

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价

程云轩^{1,2}, 高秋生^{1,2}, 李捷^{1,2}, 李慧^{1,2}, 吴鹏^{1,2}, 焦立新^{1,2*}

(1. 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; 2. 中国环境科学研究院国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012)

摘要: 通过调查南四湖可挥发性有机物的污染特征并对生态风险和健康风险进行评价, 2017 年 11 月在南四湖 25 个取样点采得水样, 利用吹扫捕集和 GC-MS 对 52 种 VOCs 进行检测。乙苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯、1,2-二氯苯和萘检出率达到 100%; 顺式 1,3-二氯丙烯和甲苯的检出率为 96%; 1,2,4-三甲基苯的检出率最低, 仅为 12%; 1,2-二氯苯平均浓度最高, 达到 $3.49 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 1,2,4-三甲基苯平均浓度最低仅为 $0.02 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。南四湖水体中 1,2-二氯苯浓度总体上高于其他 VOCs, 间/对-二甲苯和乙苯在 NSH-24 号点位浓度远超过该点位其他的 VOCs, 但所有 VOCs 中值均未超过 $4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。南四湖水体 VOCs 浓度的空间分布呈现西北和东南两端高, 中部低的特点。造成南四湖 VOCs 污染的主要原因可能是航运船只航行过程中排放的尾气, 次要原因为上下游支流中 VOCs 的汇集和人为因素影响。对南四湖的健康风险评价发现, 总体上看南四湖并无致癌或非致癌的健康风险, 但个别点位的风险值偏高, 甚至超过 US EPA 规定的风险阈值。南四湖有 12 个点位的生态风险商值超过了 1, 即存在对水生生物的生态风险。

关键词: 可挥发性有机物(VOCs); 南四湖; 气相色谱质谱联用仪(GC-MS); 空间分布; 风险评价

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2021)04-1820-10 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202009030

Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin

CHENG Yun-xuan^{1,2}, GAO Qiu-sheng^{1,2}, LI Jie^{1,2}, LI Hui^{1,2}, WU Peng^{1,2}, JIAO Li-xin^{1,2*}

(1. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: This study aimed to investigate the pollution characteristics of the volatile organic compounds in Nansi Lake and evaluate the ecological and health risks. In November 2017, water samples collected from 25 sampling points in Nansi Lake using the purge and trap technique and GC-MS detected 52 types of VOCs. The detection rate of ethylbenzene, *m*-/*p*-xylene, *o*-xylene, 1,2-dichlorobenzene, and naphthalene reached 100%, and *cis*-1,3-dichloropropene and toluene reached 96%. The detection rate of 1,2,4-trimethyl benzene was the lowest, at only 12%, the average concentration of 1,2-dichlorobenzene was the highest, reaching $3.49 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, and 1,2,4-trimethyl benzene was only $0.02 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. The concentration of 1,2-dichlorobenzene in Nansi Lake was generally higher than that of other VOCs. Meanwhile, the concentrations of *m*-/*p*-xylene and ethylbenzene at point NSH-24 far exceeded the other VOCs, but the median value of all VOCs did not exceed $4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. The spatial distribution of the VOCs concentrations in Nansi Lake presented high values in the northwest and southeast, and low in the middle. The leading cause of VOCs pollution in Nansi Lake may be the exhaust gas emitted by shipping vessels during navigation, and the secondary cause is the collection of VOCs in the upstream and downstream tributaries and the influence of human factors. The health risk assessment of Nansi Lake found that, overall, there was no carcinogenic or non-carcinogenic health risk, but the risk value of individual points was relatively high, even exceeding the risk threshold set by the US EPA. There were 12 points in Nansi Lake where the ecological risk quotient exceeded 1, indicating an ecological risk to aquatic organisms.

