.187 *	0.268 **	-0.075	-0.042	0.209 *
SUVA ₂₅₄		1	-0.125	0.269 **	0.433 **	-0.156	-0.094
CF			1	0.057	0.288 **	-0.134	0.996 **
BDCM				1	0.651 **	-0.141	0.014
DBCM					1	-0.059	0.345 **
BF						1	-0.121
THMs							1

1) ** 为在 $P < 0.01$ 水平上相关性显著, * 为在 $P < 0.05$ 水平上相关性显著

SUVA₂₅₄能指代 THMs 前体物是因为 DOC 中含有碳碳双键共轭结构和芳香类物质^[21],表 2 显示 DOC、SUVA₂₅₄和 4 种 THMs 两两变量之间没有较好的线性关系,说明 DOC 中芳香性物质和生成的 THMs 不成比例关系,SUVA₂₅₄不适于较好地指代 THMs 的生成.流域在长期的微生物降解作用和腐殖化作用下,使得 THMs 前体物的化学结构相似^[25].研究中 THMs 前体物化学结构不相同,是受流域外源 DOC 输入的影响.

2.4 THMs 非致癌风险分析

非致癌风险体现在人体因接触三卤甲烷而导致黄疸,影响中枢神经系统和肝肿大^[26]的可能性.经饮用的途径,THMs 对人体的非致癌风险以 THMs 的参考剂量(RfD)为标准作为衡量.通过式(4)分别计算 4 种 THMs 的非致癌风险平均值,得到如图 4 所示的结果.4 种 THMs 的非致癌风险平均值大小顺序分别为: 3.20×10^{-6} (CF) $> 7.44 \times 10^{-8}$ (BDCM) $> 5.83 \times 10^{-9}$ (DBCM) $> 2.13 \times 10^{-9}$ (BF),非致癌风险范围在 $2.03 \times 10^{-7} \sim 1.00 \times 10^{-5}$

之间,均不大于 USEPA 推荐阈值的 1.0×10^{-5} ,属于可接受范围. CF 的非致癌风险平均值约是 Karim 等^[27]研究结果的 50%,是 Amjad 等^[28]研究结果的 36.36%~66.40%.非致癌风险值表示以北江和广州河段为饮用水源,以 THMs 参考剂量,长期饮用该水源地的水,估算每 100 万人会有 0~4 人出现蕾丝黄疸,肝肿大等非致癌病例的可能性.

2.5 THMs 致癌风险分析

THMs 的致癌风险主要是引起非遗传毒性作用诱导动物产生肿瘤^[29]和生殖毒性^[6]的可能性.基于不同采样点所检测 THMFp 的平均值,使用 USEPA 风险评价模型(1)~(3)分别计算男性和女性饮用途径的致癌风险,不同地点的 THMs 致癌风险如图 5 所示.所有采样点 THMs 的致癌风险均高于 USEPA 推荐的致癌风险管理阈值(1.0×10^{-6}).在北江流域的 THMs 致癌风险范围是: $4.26 \times 10^{-5} \sim 1.02 \times 10^{-3}$ (男性)和 $4.84 \times 10^{-5} \sim 1.15 \times 10^{-3}$ (女性),而广州河段的 THMs 致癌风险范围在: $2.26 \times 10^{-5} \sim 6.36 \times 10^{-4}$ (男性)和 $2.57 \times 10^{-5} \sim 7.22 \times 10^{-4}$ (女性).

