

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

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

餐饮行业细颗粒物(PM_{2.5})排放测算方法:以上海市为例 王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹(1971)

上海夏季PM_{2.5}中有机物的组分特征、空间分布和来源 高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹(1978)

北京南郊区PM_{2.5}中水溶性无机盐季节变化及来源分析 高韩钰, 魏静, 王跃思(1987)

基于样方法的天津市春季道路扬尘PM_{2.5}中水溶性离子特征及来源解析 赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋(1994)

广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析 田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光(2000)

基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径 韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬(2010)

区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用 樊守彬, 郭津津, 李雪峰(2015)

典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征 林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林(2023)

多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究 庞树江, 王晓燕, 马文静(2030)

氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源 金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里(2039)

白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价 高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰(2048)

太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏(2056)

长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点 朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平(2067)

桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征 卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂(2075)

青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性 马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜(2086)

城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性 梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋(2095)

溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析 张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉(2104)

三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析 赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊(2117)

澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析 望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩(2126)

蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征 苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿(2135)

两种水生植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响 杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢(2145)

于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量 文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承(2154)

岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征 杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨(2165)

农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析 李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广州(2174)

不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响 向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影(2184)

真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质 孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓(2195)

石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G 夏文君, 刘锋, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌(2202)

载镧或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制 李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新(2211)

DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验 梁雨, 何江涛, 张思(2219)

污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征 孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东(2230)

低温污水前置强化混凝 刘海龙, 任宇霞, 张忠民(2239)

印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性 谭玉琚, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文(2249)

生物膜CANON反应器性能的优化:从FBRR到MBBR 付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国(2256)

两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化 高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲(2265)

铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较 王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟(2274)

热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响 代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益(2283)

曝气时间对比亚硝化颗粒污泥形成的影响 李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰(2289)

中国城市污泥中汞含量的时空分布特征 王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔(2296)

夏季太湖草/藻型湖区N₂O生成与迁移特征及其影响因素 郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承(2306)

太湖藻型湖区CH₄、CO₂排放特征及其影响因素分析 贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥(2316)

内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO₂、N₂O特征 李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭(2330)

黄土高原成龄苹果园生态系统CO₂通量特征 杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森(2339)

生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响 祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群玲, 汤稼豪(2351)

不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响 李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯(2360)

ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇(2368)

不同排海方式城市尾水微生物扩散规律 郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月(2380)

旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例 吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘(2389)

不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析 朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇(2400)

生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响 阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺(2412)

铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征 房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰(2420)

湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构 康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾克宇(2431)

反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制 张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰(2438)

广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价 张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹(2446)

三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响 陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇(2456)

水稻不同生长时期不同组织中抗内生菌的筛选与鉴定 王伯勋, 王学东, 段桂兰(2464)

汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征 李雨琴, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇(2472)

华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价 徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法(2480)

基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM_{2.5}健康效应 宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟(2489)

中国PM_{2.5}污染空间分布的社会经济影响因素分析 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波(2498)

《环境科学》征订启事(2094) 《环境科学》征稿简则(2164) 信息(2183, 2411, 2445)

白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价

高秋生^{1,2,3}, 赵永辉⁴, 焦立新^{1,2*}, 田自强¹, 杨柳³, 杨苏文^{1,2}, 崔志丹^{1,2}, 郝子峰^{1,2}

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012; 3. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 4. 河南省环境监控中心, 郑州 450000)

摘要: 为研究白洋淀水体中挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)污染现状, 于2016年3月在白洋淀采集15个水体样品, 采用吹扫捕集-气相色谱-质谱法分析了54种VOCs的浓度, 对其分布特征和健康风险进行讨论, 并尝试利用综合污染指数法对白洋淀水体VOCs污染情况进行评估. 结果表明: ①白洋淀水体中共有14种VOCs被检测出来, 其中二氯甲烷、苯、甲苯、乙苯、二甲苯、1,3,5-三甲苯检出率为100%, 二甲苯浓度最高, 平均值为564.9 ng·L⁻¹; 三氯乙烯浓度最低, 平均值仅为3.3 ng·L⁻¹, 检出率为13.3%. ②白洋淀水体中VOCs总浓度在423.0~4207.8 ng·L⁻¹之间, 苯系物是主要污染物, 主要来源可能是上游污水处理厂的出水、工业废水以及城市内机动车尾气的排放. ③健康风险评价显示白洋淀水体中VOCs不会对人体产生致癌和非致癌风险; VOCs综合污染指数显示白洋淀水体中VOCs处于清洁水平.

关键词: 挥发性有机物; 白洋淀; 分布特征; 健康风险评价; 综合污染指数

中图分类号: X524; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2048-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201710232