Key words: volatile organic compounds(VOCs); Nansi Lake; gas chromatography-mass spectrometry(GC-MS); spatial distribution; risk assessment

世界卫生组织(WHO)定义熔点低于室温,沸点在 50~260℃之间并能挥发的有机物为可挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)。VOCs 是重要的化工原料、中间体和有机溶剂,它们广泛应用于化工、医药、农药和制革等行业^[1]。但随着人类工业农业等的发展,VOCs 带给环境的影响日益明显,目前对于 VOCs 的研究多停留在大气环境中^[2],但有研究表明大气中的 VOCs 在一定程度上能实现气相-水相的交换^[3],大气中 VOCs 浓度可能影响附近

水体的 VOCs 浓度,这一发现使得水体中 VOCs 的来源又多增加了一种途径。国内外均已经在地表水^[4]和地下水中^[5]发现了 VOCs。我国长江、淮河、黄河、海河和辽河这 5 大流域的典型饮用水源地都检测出了 VOCs 的存在^[6],而人体一旦摄入过量 VOCs 后

收稿日期: 2020-09-03; 修订日期: 2020-09-16

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2015FY110900-005)

作者简介: 程云轩(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为湖泊水体污染治理,E-mail: 244937163@qq.com

* 通信作者,E-mail: jiaolx@craes.org.cn

会导致畸形、突变和癌症,还可导致肝肾和肺^[7]功能损害,以及诱发生殖功能、免疫功能和神经等一系列慢性疾病^[8],威胁人体健康;同时还有研究发现 VOCs 对生态环境中的植物也会造成不小的影响,一定剂量的 VOC 会导致水稻等植物种子的发芽率以及胚根、胚轴长度降低^[9],因此可挥发性有机物带来的环境问题应当引起重视.国家已将部分 VOCs 纳入 GB 3838-2002《地表水环境质量标准》和 GB 5749-2006《生活饮用水卫生标准》的限值指标之中,至今已扩展至 30 项.

南四湖是淮河流域子流域之一,主要位于山东省西南部,西南角向南延伸至苏北地区,位于北纬 34°24′~35°59′,东经 115°02′~117°42′^[10].行政范围主要包括山东省的济宁、枣庄、菏泽和泰安这 4 个地级市,以及江苏省徐州市,流域面积 30453 km²,流域内水系纵横交错,入湖河流达 53 条^[11].作为该流域内所有支流的汇集点,同时也是周边民众生产生活用水水源,了解南四湖 VOCs 污染状况至关重

要,利用数据分析软件对南四湖 VOCs 的浓度以及空间分布进行定性及定量的分析,可以初步明确其 VOCs 大体的污染状况,再针对人体和生态环境所产生的风险进行评价,即可明确南四湖 VOCs 污染的整体状况,以期控制湖泊水体 VOCs 污染做出贡献.

1 材料与方法

1.1 水样采集

2017 年 11 月根据 GPS 坐标定位,在由南阳湖、独山湖、昭阳湖和微山湖这 4 个湖泊组成的南四湖水体中选取 25 个取样点采集水样(图 1),25 个点位的地理信息详情如表 1 所示.使用 40 mL 棕色 VOCs 取样瓶采集水样至溢流,确保瓶内无气泡,使用聚四氟乙烯(PTFE)瓶盖密封保存,同时预先向水样中添加 50 μL HCl 溶液(1:1, pH≤2),防止目标物质被生物降解.将样品用 4℃ 保温箱冷藏,采样结束后当天送至实验室进行样品检测.

表 1 南四湖采样点详细地理信息

Table 1 Geographical information for 25 sampling sites in Nansi Lake

取样点	经度(E)	纬度(N)	取样点	经度(E)	纬度(N)
NSH-1	116°37'49.440"	35°07'42.348"	NSH-14	116°55'58.000"	34°55'45.000"
NSH-2	116°39'44.748"	35°07'52.788"	NSH-15	116°57'37.000"	34°54'07.000"
NSH-3	116°39'44.100"	35°09'06.156"	NSH-16	116°59'58.000"	34°53'17.000"
NSH-4	116°39'57.888"	35°11'26.340"	NSH-17	117°0'25.000"	34°51'40.000"
NSH-5	116°38'43.872"	35°12'50.292"	NSH-18	117°03'04.000"	34°49'31.000"
NSH-6	116°37'38.964"	35°14'11.868"	NSH-19	117°04'29.000"	34°48'30.000"
NSH-7	116°37'38.964"	35°05'01.104"	NSH-20	117°08'36.000"	34°43'56.000"
NSH-8	116°43'51.000"	35°03'46.000"	NSH-21	117°14'34.000"	34°40'49.000"
NSH-9	116°47'37.000"	35°02'22.000"	NSH-22	117°15'56.000"	34°38'18.000"
NSH-10	116°49'54.000"	35°02'16.000"	NSH-23	117°20'44.000"	34°36'15.000"
NSH-11	116°50'42.000"	35°04'39.000"	NSH-24	117°18'05.000"	34°38'18.000"
NSH-12	116°52'18.000"	35°01'13.000"	NSH-25	117°12'08.000"	34°39'25.000"
NSH-13	116°53'44.000"	34°58'51.000"			

