

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第2期

Vol.39 No.2

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

特别策划:挥发性有机污染物(VOCs)排放特征、减排控制、环境政策研究专辑(III)

序	郝郑平(477)
我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响	陈天增,葛艳丽,刘永春,贺泓(478)
基于 PMF 量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响:以南京市江北工业区为例	胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)
南京工业源挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估	张玉欣,安俊琳,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(502)
某工业园区 VOCs 臭氧生成潜势及优控物种	武蕾丹,王秀艳,杨文,郭风艳,刘锦(511)
某石化工业园区秋季 VOCs 污染特征及来源解析	胡天鹏,李刚,毛瑶,郑煌,秦世斌,闵洋,张家泉,邢新丽,祁士华(517)
某典型石油工业园区冬季大气中 VOCs 污染特征	毛瑶,李刚,胡天鹏,郑煌,安艺伟,闵洋,邢新丽,祁士华(525)
杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征	卢滨,黄成,卢清,杨强,井宝莉,夏阳,唐伟,顾泽平(533)
秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征	虎啸宇,刘航,王乃玉,王灿,揣莹(543)
浙江省汽摩配行业挥发性有机物排放特征及排放系数	杨忠平,王浙明,何志桥,徐志荣,滕富华,张华岳(551)
汽车制造企业恶臭来源及影响分析	石田立,张伟霞,陈小方,张嘉妮,梁小明,范丽雅,叶代启(557)
典型酿造业厂界无组织排放 VOCs 污染特征与风险评价	高占啟,胡冠九,王荃,朱冰清,陈素兰(567)
成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评价	李友平,唐娅,范忠雨,蒲敏,章金莲,杨铮铮,吴大磊(576)
上海市住宅区儿童卧室中甲醛和苯系物浓度的现场检测分析	蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨(585)
江苏省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	夏思佳,刘倩,赵秋月(592)
江门市人为源挥发性有机物排放清单	陈小方,张伟霞,陈柄旭,张嘉妮,范丽雅,叶代启(600)
长江三角洲 2014 年天然源 BVOCs 排放、组成及时空分布	刘岩,李莉,安静宇,张伟,严茹莎,黄凌,黄成,王红丽,王卿,王敏(608)
北京城市副中心(通州区)加油站 VOCs 排放清单	黄玉虎,胡玮,李贝贝,纪旋,肖宇,任碧琪,秦建平(618)
公交车使用废食用油制生物柴油的污染物排放及 VOCs 成分谱	胡志远,林骠骑,黄成,王红丽,景盛翱,楼狄明(626)
生物滴滤塔净化甲基叔丁基醚废气的研究	褚其英,姚露露,吕雄标,叶杰旭,叶虹霓,潘梁柱,陈建孟,陈东之(633)
低温等离子体-生物耦合系统对复合 CVOCs 的降解	郭海倩,缪晶晶,姜理英,张迪(640)
水质异味期间钱塘江杭州段表层水体中挥发性和半挥发性有机物污染特征及健康风险评价	陈峰,唐访良,徐建芬,王奕奕,阮东德,张伟,周姗(648)
城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征	许美佳,王海亮,李春梅,徐雄,王东红(655)
不同通勤模式暴露于 VOCs 的健康风险评价	佟瑞鹏,张磊(663)
家具制造过程中 VOCs 的来源分析及环境健康风险评价	佟瑞鹏,张磊,杨校毅,朱旭波,任传耕(672)
北京市 PM _{2.5} 时空分布特征及其与 PM ₁₀ 关系的时空变异特征	杨文涛,姚诗琪,邓敏,王艳军(684)
小型池塘水-气界面 CH ₄ 冒泡通量的观测	张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶(691)
中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险	王鑫璇,张鸿,王艳萍,罗骥(703)
铁岭市河流氮素时空分布及源解析	杨丽标,雷坤,乔飞,孟伟(711)
基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征	刘堰杨,秦纪洪,刘琛,孙辉,唐翔宇,范诗雨(720)
宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价	徐美娟,鲍波,陈春燕,王永川,高夫燕,虞效益(729)
巢湖水体可溶性重金属时空分布及污染评价	吴蕾,刘桂建,周春财,刘荣琼(738)
广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性	蓝小龙,宁增平,肖青相,黄正玉,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(748)
内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制	郑晓英,朱星,王菊,周翔,徐亚东,韦诚,高雅洁,周敏(758)
河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程	徐雅倩,徐飘,杨正健,刘德富,马骏(765)
降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析	刘心愿,宋林旭,纪道斌,刘德富,崔玉洁,黄佳维,赵冲,唐咏春,平明明(774)
城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系	梁晓东,余杨,张敏,段龙飞,彭文启(783)
三峡库区兰陵溪流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征	张林,黄志霖,肖文发,曾立雄,宋文梅(792)
基于污染评价的地下水中优控污染物筛选	赵鹏,何江涛,王曼丽,黄德亮,王磊,梁雨(800)
硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响	陶华强,邵冬海,张超,宋圆圆,逯彩彩,郭建博(811)
活性炭/高分子复合水凝胶对水中亚甲基蓝和 Cu(II) 的去除性能	孔岩,庄媛,石宝友,韩志勇,郝昊天,韩昆,于建伟(819)
三维网状 HZO@SGH 对水中氟离子的吸附作用和机制	马福臻,周少奇,刘泽珩,支亮亮,周璇(828)
MgO/活性炭催化臭氧氧化降解有机物的作用机制	许珊珊,林存旺,丁亚磊,童少平(838)
污水厂二级出水中难降解有机物的臭氧化特性	侯瑞,金鑫,金鹏康,苟邦耀,王晓昌(844)
染料探针技术对二级出水中优势污染物的定量检测	孟晓荣,王穗桢,王磊,王旭东,乔茹凯,任婷婷,唐卫婷(852)
污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试	李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏泽,张杰(859)
间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响	刘宏,南彦斌,李慧,王翔,彭永臻,陈永志(865)
好氧/除磷颗粒对亚硝化颗粒污泥启动的影响	李冬,郭跃洲,曹美忠,张泽文,李帅,张杰(872)
处理垃圾渗滤液的 SBR 中微生物种群与污泥比阻	蔡丽云,黄泽彬,须子唯,江志斌,林莉莉,黄宇(880)
基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价	姚宏,张士超,刘明丽,王静,鲁根涛,于晓华(889)
西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价	刘畅,宋波,张云霞,雷梅,田美玲,余元元,庞瑞(899)
开封城市土壤磷素组成特征及流失风险	白秀玲,马建华,孙艳丽,刘德新(909)
电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价	尹伊梦,赵委托,黄庭,程胜高,赵珍丽,余葱葱(916)
上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价	孟媛,刘翠翠,仇雁翎,周轶慧,朱志良(927)
四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征	迟荪琳,王卫中,徐卫红,李桃,李彦华,张春来(935)
硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控	李园星露,叶长城,刘玉玲,李丹阳,刘寿涛,罗海艳,刘孝利,铁柏清,孙健(944)
电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析:以清远市龙塘镇为例	严晓,李淑圆,王美欢,许榕发,郑晶,任明忠(953)

城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征

许美佳^{1,2}, 王海亮¹, 李春梅¹, 徐雄¹, 王东红^{1*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心中国科学院饮用水科学与技术重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学中丹学院, 北京 100049)