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake

GAO Qiu-sheng^{1,2,3}, ZHAO Yong-hui⁴, JIAO Li-xin^{1,2*}, TIAN Zi-qiang¹, YANG Liu³, YANG Su-wen^{1,2}, CUI Zhi-dan^{1,2}, HAO Zi-feng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 4. Henan Province Environmental Monitoring Center, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to survey the present pollution from volatile organic compounds in Baiyangdian Lake, 15 water samples were collected in March 2016, and analyzed for 54 VOCs by purge and trap gas chromatography-mass spectrometry. The distribution characteristics and health risk assessments were investigated, and the pollution from the VOCs was evaluated by a comprehensive pollution index. The survey showed that: ① a total of 14 VOCs were detected in Baiyangdian water, with a 100% detection rate for dichloromethane, benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, and 1,3,5-trimethylbenzene; xylene had the highest concentration with an average concentration of 564.9 ng·L⁻¹; and trichloroethylene had the lowest concentration with an average concentration of 3.3 ng·L⁻¹ and a detection rate of only 13.3%; ② the total concentration of VOCs in Baiyangdian water was between 423.0 and 4207.8 ng·L⁻¹, and benzene was the main pollutant, with its main source coming from the effluent from the upstream sewage treatment plant, the industrial wastewater, and the exhaust emissions of motor vehicles in the city; and ③ the health risk assessment showed that VOCs in Baiyangdian Lake did not produce carcinogenic and non-carcinogenic risks to humans, and the VOC comprehensive pollution index shows that the VOCs in the Baiyangdian Lake were at a clean level.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); Baiyangdian Lake; distribution characteristics; health risk assessment; comprehensive pollution index

挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)是一类化合物的总称, 世界卫生组织(WHO)将其定义为熔点低于室温、沸点范围在50~260℃之间的有机化学物质^[1]. VOCs种类繁多, 包括脂肪族和芳香族的各种烷烃、烯烃、含氧烃和卤代烃等^[2], 主要具有两种来源, 即自生源(如来自火山爆发、细菌和海洋生物的代谢)和人为源, 是重要的化工原料、中间体和有机溶剂, 被广泛用于

化工、医疗、农药等行业^[3]. 有研究表明大部分VOCs, 尤其是卤代VOCs即使在很低的浓度下也会产生致癌、致畸和致突变等毒性效应, 还可能导致肝脏和肾脏受损, 以及免疫系统、神经系统、生殖

收稿日期: 2017-10-30; 修订日期: 2017-11-16

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2015FY110900)

作者简介: 高秋生(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境化学, E-mail: wintersgao@163.com

* 通信作者, E-mail: 287559418@qq.com

系统等一系列潜在的慢性疾病^[4, 5]。目前国内关于大气环境中 VOCs 的研究较多^[6-8], 水环境的中 VOCs 研究也大都集中于检测方法的优化、地下水环境中、自来水厂出水以及饮用水等方面^[9-13], 关于国内地表水环境中 VOCs 的研究鲜有报道。地表水、地下水和饮用水中的 VOCs 一般来自于化工企业排放的废水^[14], 而地表水是工业废水的直接受体, 每年含有大量 VOCs 的工业废水以及城市污水处理厂出水直接排入地表水环境中, 对地表水环境造成巨大危害, 因此开展地表水环境中的 VOCs 的检测和风险评价工作对水体污染控制和人体健康至关重要。

白洋淀位于河北省中部, 东经 $115^{\circ}39' \sim 116^{\circ}11'$, 北纬 $38^{\circ}40' \sim 38^{\circ}58'$ 之间, 是河北省第一大内陆湖。20 世纪 70 年代以后, 随着白洋淀流域内工农业的发展、人口增长以及旅游业的开发, 城镇工业废水、生活污水猛增, 使白洋淀水域遭到严重污染。20 世纪 90 年代以来对于白洋淀的有机污染已经有了广泛的研究, 但是还未有关于白洋淀 VOCs 的研究。2017 年 4 月 1 日中共中央、国务院印发通知, 决定设立河北雄安新区用于缓解北京的大城市病、发挥首都城市的区域经济增长极效应、新发展理念的现实试验和探索^[15], 而白洋淀作为雄安新区核心水系, 其当前环境质量关系着新区的建设更关系着国家京津冀协同发展战略的稳步推进。本研究通过对白洋淀水体中 VOCs 的检测和风险评价, 以期为新区水环境中 VOCs 污染控制和当地居民健康的保护提供科学依据和技

术支持。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2016 年 3 月参照 GPS 定位, 根据白洋淀 9 条入淀河流入淀口位置在白洋淀设置 15 个采样点位 (图 1), 依次是鸳鸯岛、寨南、洛网淀、端村、东田庄、采蒲台、圈头、枣林庄、杨庄子、光淀张庄、王家寨、郭里口、烧车淀、南刘庄和安新大桥。采样点详细地理信息如表 1。使用 40 mL 带有聚四氟乙烯瓶盖的棕色 VOCs 采样瓶, 充样至溢流, 滴两滴

表 1 白洋淀表层沉积物采样点地理信息

Table 1 Geographical information for 15 sampling sites

in Baiyangdian Lake			
样品编号	采样点	经度	纬度
S1	鸳鸯岛	115°57'24.43"	38°54'37.74"
S2	寨南	115°59'26.11"	38°54'02.83"
S3	洛网淀	115°59'54.53"	38°53'02.66"
S4	端村	115°57'07.76"	38°50'55.28"
S5	东田庄	115°58'48.04"	38°50'22.92"
S6	采蒲台	116°00'46.69"	38°49'41.61"
S7	圈头	116°01'21.44"	38°57'08.80"
S8	枣林庄	116°05'1.6"	38°54'00.32"
S9	杨庄子	116°02'45.81"	38°54'31.19"
S10	光淀张庄	116°01'46.95"	38°54'00.64"
S11	王家寨	116°00'42.24"	38°55'05.18"
S12	郭里口	116°00'18.10"	38°55'42.47"
S13	烧车淀	115°59'54.15"	38°56'40.21"
S14	南刘庄	115°56'41.23"	38°54'11.46"
S15	安新大桥	115°55'25.73"	38°54'16.73"