1.2 试剂

所使用的系列标准物质(购自美国 AccuStandard 公司)包括:1,1-二氯乙烯、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、1,1,1-三氯乙烷、1,1-二氯乙烯、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 1,3-二氯乙烯、甲苯、反式 1,3-二氯乙烯、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、1,1,1,2-四氯乙烷、乙苯、间/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、1,2,3-三氯丙烷、正丙苯、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、1,4-二氯苯、1,3-二氯苯、4-异丙基甲苯、1,2-二氯苯、正丁基苯、1,2-二

溴-3-氯丙烷、1,2,4 三氯苯、六氯丁二烯、萘和 1,2,3-三氯苯共 52 种 VOCs^[12].在进行样品检测过程中,使用甲醇逐级稀释完成标准液的配置.使用 1,4-二氯苯-d4 为测试时内标物.

1.3 仪器与控制条件

吹扫捕集使用 PT9800&Aquatek100. 色谱仪使用 Agilent GC7890/MS5975 色质联用仪,DB-624 石英毛细管柱.控制条件:吹扫过程控制在常温下进行,吹扫速度 40 mL·min⁻¹,吹扫用时 11 min,吹脱用时 1 min,预脱附温度 190℃,脱附用时 2 min,烘烤温度 200℃,烘烤用时 6 min.气相色谱仪初始柱温度 35℃,以 6℃·min⁻¹速率到 160℃,后以 20℃·min⁻¹速率 2 min 升至 210℃.载带气体使用纯度>99.99%的氦气以恒流方式充入.质谱仪离子化方式为:EI,能量强度 70 eV.离子源温度 200℃,接口