摘要: 分析了中国 2 座沿海城市(S 市和 L 市)自来水管网中挥发性有机物(VOCs)的赋存状态, 对检出的 VOCs 进行了健康风险评价, 并探讨了检出 VOCs 在城市自来水管网中的分布规律. 在本文选取的 47 种 VOCs 目标化合物中, 所研究的 2 座城市自来水管网中共检出 16 种 VOCs, 在 2 市共同检出的 VOCs 为 11 种, 以卤代烃类化合物为主, 其中又以三卤甲烷类 VOCs (一溴二氯甲烷、二溴一氯甲烷和三溴甲烷)的检出率最高(92% ~ 100%). 在浓度水平上, 除一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷外, 其他检出 VOCs 在 2 市自来水管网中的最大浓度均未超过我国《生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006)》中相关化合物的限值. 一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷在 2 座城市自来水管网中不仅浓度水平超标(限值分别为 $60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 而且其致癌风险值(LCR)也处于不可接受的水平($>10^{-4}$), 二者应当被给予足够的重视或被列为 2 市自来水管网中优先控制的污染物. 此外, 本研究还选择了 8 种检出率大于 90% 的 VOCs, 探讨了它们在 S 市自来水管网中的空间分布规律, 结果表明, 所研究的 VOCs (除甲苯外)在该市自来水管网中的浓度都随管网输送距离的增加而逐渐降低.

关键词: 挥发性有机物(VOCs); 自来水管网; 空间分布特征; 健康风险评价; 沿海城市

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0655-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703155

Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems

XU Mei-jia^{1,2}, WANG Hai-liang¹, LI Chun-mei¹, XU Xiong¹, WANG Dong-hong^{1*}

(1. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) in the urban drinking water distribution systems for two coastal cities (S City and L City) in China were analyzed. Health risk assessments of VOCs detected in tap water were performed, and the distribution characteristics of VOCs in the tap water pipe network were also investigated. Among 47 target VOCs, 16 compounds were detected, of which 11 were detected in both S City and L City. Halogenated hydrocarbons were the most commonly detected VOCs, with trihalomethanes (including bromodichloromethane, dibromochloromethane, and bromoform) having the highest detection frequencies (92% - 100%). With the exception of bromodichloromethane and dibromochloromethane, the maximum concentrations of detected VOCs in both cities complied with the relevant limits regulated by the standards for drinking water quality (GB 5749-2006). For bromodichloromethane and dibromochloromethane, not only did their concentrations exceed the standard limits of GB 5749-2006 ($60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ for bromodichloromethane and $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ for dibromochloromethane), but their lifetime cancer risks (LCR) were estimated at unacceptable levels ($>10^{-4}$). Therefore, these two compounds should be given sufficient attention or be classified as priority control pollutants in municipal water supply networks. In addition, the spatial distribution of eight VOCs with high detection frequencies ($>90\%$) in the tap water pipe network of S City was investigated. The concentrations of VOCs (excluding toluene) in this urban drinking water distribution system gradually decreased with increasing distance from the drinking water treatment plant.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); tap water pipe network; spatial distribution characteristics; health risk assessment; coastal city

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是指在标准大气压(101.3 kPa)下沸点低于 250℃的有机化合物, 可分为卤代有机物、单环芳烃、有机硫化物和亚砷、苯系物、三卤甲烷、丙酮和酯类等多个类别^[1, 2]. 尽管 VOCs 具有较高挥发性和较低水溶性, 但其经常在水中被检出, 包括地表水、地下水、污水、饮用水和融化雪水等多种水体中都有报道^[3-9]. 在水中检出率较高的 VOCs 主要是卤代烃类化合物(如二氯甲烷、三氯甲烷、一

溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷等)和苯系物(如苯、甲苯、乙苯和二甲苯等)^[2, 10, 11]. 研究表明, 许多 VOCs (尤其是卤代 VOCs)属于有毒有害污染物, 具有致癌、致畸或致突变等毒性效应, 即使在浓度很

收稿日期: 2017-03-17; 修订日期: 2017-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51290283, 21677155); 深圳市
科创委基础研究项目(JCYJ20150630114942290)

作者简介: 许美佳(1990~), 女, 硕士, 主要研究方向为水中污染物的分析与风险评价, E-mail: xumeijia510@163.com

* 通信作者, E-mail: dhwang@rcees.ac.cn

低的情况下仍会对人类健康产生不利的影响^[5, 12, 13]。

饮用水的水质安全问题一直是环保工作者和公众关注的焦点, 鉴于饮用水中 VOCs 的普遍检出及其对人类健康的潜在危害, 近年来饮用水中 VOCs 的研究已成为环境领域的研究热点。然而, 这些研究大多数只关注自来水厂出厂水中 VOCs 的赋存状态, 而缺少对饮用水输送管网中 VOCs 存在情况的研究。本研究采用吹扫捕集-气相色谱质谱联用 (T&P-GC/MS) 的方法对城市自来水管网中的 VOCs 进行检测分析, 旨在对中国 2 座沿海城市 (S 市和 L 市) 自来水管网中 VOCs 的赋存状态进行调查并对其进行健康风险评估, 同时对 VOCs 在自来水管网中的分布特征和规律进行研究, 以期了解我国城市饮用水的输送安全性提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 标准品与试剂

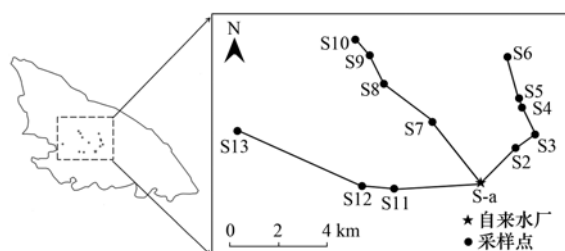
本研究选择了 47 种 VOCs 作为目标化合物, 这些目标 VOCs 只属于卤代烃类化合物和苯系物 2 类。卤代烃类化合物有 22 种, 分别为: 1,1-二氯乙烷、1,2-二氯丙烷、1,1,1-三氯乙烷、1,1,2-三氯乙烷、1,2,3-三氯丙烷、四氯化碳、1,1,1,2-四氯乙烷、1,2-二溴-3-氯丙烷、1,1-二氯乙烯、顺式-1,2-二氯乙烯、反式-1,2-二氯乙烯、1,1-二氯丙烯、顺式-1,3-二氯丙烯、反式-1,3-二氯丙烯、三氯乙烯、四氯乙烯、二溴甲烷、1,2-二溴乙烷、一溴二氯甲烷、二溴一氯甲烷、三溴甲烷和六氯丁二烯; 苯系物有 25 种, 分别为: 苯、甲苯、乙苯、邻二甲苯、对二甲苯、间二甲苯、1,2,4-三甲基苯、1,3,5-三甲基苯、正丙苯、异丙基苯、对异丙基甲苯、正丁基苯、仲丁基苯、叔丁基苯、氯苯、2-氯甲苯、4-氯甲苯、1,2-二氯苯、1,3-二氯苯、1,4-二氯苯、1,2,3-三氯苯、1,2,4-三氯苯、溴苯、萘和苯乙烯。

VOCs 混合标准品 (纯度 >98.0%) 与 H 同位素标记物 (对溴氟苯) 均购自美国 AccuStandard 公司, 甲醇 (HPLC 级) 购买于美国 Fisher Scientific 公司, 抗坏血酸 (优级纯) 和盐酸 (优级纯) 均购自国药集团化学试剂有限公司, 实验所用超纯水取自美国 Millipore 超纯水机 (MA, USA)。