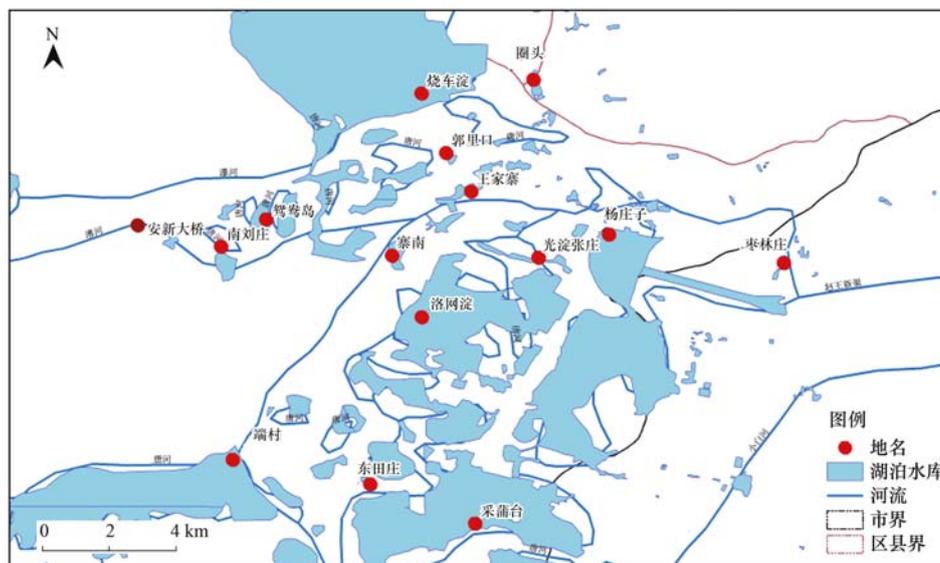


图 1 白洋淀采样点示意

Fig. 1 Map of sampling sites in Baiyangdian Lake

盐酸, 保正瓶内没有气泡. 用冰块降温、冷藏运至实验室后保存于4℃冰箱中, 待上机检测.

1.2 试剂

VOCs 混合标样(美国 AccuStandard 公司)包括: 1,1-二氯乙烯、二氯甲烷、反式 1,2-二氯乙烯、1,1-二氯乙烷、顺式-1,2-二氯乙烯、2,2-二氯丙烷、溴氯甲烷、氯仿、1,1,1-三氯乙烷、1,1-二氯丙烷、四氯化碳、苯、1,2-二氯乙烷、三氯乙烯、1,2-二氯丙烷、二溴甲烷、溴二氯甲烷、顺式 1,3-二氯丙烷、甲苯、反式 1,3-二氯丙烷、1,1,2-三氯乙烷、四氯乙烯、1,3-二氯丙烷、一氯二溴甲烷、1,2-二溴乙烷、氯苯、1,1,1,2-四氯乙烯、乙苯、间二甲苯、对二甲苯、邻二甲苯、苯乙烯、溴仿、异丙苯、溴苯、1,1,2,2-四氯乙烷、1,1,3-三氯丙烷、正丙烷、2-氯甲苯、4-氯甲苯、1,3,5-三甲基苯、叔丁基苯、1,2,4-三甲基苯、仲丁基苯、1,3-二氯苯、1,4-二氯苯、1,2-二氯苯、4-异丙基甲苯、正丁基苯、1,2-二溴-3-氯丙烷、1,2,4-三氯苯、六氯丁二烯、萘、1,2,3-三氯苯共 54 种 VOCs. 分析时采用农残级甲醇逐级稀释配置标准系列溶液. 氟苯和 1,2-二氟苯-D4(美国 AccuStandard 公司)作为内标.

1.3 仪器与控制条件

仪器: PT9800&Aquatek100 吹扫捕集装置(美国 Tekmar)公司, 25.0 mL 吹扫管. Agilent GC7890/MS5975 气相色谱-质谱联用仪, DB-624 石英毛细管柱(30 m×0.25 mm, 1.4 μm).

吹扫捕集仪器控制条件: 吹扫温度为室温, 吹扫流速为 40 mL·min⁻¹, 吹扫时间为 11 min, 吹干时间为 1 min, 预脱附温度为 190℃, 脱附时间为 2 min, 烘烤温度为 200℃, 烘烤时间为 6 min.

气相色谱仪控制条件: 起始柱温 35℃, 保持 5 min, 以 6℃·min⁻¹升至 160℃, 保持 6 min, 再以 20℃·min⁻¹升至 210℃, 保持 2 min; 载气为氦气(纯度 > 99.99%), 流量为 1.0 mL·min⁻¹; 恒流方式.

质谱仪操作条件: EI 离子源, 离子源温度为 200℃, 接口温度为 220℃, 离子化能量为 70 eV, 扫描范围 35 ~ 300 u.

1.4 样品测定

人工进样器吸取 20 mL 水样, 同时加入质量浓度为 20 μg·L⁻¹的内标 50 μL, 一同注入吹扫管进行检测分析. 该方法对水体中 54 种 VOCs 线性范围为 0.05 ~ 100.0 μg·L⁻¹, 回收率为 73% ~ 113%, 精密度(RSD)为 2.7% ~ 13.3%, 检出限为 0.01 ~ 0.25 μg·L⁻¹.