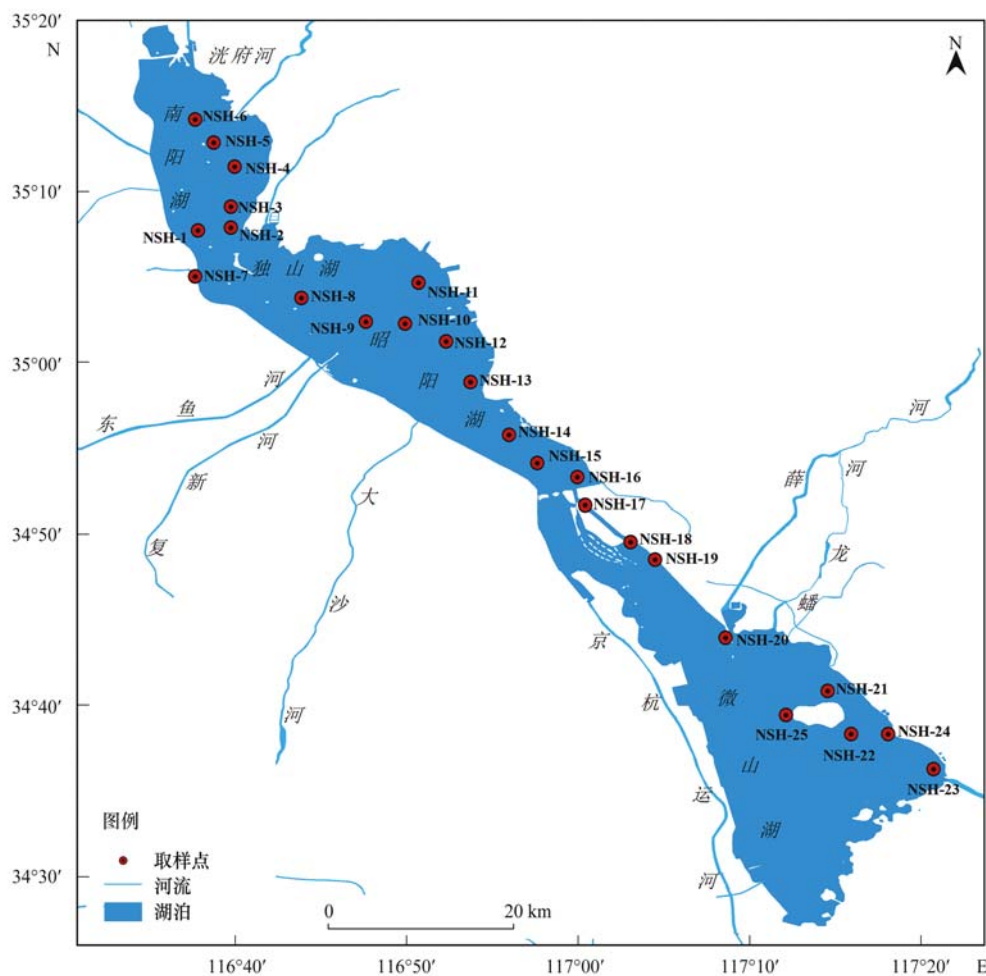


图1 南四湖采样地点示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling points in Nansi Lake

温度 220℃, 扫描范围 35 ~ 300 u. 每次检测使用 20 mL 样品与 50 μL 内标 (质量浓度为 20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 进行检测分析. 对样品 52 种 VOCs 检测线性范围为 0.05 ~ 100.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 回收率达到 72% ~ 121%, 精密度 (RSD) 达到 2.69% ~ 12.99%, 检出限 0.01 ~ 0.25 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 选用仪器和控制条件参考文献[12].

1.4 实验室质控

VOCs 具有易挥发的特殊性质, 部分可挥发性有机物在实验室中属于常用试剂, 在对于样品进行前处理时易发生污染从而干扰实验数据. 因此实验中严格控制操作过程, 在采样结束当天就将样品送至实验室检测, 并对样品设置实验室空白组, 以测得实验室背景值. 实验室背景值 GC-MS 色谱图如图 2 所示. 利用选择离子在图谱上找寻相应的目标物质, 分析后可知有两种目标物质出现明显峰, 即代表这两种物质被检出 (表 2). 为保证最后检测结果准确应在后续 VOCs 检出情况中扣除这一值.

1.5 健康风险评价体系

南四湖作为周边地区农业和生活用水水体, 所含 VOCs 对人体健康的影响选用 US EPA 健康风险

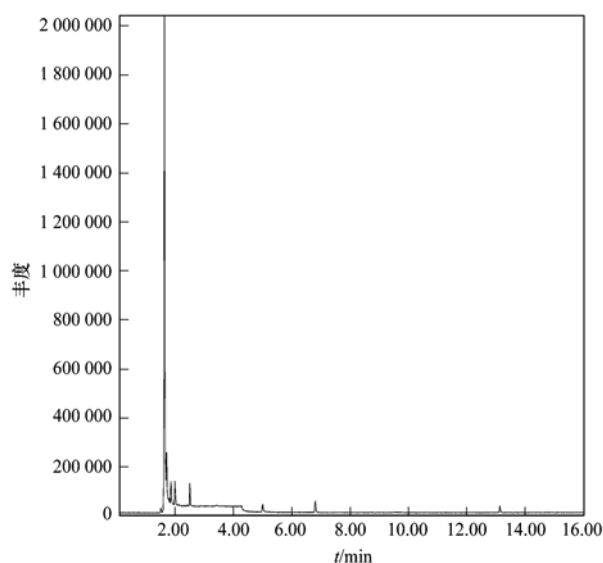


图2 实验室背景值 GC-MS 色谱图

Fig. 2 GC-MS chromatogram of laboratory background value

模型进行评价^[13], 目前该方法已成为国际公认可靠的健康风险评价体系, 在 1983 年由美国国家科学院提出^[14]. 由于本研究所测出的 VOCs 根据以往文献, 有少量未被 US EPA 列入风险评价体系, 但

表 2 两种被检出 VOCs 详细信息
Table 2 Details of the two detected VOCs

VOCs	选择离子 ¹⁾	停留时间/min	浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
甲苯	91*、92 和 65	5.147	0.05
乙苯	91* 和 106	8.498	0.01

1) *表示定量离子

VOCs 属有机物,其种类繁多且尚无法将所有已知的 VOCs 对人体健康影响一一洞悉,因此列出文献中经常出现的 VOCs 作为健康评价衡量标准,同时也作为与其他水体 VOCs 含量作为对比的依据.在计算健康风险时通常分别计算非致癌风险指数(HI)和致癌风险指数(Risk),非致癌风险指数计算公式如下:

$$\text{HI} = \text{CDI}/\text{RfD}$$

式中,CDI 为长期日摄入量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$; RfD 则为污染物非致癌参考剂量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$.