1.2 样品的采集与处理

于 2016 年 5 月对中国 2 座沿海城市 (S 市和 L 市) 共计 4 个自来水厂的管网水进行了采集, S 市采集了 13 个水样: 1 个自来水厂出厂水 (S-a) 和 12

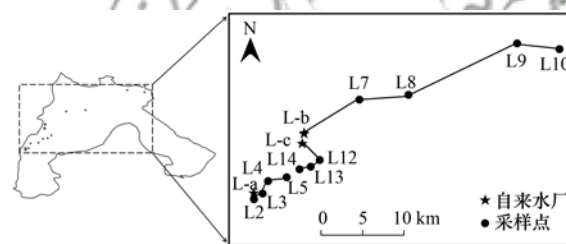
个管网水 (S2 ~ S13), L 市采集了 14 个水样: 3 个自来水厂出厂水 (L-a、L-b 和 L-c) 和 11 个管网水 (L2 ~ L5、L7 ~ L10 和 L12 ~ L14), 其采样点分别如图 1 和图 2 所示。采样时, 水样缓慢注入已预先加入 25 mg 抗坏血酸的 40 mL VOCs 棕色样品瓶中至水样充满整个采样瓶以确保样品瓶顶部不留任何空间, 然后迅速且同时加入 50 μL 6 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸水溶液和 20 μL 2.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 对溴氟苯溶液, 拧紧瓶盖。采集好的水样存放在 4℃ 的冰箱中, 并在 14 d 内完成水样的分析。



S-a 是 S 市自来水厂

图 1 S 市管网的采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites of tap water in S City



L-a、L-b 和 L-c 是 L 市 3 个不同的自来水厂

图 2 L 市管网的采样点分布示意

Fig. 2 Sampling sites of tap water in L City

S 市自来水厂 (其出厂水为 S-a) 采用的是深度水处理工艺, 工艺流程为预氧化、混凝沉淀、过滤、臭氧、活性炭和加氯消毒, 预氧化剂为氯胺, 混凝剂为聚合硫酸铝溶液, 氯消毒剂为次氯酸钠, 日常投加量需保证出厂水中余氯量为 0.80 ~ 1.20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; L 市 1 号自来水厂 (其出厂水为 L-a) 采用的是常规水处理工艺, 工艺流程为预氧化、混凝沉淀、过滤和加氯消毒, 预氧化工艺为预氯化, 混凝剂为聚合氧化铝溶液, 氯消毒剂的日常投加量为 3.00 ~ 4.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 保证出厂水中余氯量为 0.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; L 市 2 号自来水厂 (其出厂水为 L-b) 和 3 号自来水厂 (其出厂水为 L-c) 均采用深度水处理工艺, 工艺流程为预氧化、混凝沉淀、过滤、臭氧、活性炭和加氯消毒, 预氧化剂为氯和臭氧, 而 L 市 2 号自来水厂和 3 号自来水厂所用的混凝剂、

氯消毒剂以及出厂水中余氯量均与 L 市 1 号自来水厂保持一致。同时,本研究对 4 个自来水厂的原水进行了采集,所采集的水样经 0.45 μm 玻璃滤膜过滤后用于无机阴离子(F⁻、Cl⁻、Br⁻、NO₂⁻、NO₃⁻和 SO₄²⁻)、溶解有机碳(DOC)和 UV₂₅₄分析。比紫外吸光度(SUVA)是 UV₂₅₄与 DOC 的比值,用于表征水中有机物亲疏水特性,SUVA 值越小表示其水样中亲水性物质越多^[14]。4 个自来水厂原水的基本水质参数列在表 1 中。

表 1 S 市和 L 市 4 个自来水厂原水的基本水质参数

Table 1 Basic water quality parameters of the raw water samples from four drinking water treatment plants in S City and L City									
自来水厂	F ⁻ /mg·L ⁻¹	Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	Br ⁻ /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	DOC /mg·L ⁻¹	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	SUVA /L·(mg·m) ⁻¹
S 市	0.37	23.22	nd ¹⁾	nd	7.15	38.66	1.45	0.03	2.28
L 市 1 号	0.88	89.68	nd	nd	7.18	91.18	3.81	0.08	2.05
L 市 2 号	0.86	89.04	nd	0.17	7.55	89.21	3.77	0.08	2.10
L 市 3 号	1.30	150.30	nd	0.32	3.63	111.83	4.67	0.10	2.08

1) 表示未检出

原水水样的无机阴离子(F⁻、Cl⁻、Br⁻、NO₂⁻、NO₃⁻和 SO₄²⁻)、DOC 和 UV₂₅₄分别采用 ICS-1500 离子色谱仪(美国 Dionex 公司)、Fusion TOC 总有机碳分析仪(美国 Teledyne Tekmar 公司)和 HACH DR5000 紫外分光光度计(美国 HACH 公司)测定,具体分析方法参照文献[16]。

1.4 方法的线性、检出限和回收率

为了消除干扰,本文采用内标法定量。本研究所用实验方法线性良好,在线性范围内绝大多数目标化合物的相关系数(R²)在 0.95 以上,检出限均在 0.200 μg·L⁻¹ 以下,最低可低至 0.005 μg·L⁻¹ (苯乙烯),回收率范围为 90% ~ 117%,可用于水中痕量 VOCs 的测定。

1.5 健康风险评价

采用 US EPA 推荐的健康风险评价模型及相关参数^[15, 17, 18]来评估自来水管网中检出 VOCs 的健康风险。健康风险分别采用致癌风险(lifetime cancer risk, LCR)和非致癌风险(hazard index, HI)进行表征,其计算方法如下:

LCR = CDI × SF

HI = CDI / RfD

式中, CDI 为每日单位体重摄入量 [mg·(kg·d)⁻¹], SF 为污染物的致癌斜率因子(kg·d·mg⁻¹), RfD 为污染物的非致癌参考剂量 [mg·(kg·d)⁻¹]。

饮水途径暴露计算 CDI 的公式为:

1.3 分析仪器条件及参数

采用吹扫捕集-气相色谱质谱联用仪(T&P-GC/MS)对水中 VOCs 进行定量分析,吹扫捕集(purge and trap, P&T)装置为美国 Tekmar 公司的 3100 型,气相色谱/质谱联用仪(GC/MS)为美国安捷伦公司的 6890N/5973MSD 系列。用气密注射器(25 mL, 安捷伦公司)准确吸取 20 mL 水样注入到 P&T 的吹扫管中,以高纯氮气进行吹扫捕集后进行 GC/MS 分析。VCOs 测定的仪器条件及参数详见文献[11, 15]。

CDI = (c × DR × EF × ED) / (BW × AT)

式中, c 为水中化学物质的质量浓度(mg·L⁻¹), DR 为日饮用水摄入量(2 L·d⁻¹), EF 为暴露频率(365 d·a⁻¹), ED 为暴露持续时间(70 a), BW 为平均体重(70 kg), AT 为平均暴露时间(25 550 d)。