2 结果与讨论

2.1 VOCs 总体检出情况

对白洋淀 15 个点位 54 种 VOCs 进行检测发现(表 2), 共有 14 种 VOCs 被检测出来(为方便统计将邻二甲苯、间二甲苯和对二甲苯归结为二甲苯), 其中二氯甲烷、苯、甲苯、乙苯、二甲苯、1,3,5-三甲基苯检出率为 100%, 即在 15 个点位中均被检测出来; 1,2-二氯乙烷次之检出率为 93.3%, 除鸳鸯岛点位外, 其他点位均有检出. 一溴二氯甲烷和三氯乙烯检出率最低仅为 13.3%, 即只有 2 个点位处被检出, 并且均为南刘庄和安新大桥处. 二甲苯浓度最高, 平均值为 564.9 ng·L⁻¹, 其次为乙苯, 平均值为 133.1 ng·L⁻¹. 三氯乙烯最低, 平均值仅为 3.3 ng·L⁻¹. 参考生活饮用水卫生标准和地表水环

表 2 白洋淀水体 VOCs 检出情况

Table 2 VOCs concentrations in the surface water of Baiyangdian Lake

VOCs	检出率/%	$\rho/\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$			标准值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$
		最小值	最大值	平均值	
氯仿	73.3	ND	220.7	44.4	60 000.0
二氯甲烷	100	15.9	50.3	31.6	20 000.0
一溴二氯甲烷	13.3	ND	48.6	5.8	60 000.0
1,2-二氯乙烷	93.3	ND	42.9	24	30 000.0
正丙烷	86.7	ND	61.9	26.4	30 000.0
1,2-二氯丙烷	86.7	ND	57.4	19.6	—
顺式 1,2-二氯乙烯	66.7	ND	20.8	9.8	50 000.0
三氯乙烯	13.3	ND	31.8	3.3	70 000.0
苯	100	17.9	99.8	48.7	10 000.0
甲苯	100	16.9	240.5	126.0	700 000.0
乙苯	100	20.6	646.6	133.1	300 000.0
二甲苯	100	73.7	3 080	564.9	500 000.0
异丙苯	46.7	ND	40.7	9.5	250 000.0
1,3,5-三甲基苯	100	13.8	245.8	105.2	—

境标准^[16, 17], 检测出的 14 种 VOCs 平均浓度均远低于上述标准. 本样品采集于枯水期, VOCs 具有易降解易挥发的特性, 所以检测出的浓度基本不超标. 但甲苯、乙苯等致癌物质(在一定条件下能诱发人类和动物癌症的物质)浓度也达到了数百 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 需要引起重视.

2.2 VOCs 空间分布特征

白洋淀水体中所检测出的 14 种 VOCs 浓度分布如图 2, 14 种 VOCs 总浓度 ($\sum \text{VOCs}$) 在 $423.0 \sim 4207.8 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 其中安新大桥处浓度最高, 其次为王家寨 ($2155.3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$), 郭里口和烧车淀浓度较低, 分别为 $423.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $459.3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 安新大桥处位于白洋淀上游府河的入淀口, 生活污水和工业废水经过府河流入湖区, 此外, 河道两侧是人口相对集中的安新县城, 县城内和每天往返于安新大桥上的汽车产生的尾气也会加剧 VOCs 的污染. 这些都可能是导致安新大桥处 $\sum \text{VOCs}$ 浓度最高的原因. 郭里口和烧车淀位于湖区中心位置, 周围都是农耕区远离居民区和道路 VOCs 可能的污

染来源较少, 所以可能导致这两个湖区浓度较低. 将苯、甲苯、乙苯、二甲苯、异丙苯、1,3,5-三甲基苯等归为苯系物, 发现除南刘庄和郭里口这 2 个点位外, 其他 13 个点位处苯系物总浓度占 $\sum \text{VOCs}$ 浓度的比例均高于 59.5% (洛网淀), 安新大桥、王家寨和东田庄甚至高达 85.8%、82.3% 和 82.9%, 15 个点位中苯系物所占的平均质量分数为 70.6%, 唐小东等^[18]的研究表明苯系物是污水处理厂各处理单元排放 VOCs 的重要组成部分, 徐东群等^[19]的研究表明苯系物也是使用无铅汽油的汽车尾气的主要污染物, 我国在 2000 年 7 月 1 日起全面停售含铅汽油, 工业生产会产生大量的苯系物, 所以白洋淀水体中 VOCs 主要来源可能是上游污水处理厂的出水、工业废水以及城市内机动车尾气的排放.