Mishra 等^[19]对印度的恰尔肯德邦和西孟加拉

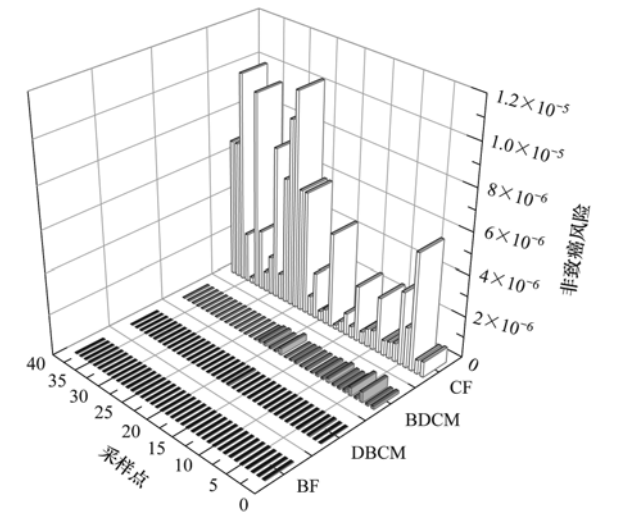


图 4 THMs 非致癌风险分布

Fig. 4 Distribution of non-cancer risk of THMs

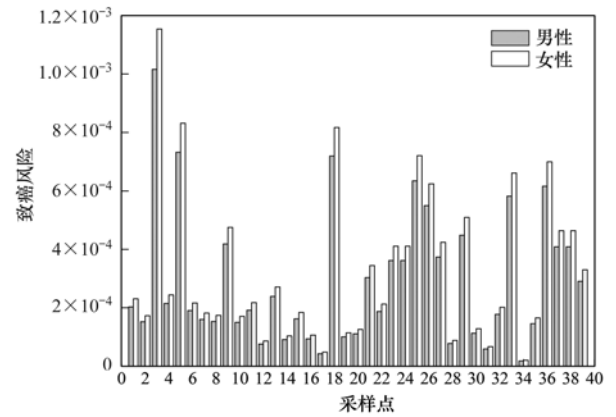


图 5 男性和女性的致癌风险分布

Fig. 5 Estimated lifetime cancer risk from THM consumption for males and females

邦 8 间水厂的 THMs 致癌风险计算结果(平均值)为: 8.99×10^{-4} (男性)和 8.92×10^{-4} (女性), Amjad 等^[28]的研究也发现巴基斯坦不同地区的 THMs 风险分别为 0.74×10^{-4} 和 1.24×10^{-4} , 这都和本研究的风险值处在同一风险等级. 在采样点 34 出现最低风险值, 分别为 1.81×10^{-5} (男性)和 2.05×10^{-5} (女性). 最高的致癌风险在采样点 3, 分别为 1.02×10^{-3} (男性)和 1.15×10^{-3} (女性), 平均致癌风险为: 2.91×10^{-4} (男性)和 3.30×10^{-4} (女性). 致癌风险值表示以北江和广州河段为饮用水水源, 长期(80 年)饮用含有 THMFP 的水, 每 100 万人会有 291 人(男性)和 330 人(女性)致癌的可能性.

Lee 等^[30]发现 CHCl_3 是饮用水消毒过程中的主要产物, 4 种 THMs 的生成潜能大小顺序为: $\text{CF} > \text{BDCM} > \text{DBCM} > \text{BF}$, BDCM 的致癌风险值是 CF 的 2~6 倍. 水体中 Br^- 增加 THMs 总量以溴代甲烷为代表, 生成的细胞毒性和遗传毒性是三氯甲烷的 10 倍以上^[18]. 为进一步了解风险来源, 使用式(2)~(3)分别计算 4 种 THMs 的各自致癌风险, 列举北江和珠江广州河段水体在加氯消毒过程中产生的致癌风险分布, 如图 6 所示.

北江流域水体在加氯消毒后, 经致癌风险计算, 4 种 THMs 平均致癌风险顺序为: $\text{BDCM} (1.45 \times 10^{-4}) > \text{CF} (1.17 \times 10^{-4}) > \text{DBCM} (6.35 \times 10^{-6}) > \text{BF} (7.36 \times 10^{-8})$, 虽然产生的 CF 总量占优, BDCM 总量仅次于 CF, 但 CF 和 BDCM 的风险范围分别是: $1.26 \times 10^{-5} \sim 3.62 \times 10^{-4}$ 和 $2.50 \times 10^{-5} \sim 6.37 \times 10^{-4}$, 即 BDCM 的风险值约为 CF 的 2 倍, BDCM 是北江的 THMs 主要致癌风险来源. 这与图 2 中 BSF 值分布规律一致, 说明北江水体含有较多的 Br^- 致 BDCM 成为北江的 THMs 主要致癌风险来源.

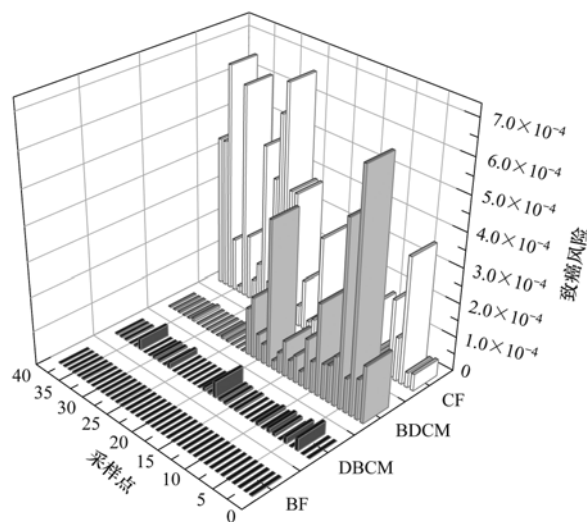


图 6 THMs 致癌风险分布

Fig. 6 Distribution of THMs cancer risk

广州河段的 THMs 致癌风险范围是: $2.26 \times 10^{-5} \sim 7.22 \times 10^{-4}$, 4 种 THMs 平均致癌风险按大小的顺序排列: $\text{CF} (3.29 \times 10^{-4}) > \text{BDCM} (5.05 \times 10^{-6}) > \text{DBCM} (4.81 \times 10^{-6}) > \text{BF} (6.46 \times 10^{-7})$, 风险主要来源于 CHCl_3 .