US EPA 对 LCR 提出了介于 10⁻⁶ ~ 10⁻⁴ 的潜在致癌风险区间, LCR < 10⁻⁶ 时表示致癌风险可以忽略, LCR > 10⁻⁴ 时表示致癌风险处于不可接受的水平;而 HI 的评估阈值为 1, HI < 1 时表示非致癌毒性危害可能不显著, HI > 1 时表示可能存在非致癌毒性危害。

2 结果与讨论

2.1 目标 VOCs 在自来水管网中的赋存状态

表 2 列出了在 S 市和 L 市自来水管网中目标 VOCs 的检出情况。47 种目标 VOCs 中共有 16 种被检出,其中卤代烃类化合物和苯系物所占比例分别为 81% 和 19%。检出的 16 种 VOCs 中,有 11 种在所研究的 2 市自来水管网中均有检出,分别为 1,2-二氯丙烷、顺式-1,2-二氯乙烯、反式-1,3-二氯丙烯、四氯乙烯、二溴甲烷、一溴二氯甲烷、二溴一氯甲烷、三溴甲烷、苯、甲苯和叔丁基苯,其中卤代烃类化合物和苯系物所占比例分别为 73% 和 27%。2 座城市自来水管网中 VOCs 的存在情况(数量和类别)具有较大的相似性,并且均以卤代烃类化合物为主要污染物,该结论与其他人的报道具有

一致性^[2, 19]。在 2 市共同检出的 11 种 VOCs 中, 除二溴甲烷和叔丁基苯外, 其余 9 种 VOCs 在 2 市自来水管网中的检出率均超过 50%, 其中有 3 种化合物检出率超过 90%, 分别为一溴二氯甲烷、二溴一氯甲烷和三溴甲烷, 均属于三卤甲烷类污染物, 是自来水净化消毒过程中产生的典型消毒副产物, 也是水中检出最主要和最频繁的一类 VOCs^[2, 8, 20~23]。

从浓度水平来看, 除一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷外, 其他检出 VOCs 在 2 市自来水管网中的最大检出浓度范围为 $0.31 \sim 97.32 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度平均值范围和浓度中位数范围均为 $0.31 \sim 60.11 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在检出的 16 种目标 VOCs 中, 有 9 种在我国《生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006)》中规定了限值(见表 2), 其中只有一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷的浓度超过了限值(限值分别为 $60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 二者在 S 市自来水管网中的超标率分别为 100% 和 92%, 而在 L 市自来水管网中的超标率则均达 100%。一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷属于典型的氯化消毒副产物, 主要来源于自来水管网的氯化消毒过程^[23, 24]。由于本研究中的 4 个自来水厂均采用了预加氯和加氯消毒的水处理工艺, 所以, 一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷在 2 市自来水管网中均被普遍检出, 且二者的平均检出浓度也最高, 甚至超过了 GB 5749-2006 中的标准限值。值得注意的是, 尽管 4 个自来水厂的原水中均未检出 Br^- , 但在 4 个自来水厂出厂水及管网水中却普遍检出含溴的消毒副产物(如一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷等), 可能的原因是自来水厂使用的氯化消毒剂中普遍含有微量的溴化物^[16, 25, 26], 在自来水厂加氯消毒处理工艺过程中, 这些溴化物与氯消毒剂反应而生成含溴消毒副产物。

一溴二氯甲烷被认为是可能致癌物, 而二溴一氯甲烷则被认定为内分泌干扰物质^[15, 27, 28], 因此, 一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷在 2 座城市自来水管网中的浓度水平及其可能存在的潜在危害必须引起重视。

2.2 自来水管网中检出目标 VOCs 的健康风险评估

尽管本次调查中 2 市自来水管网中绝大多数目标 VOCs(仅一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷除外)的检出浓度均低于 GB 5749-2006 中的相关限值, 但这并不能保证自来水管网中这些浓度未超标的 VOCs 对人类健康是无害的, 同时具有高检出浓度的 VOCs 也并不一定意味着其会对人类健康产生不利影响, 因为评估管网水中赋存的 VOCs 对人类健

康是否具有危害作用不仅与其在管网水中的浓度水平有关, 而且与其毒性数据等参数也相关。因此, 为评估 2 市自来水管网中检出 VOCs 是否会对人类健康产生危害作用, 本文采用 US EPA 推荐的健康风险评价模型及相关参数^[15, 17]来评估自来水管网中检出 VOCs 的健康风险。由于化合物基础毒性数据(如污染物致癌斜率因子 SF 和非致癌参考剂量 RfD)的限制, 本研究只能对部分检出的 VOCs 进行健康风险评价, 其评估结果列于表 3 中。

化合物的健康风险评价主要包括 2 个方面, 即致癌风险和非致癌风险评价, 本文对 10 种具有 SF 值的 VOCs 进行了致癌风险评价, 对 13 种具有 RfD 值的 VOCs 进行了非致癌风险评价。根据 US EPA 提供的化合物健康风险评估参考阈值^[17], 在 S 市发现 2 种 VOCs(三氯乙烯和四氯乙烯)具有潜在的致癌风险(LCR 在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 数量级之间), 3 种 VOCs(1,2-二溴乙烷、一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷)的致癌风险处于不可接受的水平($\text{LCR} > 10^{-4}$)。其中 1,2-二溴乙烷的致癌风险虽然最大(3.43×10^{-3}), 但其仅在一个采样点中被检出(S10), 可能存在着偶然性, 而一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷则是在 S 市所有采样点中的致癌风险均处于不可接受的水平; 同样, 二者在 L 市所有采样点中的致癌风险也均处于不可接受的水平, 与 S 市不同的是在 L 市所发现的具有潜在致癌风险的 VOCs 为四氯乙烯和三溴甲烷。因此, 一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷是 2 市自来水管网中主要的致癌风险贡献者, 应当给予足够的重视, 此外, 四氯乙烯被发现在 2 市自来水管网中均具有潜在的致癌风险, 四氯乙烯在 2 市自来水管网中的存在情况也应被给予关注。对于 2 市 13 种 VOCs 非致癌风险的评估表明, 在 S 市只有一溴二氯甲烷可能存在非致癌风险($\text{HI} > 1$), 该化合物的非致癌风险被发现在 S 市 38% 的采样点中出现; 而在 L 市除一溴二氯甲烷外, 二溴一氯甲烷也同样可能存在非致癌风险, 一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷在 L 市具有非致癌风险的采样点分别达到 71% 和 50%。因此, 一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷 2 市自来水管网中的非致癌风险也不可忽略。总体上看, 一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷在 2 市自来水管网中均具有较高的健康风险, 应被列为 2 市自来水管网中优先控制的污染物。