2.3 健康风险评价

健康风险评价 (health risk assessment) 是用来定量描述污染对人体健康产生危害的评价体系, 美国国家科学院于 1983 年提出了健康风险评价四步法^[20], 即危害鉴定、暴露评估、剂量-效应评估和

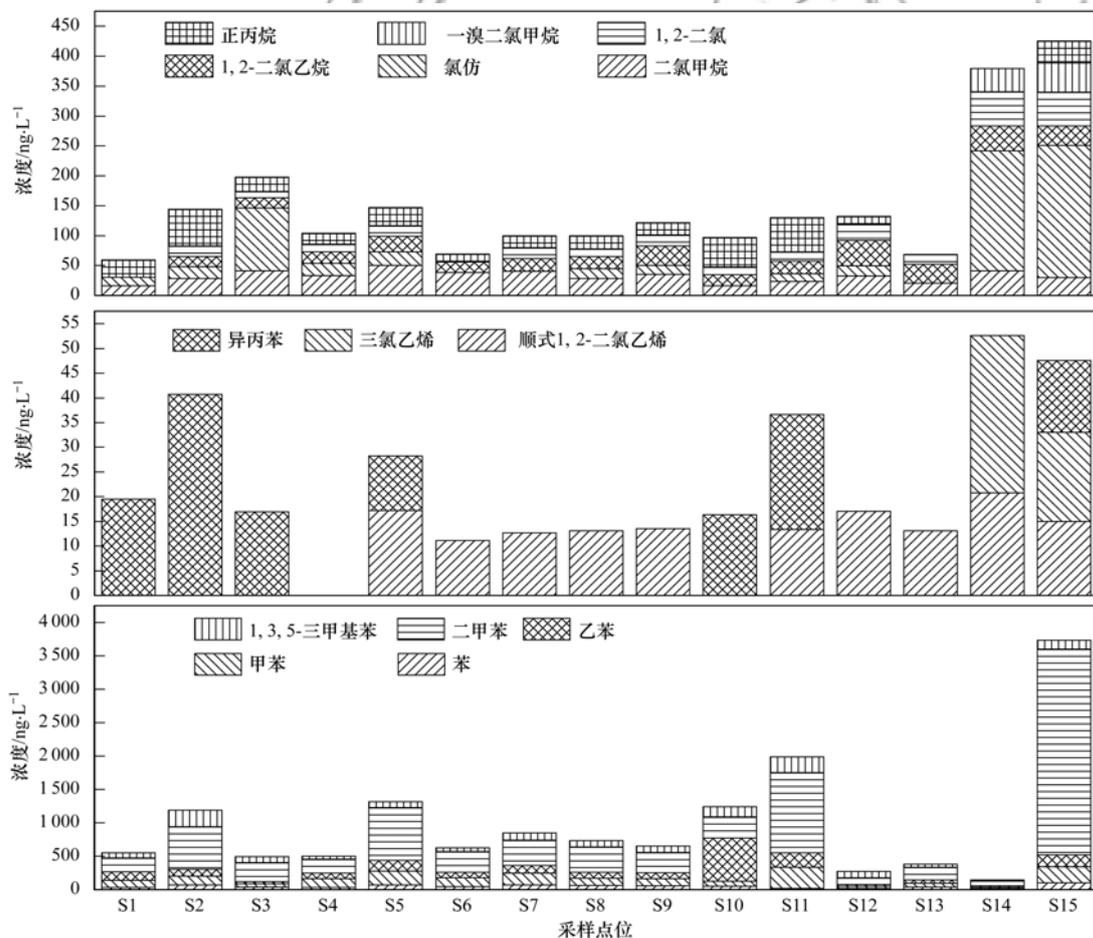


图 2 白洋淀 VOCs 浓度分布

Fig. 2 Concentration and distribution of VOCs in Baiyangdian Lake

风险表征. 目前该方法已成为国际公认的健康风险评估方法. 皮肤接触、直接饮用和摄入水体中的食物等是人体接触水体污染物的几大途径, 其中直接饮用被认为是敏感人群健康造成威胁的最直接和最主要的途径^[21]. 本研究对直接饮用和皮肤接触造成的健康风险进行了评价. 非致癌风险通常用风险指数(HI)表示, 计算公式如下:

$$HI = \frac{CDI}{RfD}$$

式中, CDI 为长期摄入剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; RfD 为污染物的非致癌参考剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$.

致癌风险通常用风险值(Risk)表示, 表示暴露于致癌物中而导致的人一生中超过正常水平的致癌发病率, 计算公式如下:

$$\text{Risk} = \text{CDI} \times \text{SF}$$

式中, SF 为污染物的致癌斜率因子, $(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$.

饮水途径 CDI 计算公式如下:

$$CDI = \frac{\rho \times \text{TF} \times U \times \text{EF} \times \text{EU}}{\text{BW} \times \text{AT}}$$

皮肤接触途径 CDI 计算公式如下:

$$CDI = I \times A_{\text{sd}} \times \text{EF} \times \frac{\text{FE} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT} \times f}$$

$$I = 2 \times 10^{-3} \times k \times \rho \times \text{TF} \times \sqrt{\frac{6 \times \tau \times \text{TE}}{\pi}}$$

式中, I 为每次洗澡单位体面积对污染物的吸附量, $\text{mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{次})^{-1}$; ρ 为所测污染物的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; TF 为水煮沸后污染物的残留比, 根据昌盛等^[22]的研究均取 0.3 (量纲为 1); U 为日饮水量, 取 $2 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$; EF 为暴露频率, 取 $365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; ED 为暴露持续时间, 取 25 550 d; AT 为平均暴露时间, 取 25 550 d; A_{sd} 为人体表面积, 取 $16\,600 \text{ cm}^2$; FE 为洗澡频率, 取 $0.3 \text{ 次} \cdot \text{d}^{-1}$; f 为肠道吸附比率, 取 1 (量纲为 1); 皮肤渗透参数 k , 取 $0.001 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$; τ 为污染延滞时间, 取 1 h; BW 为平均体重, 取 67.7 kg; TE 为洗澡时间取 0.4 h. SF 和 RfD 等参数参照 US EPA 数据^[23], 具体见表 3.