从目前研究的结果来看, 两条河流的致癌因子不同, 总体来说, CF 的风险值约为 BF 的 10^3 倍, 致癌风险主要来源于 CF, 次要来源是 BDCM. 首先控制 DOC 的浓度, 再控制 Br^- 浓度, 可以减少 CF 和 BDCM 的生成以降低 THMs 致癌风险.

2.6 致癌风险潜能灵敏性分析

致癌风险潜能灵敏性分析是为了探讨显著影响北江和珠江广州河段 THMs 致癌风险的因素. 影响致癌风险的参数有: CF、BDCM、DBCM、BF、TTHMs、IR、EF、ED、BW 和 AT. 在采用式(1)~(3)计算致癌风险时, 参数值的差异对风险计算结果有不同的影响^[19]. 如图 7 所示, 风险潜能灵敏性

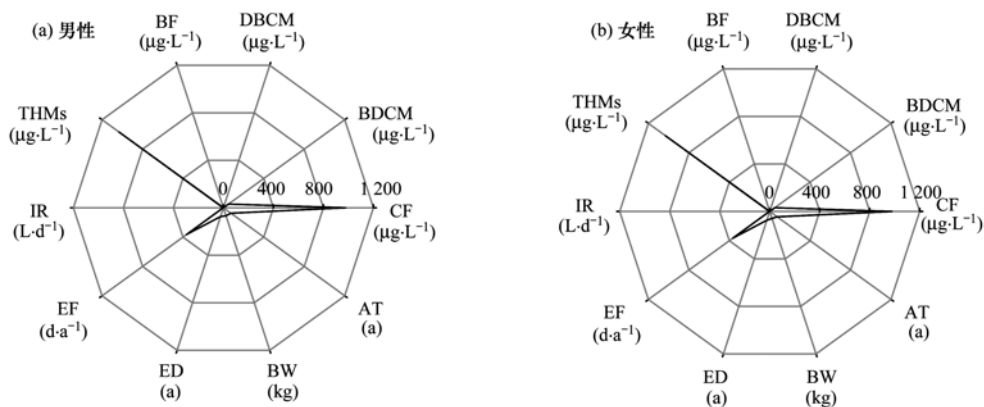


图 7 男性和女性的致癌风险灵敏性雷达

Fig. 7 Radar plots for sensitivity analysis of cancer risk in males and females

分析是将参数具体值在雷达图上以不同的坐标轴的形式表示的方法,表示参数对致癌风险值影响的大小。

图 7 显示,无论男性或女性的致癌风险,THMs 和 CF 都是对 TTHMs 致癌风险值影响显著的因素。由于加氯过程中产生的 CF 占了 THMs 总量的 96.17%,所以 CF 是 TTHMs 致癌风险主要因子。这与致癌风险分析的结果相一致,也正好解释了致癌风险分布和 THMFP 呈现相似的分布的原因。

3 结论

(1) 北江和珠江广州河段的水体在加氯消毒过程中,在生成的 4 种 THMs 总量中,CF 为主要类型, BDCM 为次要类型。

(2) 北江和珠江广州河段的 THMs 致癌风险值均大于 1.0×10^{-6} (USEPA 推荐的风险管理阈值)。北江的 THMs 致癌风险主要来源是 BDCM,广州河段水体 THMs 的致癌风险主要来源为 CF。CF 为北江和珠江广州河段 THMs 的致癌风险因子。以北江和珠江广州河段为饮用水源地是不安全的,需要加以预处理或深度处理。