2.3 目标 VOCs 在自来水管网中的分布规律

在本研究中, 所采集的 S 市管网水均来自同一个自来水厂的出厂水(即 S-a), 其出厂水可分为 3

表 2 目标 VOCs 在 S 市和 L 市自来水管网中的检出情况¹⁾

Table 2 Occurrences and detection frequencies of target VOCs in tap water samples for both S City and L City														
序号	化合物	类别	毒性分类	S 市					L 市					
				GB 5749-2006 限值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	检出率 /%	Min $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Max $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Mean $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Meadium $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	检出率 /%	Min $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Max $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Mean $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Meadium $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
1	1,1-二氯乙烷	卤代烃		/	8	0.32	0.32	0.32	0.32	nd	nd	nd	nd	nd
2	1,2-二氯丙烷	卤代烃		/	100	0.03	1.05	0.70	0.74	50	0.17	3.79	0.90	0.40
3	1,1,2-三氯乙烷	卤代烃		/	nd	nd	nd	nd	nd	7	0.85	0.85	0.85	0.85
4	四氯化碳	卤代烃	可能致癌物	2	nd	nd	nd	nd	nd	14	0.22	0.52	0.37	0.37
5	顺式-1,2-二氯乙烯	卤代烃		50	69	0.59	4.20	1.97	1.67	71	0.75	8.68	3.62	2.27
6	反式-1,3-二氯丙烯	卤代烃	可能致癌物	/	69	0.14	1.22	0.77	0.78	93	0.17	2.86	1.53	1.65
7	三氯乙烯	卤代烃	致癌物	70	100	0.62	14.66	3.43	2.37	nd	nd	nd	nd	nd
8	四氯乙烯	卤代烃	致癌物	40	92	0.65	1.88	1.30	1.27	86	0.17	1.31	0.80	0.80
9	二溴甲烷	卤代烃	遗传毒性物质	/	23	2.21	17.76	7.65	2.97	57	2.85	16.58	7.72	5.51
10	1,2-二溴乙烷	卤代烃	可能致癌物	/	8	60.11	60.11	60.11	60.11	nd	nd	nd	nd	nd
11	一溴二氯甲烷	卤代烃	可能致癌物	60	100	369.59	979.55	656.14	626.89	100	509.39	1588.42	982.35	1001.91
12	二溴一氯甲烷	卤代烃	内分泌干扰物质	100	100	84.05	321.57	227.80	231.61	100	310.10	1506.45	773.28	703.20
13	三溴甲烷	卤代烃	内分泌干扰物质	100	92	0.91	4.21	2.72	2.54	100	9.91	97.32	47.29	42.29
14	苯	苯系物	致癌物	10	100	0.34	2.28	1.28	1.23	79	0.25	2.27	1.07	1.05
15	甲苯	苯系物	内分泌干扰物质	700	92	3.99	78.33	22.00	15.29	93	1.38	19.00	5.87	3.49
16	叔丁基苯	苯系物		/	15	0.40	0.43	0.42	0.42	7	0.31	0.31	0.31	0.31

1) “Min”表示最小值,“Max”表示最大值,“Mean”表示平均值,“Meadium”表示中位值,“nd”表示未检出,“/”表示未查到相关数值

表 3 S 市和 L 市自来水管网中目标 VOCs 的健康风险评估结果¹⁾

Table 3 Health risks of target VOCs detected in tap water for both S City and L City									
序号	化合物	SF /kg·d·mg ⁻¹	RID /mg·(kg·d) ⁻¹	S 市		L 市			
				致癌风险(LCR)	非致癌风险(HI)	致癌风险(LCR)	非致癌风险(HI)		
1	1,1-二氯乙烷	0.005 7	0.2	5.21 × 10 ⁻⁸	4.57 × 10 ⁻⁵	/	/		
2	1,2-二氯丙烷	/	/	/	/	/	/		
3	1,1,2-三氯乙烷	0.057	0.004	/	/	1.38 × 10 ⁻⁶	6.07 × 10 ⁻³		
4	四氯化碳	0.13	0.000 7	/	/	8.17 × 10 ⁻⁷ ~ 1.93 × 10 ⁻⁶	8.98 × 10 ⁻³ ~ 2.12 × 10 ⁻²		
5	顺式-1,2-二氯乙烯	/	0.002	/	8.43 × 10 ⁻³ ~ 6.00 × 10 ⁻²	/	1.07 × 10 ⁻² ~ 1.24 × 10 ⁻¹		
6	反式-1,3-二氯丙烯	/	/	/	/	/	/		
7	三氯乙烯	0.046	0.000 5	8.15 × 10 ⁻⁷ ~ 1.93 × 10 ⁻⁵	3.54 × 10 ⁻² ~ 8.38 × 10 ⁻¹	/	/		
8	四氯乙烯	0.54	0.01	1.00 × 10 ⁻⁵ ~ 2.90 × 10 ⁻⁵	1.86 × 10 ⁻³ ~ 5.37 × 10 ⁻³	2.62 × 10 ⁻⁶ ~ 2.02 × 10 ⁻⁵	4.86 × 10 ⁻⁴ ~ 3.74 × 10 ⁻³		
9	二溴甲烷	/	0.01	/	6.31 × 10 ⁻³ ~ 5.07 × 10 ⁻²	/	8.14 × 10 ⁻³ ~ 4.74 × 10 ⁻²		
10	1,2-二溴乙烷	2	0.009	3.43 × 10 ⁻³	1.90 × 10 ⁻¹	/	/		
11	一溴二氯甲烷	0.062	0.02	6.55 × 10 ⁻⁴ ~ 1.74 × 10 ⁻³	5.30 × 10 ⁻¹ ~ 1.40	9.02 × 10 ⁻⁴ ~ 2.81 × 10 ⁻³	7.28 × 10 ⁻¹ ~ 2.27		
12	二溴一氯甲烷	0.084	0.02	2.02 × 10 ⁻⁴ ~ 7.72 × 10 ⁻⁴	1.20 × 10 ⁻¹ ~ 4.6 × 10 ⁻¹	7.44 × 10 ⁻⁴ ~ 3.62 × 10 ⁻³	4.43 × 10 ⁻¹ ~ 2.15		
13	三溴甲烷	0.0079	0.02	2.05 × 10 ⁻⁷ ~ 9.50 × 10 ⁻⁷	1.30 × 10 ⁻³ ~ 6.01 × 10 ⁻³	2.24 × 10 ⁻⁷ ~ 2.20 × 10 ⁻⁵	1.42 × 10 ⁻² ~ 1.39 × 10 ⁻¹		
14	苯	0.055	0.004	5.34 × 10 ⁻⁷ ~ 3.58 × 10 ⁻⁶	2.43 × 10 ⁻³ ~ 1.63 × 10 ⁻²	3.93 × 10 ⁻⁷ ~ 3.57 × 10 ⁻⁶	1.79 × 10 ⁻³ ~ 1.62 × 10 ⁻²		
15	甲苯	/	0.08	/	1.43 × 10 ⁻³ ~ 2.80 × 10 ⁻²	/	4.93 × 10 ⁻⁴ ~ 6.79 × 10 ⁻³		
16	叔丁基苯	/	/	/	/	/	/		

1) “/”表示未查到相关数值或无对应风险评估值

条路线进行供水(见图1),分别为:① S-a、S2、S3、S4、S5、S6,② S-a、S7、S8、S9、S10,③ S-a、S11、S12、S13;而L市的管网水分别取自3个不同的自来水厂(L-a、L-b和L-c)(见图2),其供水路线为:① L-a、L2、L3、L4、L5,② L-b、L7、L8、

L9、L10,③ L-c、L12、L13、L14. 由于本次调查中L市的管网水取自不同的自来水厂,且不同水厂的供水管网相互交错、彼此影响,因此,本文只选取了S市自来水管网作为代表来探究目标VOCs在城市自来水管网中的空间变化规律.同时,如图3所