根据 US EPA 的资料在选定致癌物和非致癌物时, 一些被认为是可能致癌的 VOCs 均按致癌物进

表 3 VOCs 健康风险评估参数¹⁾/ $\text{kg} \cdot (\text{d} \cdot \text{mg})^{-1}$

VOCs	SF	RfD
二氯甲烷	—	—
顺式 1, 2-二氯乙烯	—	0.05
氯仿	0.07	0.004
苯	0.055	0.000 5
1, 2-二氯乙烷	0.003 3	0.078
三氯乙烯	0.05	0.000 5
1,2-二氯丙烷	0.003 3	0.078
一溴二氯甲烷	—	—
甲苯	—	0.009 7
乙苯	—	0.022
二甲苯	—	—
异丙苯	—	—
正丙烷	—	—
1,3,5-三甲基苯	—	—

1) “—”表示未查到相关参数

行健康风险评估. 白洋淀水体 VOCs 健康风险评估结果见表 4 和表 5, 根据 US EPA 定义, 当非致癌风险值超过 1, 被认为会对人体健康造成危害. 白洋淀 15 个采样点的 VOCs 通过饮用和洗浴造成的非致癌指数均小于 1, 表明水体中 VOCs 不会对人体造成非致癌威胁. 白洋淀水体中除部分点位的污染物苯通过饮用造成的致癌风险值处于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 可接受水平外, 其他致癌污染物通过饮用和洗浴造成的致癌风险值均低于 US EPA 致癌风险建议值 (10^{-6})^[24]. 本研究中同一种 VOCs 通过饮用途径和通过洗浴途径造成的非致癌风险和致癌风险值差别均不大, 表明 VOCs 通过皮肤接触和煮沸后饮用会造成健康风险的几率相同. 这和万译文等^[25]的研究结果不一样, 可能是本研究所采用的参数是 US EPA 2015 年最新更新的数据, 相比之前的参数更加符合目前水环境情况. 但本研究中由于参数难以获得依旧未考虑到在洗浴时, 人体吸入带有 VOCs 的水蒸气所造成的健康风险. 所以洗浴途径造成的健康风险评估不算全面. 总体来看白洋淀水体中 VOCs 不会对人体产生非致癌或致癌威胁, 但本研究中苯的致癌风险会高出其他 VOCs 致癌风险值 1 ~ 2 个数量级, 应当引起关注.

表 4 非致癌风险指数

Table 4 Non-carcinogenic risk index of the VOCs

VOCs	非致癌风险指数 (HI)		最高值点位
	饮用	洗浴	
顺式 1, 2-二氯乙烯	$0 \sim 0.8 \times 10^{-6}$	$0 \sim 9.0 \times 10^{-6}$	南刘庄
甲苯	$1.5 \times 10^{-5} \sim 2.1 \times 10^{-4}$	$3.8 \times 10^{-5} \sim 5.5 \times 10^{-4}$	安新大桥
乙苯	$8.3 \times 10^{-6} \sim 2.6 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-5} \sim 6.5 \times 10^{-4}$	光淀张庄

表 5 致癌风险值

Table 5 Carcinogenic risk index of the VOCs

VOCs	致癌风险值(Risk)		最高值点位
	饮用	洗浴	
二氯甲烷	—	—	—
氯仿	$0 \sim 2.0 \times 10^{-7}$	$0 \sim 3.4 \times 10^{-7}$	东田庄
苯	$6.9 \times 10^{-7} \sim 3.8 \times 10^{-6}$	$2.2 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7}$	安新大桥
1,2-二氯乙烷	$0 \sim 1.0 \times 10^{-9}$	$0 \sim 3.0 \times 10^{-9}$	郭里口
三氯乙烯	$0 \sim 1.0 \times 10^{-8}$	$0 \sim 3.5 \times 10^{-8}$	南刘庄
1,2-二氯丙烷	$0 \sim 1.9 \times 10^{-9}$	$0 \sim 4.2 \times 10^{-9}$	南刘庄
一溴二氯甲烷	—	—	安新大桥

2.4 VOCs 综合污染指数

综合污染指数法是用各种污染物的相对污染指数进行数学上的归纳统计,根据所选择的评价标准得出一个较简单的代表水体污染程度的数值^[26].常被用来评价水体重金属污染情况^[27,28]和 N、P、DO、BOD₅ 等常规指标的评价^[29,30],通常采用地表水环境质量标准 I 类标准作为评价标准,最新修订的地表水环境质量标准 GB 3838-2002 对部分 VOCs 规定了准限值,所以本研究尝试采用此方法对白洋淀 VOCs 污染情况进行综合判定.其表达式为:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中, P 为 VOCs 综合污染指数; P_i 为某污染物的分指数; C_i 为评价因子的实测浓度; S_i 为评价因子的评价标准值, n 为平均指标的项目数. 选取地表水环境质量标准和生活饮用水卫生标准作为本研究

的评价标准,1,2-二氯丙烷和 1,3,5-三甲基苯未查到相关标准,在计算时不予考虑. 根据 P 值的大小确定水体污染程度,如表 6,经过计算白洋淀各点位 VOCs 综合污染指数 P 如图 3, VOCs 综合污染指数介于 0.006 ~ 0.026 之间,均小于 0.2,表明白洋淀水体中 VOCs 未造成污染,处于清洁水平.