(3) THMs 的非致癌风险均不大于 USEPA 推荐的非致癌风险阈值 (1.0×10^{-5}),处于可接受的风险范围。

致谢: 本研究得到 Clemson University 的周达诚 (Alex T. Chow) 教授的指导,在采样过程中得到中国科学院地球化学研究所安太成教授课题组的帮助,在测试分析时得到中山大学杨欣教授的帮助,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] Meng F G, Huang G C, Yang X, *et al.* Identifying the sources and fate of anthropogenically impacted dissolved organic matter (DOM) in urbanized rivers[J]. *Water Research*, 2013, **47** (14): 5027-5039.
- [2] 林细萍, 卢益新, 张德明, 等. THMFP 及 HAAFP 的测定方法[J]. *中国给水排水*, 2003, **19**(10): 98-100.
- [3] Uyak V, Toroz I. Investigation of bromide ion effects on disinfection by-products formation and speciation in an Istanbul water supply[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **149** (2): 445-451.
- [4] Krasner S W, Westerhoff P, Chen B Y, *et al.* Occurrence of disinfection byproducts in united states wastewater treatment plant effluents[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43** (21): 8320-8325.
- [5] Krasner S W, Weinberg H S, Richardson S D, *et al.* Occurrence of a new generation of disinfection byproducts[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(23): 7175-7185.
- [6] Villanueva C M, Castaño-Vinyals G, Moreno V, *et al.* Concentrations and correlations of disinfection by-products in municipal drinking water from an exposure assessment perspective [J]. *Environmental Research*, 2012, **114**: 1-11.
- [7] 董倩倩, 张艾, 李咏梅, 等. 黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 958-963.
- [8] 何洪威, 周达诚, 王保强, 等. 珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系[J]. *环境科学*, 2012, **33** (9): 3076-3082.
- [9] 梁艳红, 何洪威, 周达诚. 珠江水质和含氮消毒副产物的时空变化[J]. *环境化学*, 2012, **31**(9): 1308-1314.
- [10] Pardakhti A R, Bidhendi G R N, Torabian A, *et al.* Comparative cancer risk assessment of THMs in drinking water from well water sources and surface water sources [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **179** (1-4): 499-507.
- [11] Uddameri V, Venkataraman K. Assessing the effect of initial vapor-phase concentrations on inhalation risks of disinfection-by-products (DBP) in multi-use shower facilities [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2013, **15** (4): 591-606.
- [12] Parrat J, Donzé G, Iseli C, *et al.* Assessment of occupational and public exposure to trichloramine in Swiss indoor swimming pools: a proposal for an occupational exposure limit[J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 2012, **56**(3): 264-277.
- [13] Chen M J, Lin C H, Duh J M, *et al.* Development of a multi-pathway probabilistic health risk assessment model for swimmers exposed to chloroform in indoor swimming pools[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **185**(2-3): 1037-1044.
- [14] Summers R S, Hooper S M, Shukairy H M, *et al.* Assessing DBP yield: uniform formation conditions[J]. *Journal-American Water Works Association*, 1996, **88**(6): 80-93.
- [15] Liu S G, Zhu Z L, Fan C F, *et al.* Seasonal variation effects on the formation of trihalomethane during chlorination of water from Yangtze River and associated cancer risk assessment[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(9): 1503-1511.
- [16] National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook-2004 [EB/OL]. <http://www.sei.gov.cn/hgjj/yearbook/2004/html/editore.htm>.
- [17] Lee S C, Guo H, Lam S M J, *et al.* Multipathway risk assessment on disinfection by-products of drinking water in Hong Kong[J]. *Environmental Research*, 2004, **94**(1): 47-56.
- [18] 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 & Technology*, 2006, **40**(9): 3050-3056.
- [19] Mishra B, Gupta S, Sinha A. Human health risk analysis from disinfection by-products (DBPs) in drinking and bathing water of some Indian cities[J]. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2014, **12**(1): 73.
- [20] Chow A T, Dahlgren R A, Harrison J A. Watershed sources of

- disinfection byproduct precursors in the Sacramento and San Joaquin rivers, California [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(22): 7645-7652.
- [21] Chow A T, Dahlgren R A, Zhang Q, *et al.* Relationships between specific ultraviolet absorbance and trihalomethane precursors of different carbon sources [J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 2008, **57**(7): 471-480.
- [22] Oliver B G, Thurman E M, Malcolm R L. The contribution of humic substances to the acidity of colored natural waters [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, **47**(11): 2031-2035.
- [23] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi 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 & Technology*, 2003, **37**(20): 4702-4708.
- [24] Singer P C. Humic substances as precursors for potentially harmful disinfection by-products [J]. *Water Science and Technology*, 1999, **40**(9): 25-30.
- [25] Kalbitz K, Schwesig D, Schmerwitz J, *et al.* Changes in properties of soil-derived dissolved organic matter induced by biodegradation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(8): 1129-1142.
- [26] Viana R B, Cavalcante R M, Braga F M G, *et al.* Risk assessment of trihalomethanes from tap water in Fortaleza, Brazil [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **151**(1-4): 317-325.
- [27] Karim Z, Muntaz M, Kamal T. Health Risk Assessment of Trihalomethanes from Tap Water in Karachi, Pakistan [J]. *Journal-Chemical Society of Pakistan*, 2011, **33**(2): 215-219.
- [28] Amjad H, Hashmi I, Rehman M S U, *et al.* Cancer and non-cancer risk assessment of trihalomethanes in urban drinking water supplies of Pakistan [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **91**: 25-31.
- [29] DeAngelo A B, Daniel F B, Most B M, *et al.* The carcinogenicity of dichloroacetic acid in the male Fischer 344 rat [J]. *Toxicology*, 1996, **114**(3): 207-221.
- [30] Lee H K, Yeh Y Y, Chen W M. Cancer risk analysis and assessment of trihalomethanes in drinking water[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2006, **21**(1): 1-13.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-guo, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitritation System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinpo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行