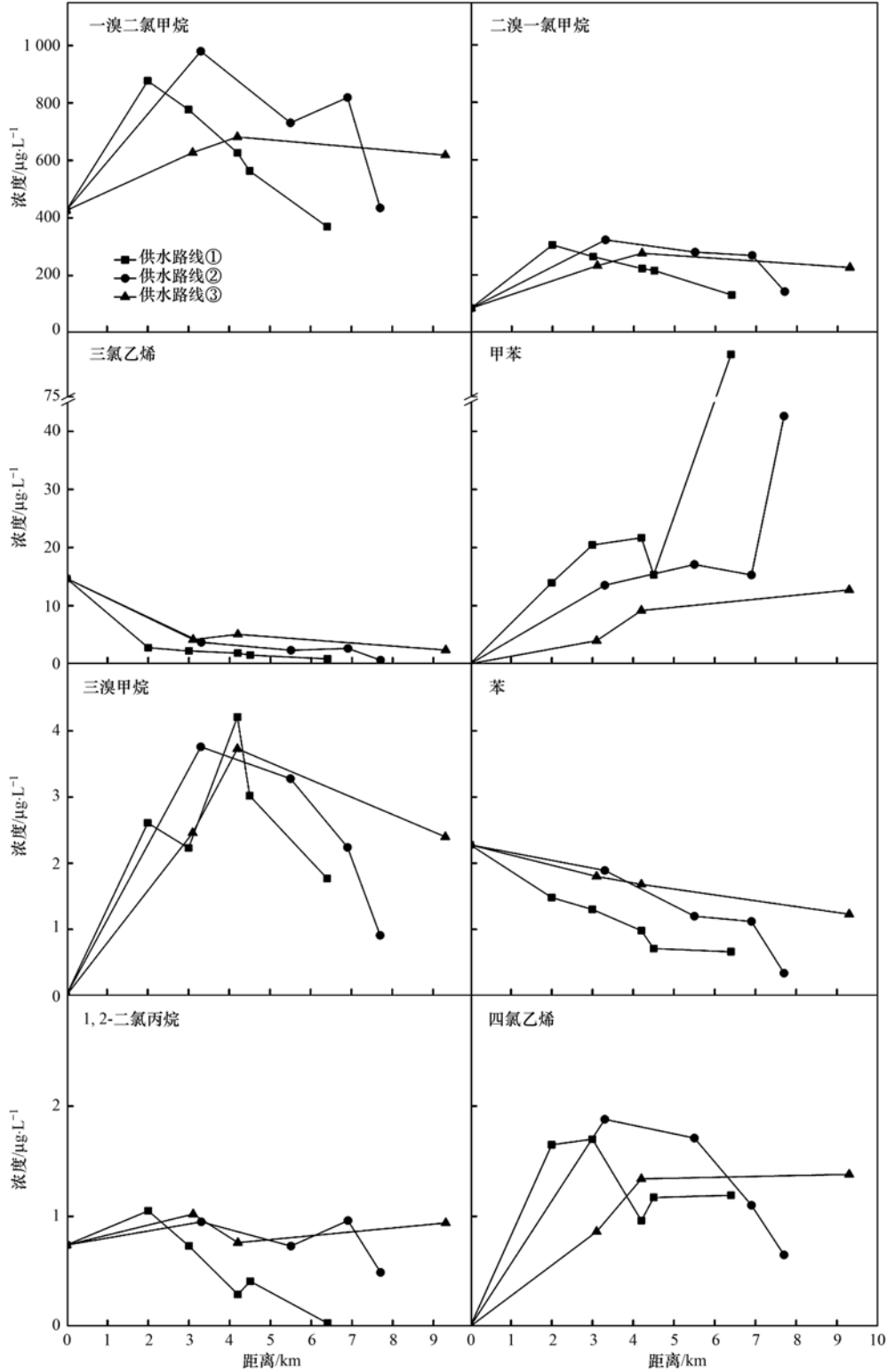


图3 检出率大于90%的目标VOCs在S市自来水管网中的变化规律
Fig. 3 Distribution of target VOCs with high detection frequencies ($>90\%$) in tap water of S City

示,为了使探究的结果更具科学性,本文仅选取在 S 市管网水中检出率大于 90% 的 VOCs(共 8 种)作为研究对象,探讨其在 S 市不同供水路线中的分布规律,其中每条供水路线中的采样点按照距水厂的距离顺序做图(图 3)。

图 3 显示了选择的 8 种目标 VOCs 在 S 市管网水中的浓度随自来水输送管网距离延长而变化的情况,发现除甲苯外其他目标 VOCs 在自来水管网的浓度随着自来水管网输送距离的增加而降低,只有甲苯的浓度随着自来水管网输送距离的增加而逐渐升高。由于 VOCs 通常具有较高挥发性和较低水溶性,所以一般来说自来水厂出厂水中含有的 VOCs 会随着自来水管网输送距离的增加而不断从水中挥发出来,从而使得其在水中的浓度逐渐降低。如三氯乙烯和苯,二者在本次 S 市采样最远端(距出厂水 9.3 km 处)管网水中的浓度均比其在出厂水中的浓度要低,与出厂水中浓度相比,二者在最远端采样点(S13)中的浓度分别降低了 84% 和 46%。然而一溴二氯甲烷、二溴一氯甲烷、三溴甲烷、1,2-二氯丙烷和四氯乙烯在自来水管网中的浓度是随着管网输送距离的增加先升高后降低,其主要原因可能是由于自来水厂出厂水中余氯的存在而不断形成消毒副产物^[29]。当输送管网距离足够长时,自来水管网中这些以三卤甲烷为主的 VOCs 浓度便开始逐渐降低,由图 3 可知,在 S 市 3 条不同供水路线中这类 VOCs 在距出厂水 3~4 km 左右后,其在自来水管网中的浓度开始降低。而甲苯是本次调查中唯一一个浓度随管网输送距离增加而逐渐升高的化合物,其在出厂水中未检出,在本次 S 市采样最远端(距出厂水 9.3 km 处)管网水中的浓度为 $12.69 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。尽管如此,甲苯在距出厂水 9.3 km 处的管网水中的浓度仍未超过 GB 5749-2006 中的限值($700 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。由于管网水是一个特殊的水环境,自来水管网中的 VOCs 不仅来源多样,而且管网中 VOCs 还会发生迁移转化等过程^[29],因此,本研究对于 S 市采样最远端管网水中甲苯含量的增加尚不能给出一个确切合理的解释。

3 结论

(1)在所分析的 2 大类 47 种 VOCs 中,卤代烃类化合物是 2 座城市自来水管网中最主要检出的 VOCs,其中又以三卤甲烷类 VOCs(一溴二氯甲烷、二溴一氯甲烷和三溴甲烷)为主。而且一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷这 2 种化合物在 2 市自来水管网

中的检出浓度超过了 GB 5749-2006 中规定的限值。

(2)本文对有基础毒性数据的 10 种 VOCs 进行了致癌风险评价,对 13 种 VOCs 进行了非致癌风险评价。结果表明,一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷在 2 市自来水管网中均具有较高的健康风险,应给予足够的重视,建议将二者列为 2 市自来水管网中优先控制的污染物。

(3)除甲苯外,本文所研究的其他 VOCs 在城市自来水管网中的浓度随着管网输送距离的增加而逐渐降低,即使部分三卤甲烷类 VOCs 在距出厂水短距离内浓度会升高,但只要管网输送距离足够长,其在自来水管网中的浓度便会随管网距离的增加而降低。

参考文献:

- [1] Cervera M I, Beltran J, Lopez F J, *et al.* Determination of volatile organic compounds in water by headspace solid-phase microextraction gas chromatography coupled to tandem mass spectrometry with triple quadrupole analyzer [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2011, **704**(1-2): 87-97.
- [2] Chary N S, Fernandez-Alba A R. Determination of volatile organic compounds in drinking and environmental waters [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2012, **32**: 60-75.
- [3] Ma H L, Zhang H J, Wang L X, *et al.* Comprehensive screening and priority ranking of volatile organic compounds in Daliao River, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(5): 2813-2821.
- [4] Martí N, Aguado D, Segovia-Martínez L, *et al.* Occurrence of priority pollutants in WWTP effluents and Mediterranean coastal waters of Spain [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **62**(3): 615-625.
- [5] Liu L H, Zhou H D. Investigation and assessment of volatile organic compounds in water sources in China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **173**(1-4): 825-836.
- [6] Nikolaou A D, Golfinopoulos S K, Kostopoulou M N, *et al.* Determination of volatile organic compounds in surface waters and treated wastewater in Greece [J]. *Water Research*, 2002, **36**(11): 2883-2890.
- [7] Pecoraino G, Scalici L, Avellone G, *et al.* Distribution of volatile organic compounds in Sicilian groundwaters analysed by head space-solid phase micro extraction coupled with gas chromatography mass spectrometry (SPME/GC/MS) [J]. *Water Research*, 2008, **42**(14): 3563-3577.
- [8] Ikem A. Measurement of volatile organic compounds in bottled and tap waters by purge and trap GC-MS: are drinking water types different? [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2010, **23**(1): 70-77.
- [9] Sieg K, Fries E, Püttmann W. Analysis of benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes and *n*-aldehydes in melted snow water via solid-phase dynamic extraction combined with gas chromatography/mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2008, **1178**(1-2): 178-186.
- [10] Kuster M, Díaz-Cruz S, Rosell M, *et al.* Fate of selected pesticides, estrogens, progestogens and volatile organic

- compounds during artificial aquifer recharge using surface waters [J]. *Chemosphere*, 2010, **79**(8): 880-886.
- [11] Chen X C, Luo Q, Wang D H, *et al.* Simultaneous assessments of occurrence, ecological, human health, and organoleptic hazards for 77 VOCs in typical drinking water sources from 5 major river basins, China [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **206**: 64-72.
- [12] Soh S C, Abdullah M P. Determination of volatile organic compounds pollution sources in Malaysian drinking water using multivariate analysis [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, **124**(1-3): 39-50.
- [13] Di Lorenzo T, Borgoni R, Ambrosini R, *et al.* Occurrence of volatile organic compounds in shallow alluvial aquifers of a Mediterranean region: baseline scenario and ecological implications [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **538**: 712-723.
- [14] 陈卫, 袁哲, 陶辉, 等. SUVA 值与超滤膜污染的关系 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2011, **39**(2): 129-132.
- Chen W, Yuan Z, Tao H, *et al.* Relationship between SUVA value and ultrafiltration pollution [J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2011, **39**(2): 129-132.
- [15] 陈锡超, 罗茜, 宋瀚文, 等. 北京官厅水库特征污染物筛查及其健康风险评价 [J]. *生态毒理学报*, 2013, **8**(6): 981-992.
- Chen X C, Luo Q, Song H W, *et al.* Screening of priority contaminants and health risk assessment in Beijing Guanting Reservoir [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, **8**(6): 981-992.
- [16] Li C M, Wang D H, Xu X, *et al.* Formation of known and unknown disinfection by-products from natural organic matter fractions during chlorination, chloramination, and ozonation [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **587-588**: 177-184.
- [17] 宋瀚文, 王东红, 徐雄, 等. 我国 24 个典型饮用水源地中 14 种酚类化合物浓度分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(2): 355-362.
- Song H W, Wang D H, Xu X, *et al.* Occurrence of 14 phenols in 24 typical drinking water sources of China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(2): 355-362.
- [18] 张春艳, 高柏, 郭亚丹, 等. 鄱阳湖区域地下水有机污染物特征与风险评价 [J]. *生态毒理学报*, 2016, **11**(2): 524-530.
- Zhang C Y, Gao B, Guo Y D, *et al.* Pollution characteristic and risk assessment of organic pollutants in groundwater of Poyang Lake [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, **11**(2): 524-530.
- [19] 李丽, 许秋瑾, 梁存珍, 等. 江苏某县乡镇饮用水中挥发性有机物的检测及其风险评价 [J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(4): 1-4.
- Li L, Xu Q J, Liang C Z, *et al.* Detection and risk assessment of volatile organic compounds in rural drinking waters in a county of Jiangsu Province [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(4): 1-4.
- [20] Lara-Gonzalo A, Sánchez-Uría J E, Segovia-García E, *et al.* Critical comparison of automated purge and trap and solid-phase microextraction for routine determination of volatile organic compounds in drinking waters by GC-MS [J]. *Talanta*, 2008, **74**(5): 1455-1462.
- [21] 刘祖发, 刘嘉仪, 张骏鹏, 等. 广州市饮用水中挥发性有机物的研究 [J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(1): 113-121.
- Liu Z F, Liu J Y, Zhang J P, *et al.* Research of VOCs in drinking water of Guangzhou [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(1): 113-121.
- [22] 陈锡超, 罗茜, 陈虎, 等. 自来水常规和深度处理工艺中挥发性有机物的变化规律 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4642-4648.
- Chen X C, Luo Q, Chen H, *et al.* Occurrence and distribution of volatile organic compounds in conventional and advanced drinking water treatment processes [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4642-4648.
- [23] 彭清涛, 胡文祥, 崔亮. 饮用水中卤代烃污染及其控制措施 [J]. *现代仪器*, 2005, **11**(1): 16-18.
- Peng Q T, Hu W X, Cui L. Pollution of halogenated hydrocarbon in drinking water and the control measures [J]. *Modern Instruments*, 2005, **11**(1): 16-18.
- [24] 花磊, 吴庆浩, 侯可勇, 等. 膜进样-单光子电离/化学电离-质谱仪在线检测水中 VOCs [J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3628-3634.
- Hua L, Wu Q H, Hou K Y, *et al.* Development of a membrane inlet-single photon ionization/chemical ionization-mass spectrometer for online analysis of VOCs in water [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3628-3634.
- [25] Asami M, Kosaka K, Kunikane S. Bromate, chlorate, chlorite and perchlorate in sodium hypochlorite solution used in water supply [J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 2009, **58**(2): 107-115.
- [26] Weinberg H S, Delcomyn C A, Unnam V. Bromate in chlorinated drinking waters: occurrence and implications for future regulation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(14): 3104-3110.
- [27] 徐小卫, 王东红, 钟文珏, 等. 2 种再生水深度处理工艺对有毒有机污染物去除效果的评价研究 [J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(5): 971-976.
- Xu X W, Wang D H, Zhong W J, *et al.* Assessment study on removal efficiency of toxic organic pollutants by two reclaimed water advanced treatment processes [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, **5**(5): 971-976.
- [28] 赵玉丽, 李杏放. 饮用水消毒副产物: 化学特征与毒性 [J]. *环境化学*, 2011, **30**(1): 20-33.
- Zhao Y L, Li X F. Drinking water disinfection byproducts: chemical characterization and toxicity [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, **30**(1): 20-33.
- [29] 张慧慧, 陈环宇, 何晓芳, 等. 饮用水管网中不同源有机污染物简析 [J]. *化工进展*, 2015, **34**(7): 2003-2008, 2030.
- Zhang H H, Chen H Y, He X F, *et al.* Analysis of organic pollutants from different sources in drinking water distribution system [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, **34**(7): 2003-2008, 2030.