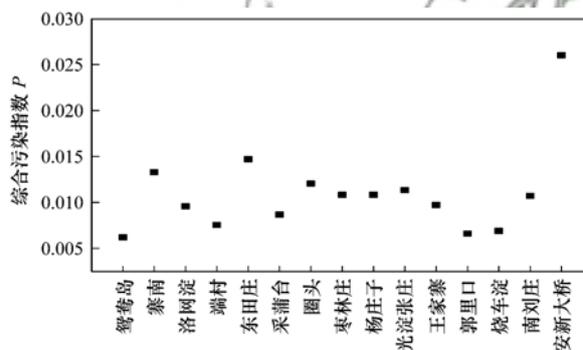


图 3 白洋淀 VOCs 综合污染指数

Fig. 3 Comprehensive pollution index of VOCs in Baiyangdian Lake

表 6 综合污染指数对应水质分级

Table 6 Grades of water quality according to comprehensive pollution index

项目	$P < 0.2$	$0.2 \leq P < 0.4$	$0.4 \leq P < 0.7$	$0.7 \leq P < 1.0$	$1.0 \leq P < 2.0$	$P \geq 2.1$
污染程度	清洁	尚清洁	轻污染	中污染	重污染	严重污染

3 结论

(1) 白洋淀水体中共有 14 种 VOCs 被检测出来,二甲苯浓度最高,平均值为 $564.9 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 检出率为 100%; 三氯乙烯浓度最低,平均值仅为 $3.3 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,检出率为 13.3%.

(2) 白洋淀水体中 VOCs 总浓度在 $423.0 \sim 4207.8 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,苯系物是主要污染物,主要来源可能是上游污水处理厂的出水、工业废水以及城市内机动车尾气的排放.

(3) 健康风险评价显示白洋淀水体中 VOCs 不会对人体产生致癌和非致癌风险; VOCs 综合污染

指数显示白洋淀水体中 VOCs 处于清洁水平.

参考文献:

- [1] 何华飞,王浙明,许明珠,等. 制药行业 VOCs 排放特征及控制对策研究——以浙江为例[J]. 中国环境科学, 2012, 32(12): 2271-2277.
He H F, Wang Z M, Xu M Z, et al. Studies on the emission characteristics and countermeasures of VOCs from pharmaceutical industry-Based on Zhejiang Province[J]. China Environmental Science, 2012, 32(12): 2271-2277.
- [2] Hunter P, Oyama S T. Control of volatile organic compound emissions; conventional and emerging technologies[M]. New York: John Wiley & Sons, 2000; 109-110.
- [3] 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.
- [4] Flanagan R J, Ruprah M, Meredith T J, *et al.* An introduction to the clinical toxicology of volatile substances[J]. *Drug Safety*, 1990, **5**(5): 359-383.
- [5] Clayton C A, Pellizzari E D, Whitmore R W, *et al.* National human exposure assessment survey (NHEXAS): distributions and associations of lead, arsenic, and volatile organic compounds in EPA region 5 [J]. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 1999, **9**(5): 381-392.
- [6] 张玉欣, 安俊琳, 林旭, 等. 南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 1-12.
Zhang Y X, An J L, Lin X, *et al.* Source apportionment of volatile organic compounds and health assessment of benzene series in northern suburb of Nanjing in winter[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 1-12.
- [7] 傅晓钦, 翁燕波, 钱飞中, 等. 行驶机动车尾气排放 VOCs 成分谱及苯系物排放特征[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(6): 1056-1062.
Fu X Q, Weng Y B, Qian F Z, *et al.* Study of the VOC source profile and benzene compounds emission of various motor vehicles [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(6): 1056-1062.
- [8] 夏芬美, 李红, 李金娟, 等. 北京市东北城区夏季环境空气中苯系物的污染特征与健康风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2014, **9**(6): 1041-1052.
Xia F M, Li H, Li J J, *et al.* Characteristics and health risk assessment of atmospheric benzene homologues in summer in the northeastern urban area of Beijing, China[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2014, **9**(6): 1041-1052.
- [9] 曾勤, 钱亚红, 沈茹佳, 等. 吹扫捕集-GC/MS 联用测定地下水中 VOCs[J]. *泉州师范学院学报*, 2012, **30**(4): 22-27.
Zeng Q, Qian Y H, Shen R J, *et al.* Determination of volatile organic compounds in groundwater by purge and trap-GC/MS [J]. *Journal of Quanzhou Normal University*, 2012, **30**(4): 22-27.
- [10] 许美佳, 王海亮, 李春梅, 等. 城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征[J/OL]. *环境科学* 2018, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1895.X.20170921.1007.014.html>, 2017-09-21.
Xu M J, Wang H L, Li C M, *et al.* Occurrence and spatial distribution of volatile organic compounds in urban drinking water distribution system [J/OL]. *Environmental Science*, 2018 <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1895.X.20170921.1007.014.html>, 2017-09-21.
- [11] 王丽. 典型乡镇饮用水源有毒污染物分布特征与健康风险评估[D]. 广州: 南方医科大学, 2012.
Wang L, Distribution characteristics and health risk assessment of multi-contaminations in drinking water sources of typical towns [D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2012.
- [12] 吕晓立, 邵景力, 刘景涛, 等. 某石油化工污染场地地下水中挥发性有机物污染特征及成因分析[J]. *水文地质工程地质*, 2012, **39**(6): 97-102.
Lv X L, Shao J L, Liu J T, *et al.* Contamination characteristics and causes of volatile organic compounds in the groundwater at a petrochemical contaminated site [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, **39**(6): 97-102.
- [13] 俞文清, 陈泉源. 水中 84 种 VOCs 的检测方法及其应用[J]. *净水技术*, 2014, (6): 80-88.
Yu W Q, Chen Q Y, Analytical methodology and application of 84 kinds of volatile organic compounds (VOCs) in water [J]. *Water Purification Technology*, 2014, (6): 80-88.
- [14] 许秀艳, 朱擎, 谭丽, 等. 水中挥发性有机物的分析方法综述[J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3606-3612.
Xu X Y, Zhu Q, Tan L, *et al.* An overview on analytical method of volatile organic compounds in water [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3606-3612.
- [15] 蔡之兵. 雄安新区的战略意图、历史意义与成败关键[J]. *中国发展观察*, 2017, (8): 9-13.
- [16] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
GB 3838-2002, Environmental quality standard for surface water [S].
- [17] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
GB 5749-2006, Standards for drinking water quality[S].
- [18] 唐小东, 王伯光, 赵德骏, 等. 城市污水处理厂的挥发性恶臭有机物组成及来源[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(4): 576-583.
Tang X D, Wang B G, Zhao D J, *et al.* Sources and components of MVOC from a municipal sewage treatment plant in Guangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(4): 576-583.
- [19] 徐东群, 刘晨明, 李铮, 等. 机动车尾气造成的苯系物污染状况调查[J]. *环境与健康杂志*, 2004, **21**(5): 305-307.
Xu D Q, Liu C M, Li Z, *et al.* Study on benzene, toluene, xylene pollution resulted from vehicle emission by Tenax TA adsorption-thermal desorption-capillary gas chromatography [J]. *Journal of Environment and Health*, 2004, **21**(5): 305-307.
- [20] NRC. Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process [M]. Washington, DC: National Academies Press, 1983.
- [21] Smith A H, Hopenhayn-Rich C, Bates M N, *et al.* Cancer risks from arsenic in drinking water [J]. *Environmental Health Perspectives*, 1992, **97**: 259-267.
- [22] 昌盛, 赵兴茹, 刘琰, 等. 滹沱河冲洪积扇地下水中挥发性有机物的分布特征与健康风险[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(6): 854-862.
Chang S, Zhao X R, Liu Y, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds in groundwater of Hutuo River Pluvial Fan [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(6): 854-862.
- [23] United States Environmental Protection Agency. Chemical-specific inputs for the 2015 final updated human health ambient water quality criteria: 2015 update [EB/OL]. Washington DC: US EPA, <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/human-health-2015-update-factsheet.pdf>, 2015-06-29.
- [24] United States Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund: volume I human health evaluation manual: Part A [R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- [25] 万译文, 康天放, 周忠亮, 等. 北京官厅水库水体中挥发性有机物健康风险评估[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(2): 150-154.
Wan Y W, Kang T F, Zhou Z L, *et al.* Health risk assessment of volatile organic compounds in water of Beijing Guanting Reservoir

- [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(2): 150-154.
- [26] 赵前信. 四种水环境质量评价方法在六安市水库中的应用[J]. *环境工程*, 2014, **32**(3): 113-116, 120.
Zhao, Q X. Application of four kinds of water quality evaluation method in reservoirs in Lu'an city [J]. *Environmental Engineering*, 2014, **32**(3): 113-116, 120.
- [27] 马迎群, 时瑶, 秦延文, 等. 浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 108-116.
Ma Y Q, Shi Y, Qin Y W, *et al.* Temporal-spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in the upper reaches of Hunhe River (Qingyuan section), northeast China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 108-116.
- [28] 陈奎, 周勇华, 张怀静. 东昌湖水体和表层沉积物重金属元素污染评价[J]. *中国海洋大学学报*, 2012, **42**(10): 97-105.
Chen K, Zhou Y H, Zhang H J. Pollution evaluation of heavy metal element of water and surface sediment in the Dongchang lake[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, **42**(10): 97-105.
- [29] 张婷, 刘静玲, 王雪梅. 白洋淀水质时空变化及影响因子评价与分析[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(2): 261-267.
Zhang T, Liu J L, Wang X M. Causal analysis of the spatial-temporal variation of water quality in Baiyangdian Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(2): 261-267.
- [30] 朱媛媛, 田进军, 李红亮, 等. 丹江口水库水质评价及水污染特征[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(1): 139-147.
Zhu Y Y, Tian J J, Li H L, *et al.* Water quality assessment and pollution profile identification of Danjiangkou Reservoir, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(1): 139-147.



CONTENTS

Estimation of Fine Particle (PM _{2.5}) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in PM _{2.5} in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in PM _{2.5} in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a MnFe ₂ O ₄ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N ₂ O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO ₂ and N ₂ O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO ₂ Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism Between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of PM _{2.5} Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)