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (477)
VOCs Emission from Motor Vehicles in China and Its Impact on the Atmospheric Environment	CHEN Tian-zeng, GE Yan-li, LIU Yong-chun, <i>et al.</i> (478)
Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model; A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing	 HU Kun, WANG Ming, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (493)
Source Analysis of Volatile Organic Compounds in the Nanjing Industrial Area and Evaluation of Their Contribution to Ozone	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jun-xiu, <i>et al.</i> (502)
Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park	WU Lei-dan, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (511)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of a Petrochemical Industrial Park During Autumn in China	HU Tian-peng, LI Gang, MAO Yao, <i>et al.</i> (517)
Characteristics of VOCs Pollution in the Winter Atmosphere of a Typical Petrochemical Industry Park	MAO Yao, LI Gang, HU Tian-peng, <i>et al.</i> (525)
Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China	LU Bin, HUANG Cheng, LU Qing, <i>et al.</i> (533)
Industrial VOCs Emission in Qinhuangdao	HU Xiao-yu, LIU Hang, WANG Nai-yu, <i>et al.</i> (543)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Auto/motorcycle Parts & Accessories Manufacturing in Zhejiang Province	 YANG Zhong-ping, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (551)
Stench Sources and Impact Analysis in Automobile Making	SHI Tian-li, ZHANG Wei-xia, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (557)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs Fugitively Emitted from Typical Brewers	GAO Zhan-qi, HU Guan-ju, WANG Hui, <i>et al.</i> (567)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu	LI You-ping, TANG Ya, FAN Zhong-yu, <i>et al.</i> (576)
Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors	 JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, <i>et al.</i> (585)
Emission Inventory of Anthropogenically Sourced VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Jiangsu Province	XIA Si-jia, LIU Qian, ZHAO Qiu-yue (592)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs in Jiangmen City	CHEN Xiao-fang, ZHANG Wei-xia, CHEN Bing-xu, <i>et al.</i> (600)
Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014	LIU Yan, LI Li, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (608)
VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing	HUANG Yu-hu, HU Wei, LI Bei-bei, <i>et al.</i> (618)
Pollutant Emissions from Diesel Buses Fueled with Waste Cooking Oil Based Biodiesel	HU Zhi-yuan, LIN Biao-qi, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (626)
Treatment of the Waste Gas Containing Methyl <i>tert</i> -Butyl Ether via a Biotrickling Filter	CHU Qi-ying, YAO Lu-lu, LÜ Xiong-biao, <i>et al.</i> (633)
Composite CVOCs Removal in a Combined System of Nonthermal Plasma and a Biotrickling Filter	GUO Hai-qian, MIAO Jing-jing, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (640)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in Qiantang River's Hangzhou Section During a Water Odor Pollution Event	CHEN Feng, TANG Fang-liang, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (648)
Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems	XU Mei-jia, WANG Hai-liang, LI Chun-mei, <i>et al.</i> (655)
Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes	 TONG Rui-peng, ZHANG Lei (663)
Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing	TONG Rui-peng, ZHANG Lei, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (672)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of PM _{2.5} and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between PM _{2.5} and PM ₁₀ in Beijing	 YANG Wen-tao, YAO Shi-qi, DENG Min, <i>et al.</i> (684)
Quantification of Methane Ebullition Flux from Small Ponds Using the Inverted-Funnel Method	ZHANG Xiu-fang, XIAO Wei, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (691)
Contamination Levels and Exposure Risk via Drinking Water from Perfluoroalkyl Acids in Seven Major Drainage Basins of China	 WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, WANG Yan-ping, <i>et al.</i> (703)
Spatio-temporal Distribution and Source Apportionment of Nitrogen in Rivers of Tieling	YANG Li-biao, LEI Kun, QIAO Fei, <i>et al.</i> (711)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Rivers of Western Sichuan Plateau Based on EEM-PARAFAC Analysis	 LIU Yan-yang, QIN Ji-hong, LIU Chen, <i>et al.</i> (720)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China	XU Mei-juan, BAO Bo, CHEN Chun-yan, <i>et al.</i> (729)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake	WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, <i>et al.</i> (738)
Spatial Distribution, Sources and Bioavailability of Heavy Metals in the Surface Sediments of Longjiang River, Southern China	 LAN Xiao-long, NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, <i>et al.</i> (748)
Mechanism on Enhanced Nitrogen Removal in Municipal Secondary Effluent via Internal-Electrolysis Constructed Wetlands at Low Temperature in Winter	 ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, WANG Ju, <i>et al.</i> (758)
Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir	XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (765)
Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (774)
Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream	QU Xiao-dong, YU Yang, ZHANG Min, <i>et al.</i> (783)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (792)
Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (800)
Effect of Sulfur to Quartz Sand Ratios on the Removal of High-Concentration Perchlorate in Packed-Bed Reactors	TAO Hua-qiang, SHAO Dong-hai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (811)
Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) by Activated Carbon/Macromolecule Composite Hydrogel	KONG Yan, ZHUANG Yuan, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (819)
Adsorption Performance and Mechanism of HZO@SGH for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution	MA Fu-zhen, ZHOU Shao-qi, LIU Ze-jun, <i>et al.</i> (828)
Mechanism of MgO/GAC Catalyzed Ozonation of Organic Compounds	XU Shan-shan, LIN Cun-wang, DING Ya-lei, <i>et al.</i> (838)
Ozonation Characteristics of Low Coagulability Organic Matter from the Secondary Effluent of WWTPs	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (844)
Quantitative Analysis of Dominant Pollutants in Secondary Effluent via Dye Probe Technology	MENG Xiao-rong, WANG Cong-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (852)
Lab-scale ANAMMOX Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (859)
Effect of Aeration Rate on Shortcut Nitrification Recovery in Intermittent Aeration Mode	LIU Hong, NAN Yan-bin, LI Hui, <i>et al.</i> (865)
Effect of Aerobic/Phosphorus Granules on Start-up of Partial Nitrification Granular Sludge	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (872)
Microbial Communities and Sludge Specific Resistance in Two SBRs Treating Leachate	CAI Li-yun, HUANG Ze-bin, XU Zi-wei, <i>et al.</i> (880)
Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Urbanization Process of Topsoil	YAO Hong, ZHANG Shi-chao, LIU Ming-li, <i>et al.</i> (889)
Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin	LIU Chang, SONG Bo, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (899)
Characterization of Phosphorus in Urban Surface Soils in Kaifeng City and Its Risk of Loss	BAI Xiu-ling, MA Jian-hua, SUN Yan-Li, <i>et al.</i> (909)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area	YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (916)
Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai	MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling, <i>et al.</i> (927)
Effects of Tetracycline Antibiotics on Growth and Characteristics of Enrichment and Transformation in Two Vegetables	CHI Sun-lin, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (935)
Bioavailability of Silicon Fertilizer Coupled Water Management on Soil Bioavailability and Cumulative Control of Rice in Compound Contaminated Paddy Soils	 LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, <i>et al.</i> (944)
Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors	YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, <i>et al.</i> (953)