致癌风险指数(Risk)表示暴露于致癌物中而导致的人一生中超过正常水平的癌症发病率,在低剂量暴露(Risk < 0.01)时,计算公式如下:

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

在高剂量暴露(低剂量暴露时 Risk 计算数值 ≥ 0.01),计算公式如下:

$$\text{Risk} = \sum [1 - \exp(-\text{CDI} \times \text{SF})]$$

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

CDI 通常包含两种途径的计算:

$$\text{CDI}_{\text{饮水途径}} = (\rho \times \text{TF} \times U \times \text{EF} \times \text{ED}) / (\text{BW} \times \text{AT})$$

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

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

上述公式中的参数均参考 US EPA 推荐值并结合国情进行选取,如表 3 所示.

1.6 生态风险评价体系

生态风险评估多用于评估暴露于一种或多种有害物质中可能发生或正在发生不利生态影响的可能性^[16].通常使用风险商模型(RQ)来定量分析特定物种暴露于环境中化学药品的风险.风险商值则根据欧洲药品评价机构(EMEA)发布的指南进行计算:

$$\text{RQ} = \text{MEC}/\text{PNEC}$$

式中,MEC 为实测环境浓度($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). PNEC 为预测化合物对水生生物无影响浓度($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$).而 PNEC 可以由慢性值(Chv)和评估因子(AF)的比值而来,公式如下:

$$\text{PNEC} = \text{Chv}/\text{AF}$$

为评估南四湖水域总体的生态风险,将各物质

表 3 相关符号、参数名称、单位及取值

符号	参数名称	单位	取值
ρ	水中化合物浓度	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	测量值
U	日饮用水量	$\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$	2
EF	暴露频率	$\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	365
ED	致癌暴露延时	a	70
ED	非致癌暴露延时	a	30
BW	体重	kg	60
AT	致癌平均暴露时间	d	25 550
AT	非致癌平均暴露时间	d	10 950
I	单次洗澡单位表面积污染物吸附量	$\text{mg}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{次})^{-1}$	计算所得
A_{sd}	人体表面积	cm^2	16 600
FE	洗澡频率	$\text{次}\cdot\text{d}^{-1}$	0.3
f	肠道吸附比率	无量纲	1
k	皮肤吸收比率	$\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$	0.001
τ	延滞时间	h	1
TE	洗澡时间	h	0.4
π	圆周率	无量纲	3.14
TF	煮沸后 VOCs 的滞留比率	无量纲	0.3 ^[15]

的生态风险采取叠加的形式按以下公式计算:

$$\text{RQ}_{\text{总}} = \text{RQ}_1 + \text{RQ}_2 + \cdots + \text{RQ}_n$$

这里的慢性值(Chv)取值参考 US EPA 污染防治数据库 PBT profilers, 评估因子(AF)此时取值为 100^[17],取值以及计算方法参考 Chen 等^[6]和 Cao 等^[18]所做相关研究.

2 结果与讨论

2.1 VOCs 检出情况

对南四湖水域 25 个取样点的 52 种 VOCs 进行检测,共有 24 种被检测出,扣除实验室空白值后检出情况如表 4 所示.检出物质中苯系物占大多数,烯烃与烷烃次之,其他物质为少数.其中乙苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯、1,2-二氯苯和萘检出率达到 100%,即在 25 个取样点中均被检测出来.顺式 1,3-二氯丙烯和甲苯的检出率为 96%,即除了在 24 号点未检测出外,在其他点位均被检测出.1,2,4-三甲基苯的检出率最低,仅为 12%,即只在 NSH-6、NSH-7 和 NSH-8 号点位被检测出.1,2-二氯苯平均浓度最高,达到 $3.49 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,其次是间/对-二甲苯,平均值为 $1.63 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.1,2,4-三甲基苯平均浓度最低仅为 $0.02 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.参考生活饮用水卫生标准和地表水环境质量标准^[19, 20],检测出的 VOCs 浓度远低于上述标准中国家限值(表 3).但间/对-二甲苯在 NSH-24 号点位仍检测出 $23.39 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,这一状况值得引起重视.取样期间正值京杭大运河河道清淤疏浚工程期间,由于 VOCs 的易挥发易降解的特性,因此可能导致测出值偏低.

表 4 南四湖水体 VOCs 检出情况

Table 4 VOCs concentrations in the surface water of Nansi Lake					
VOCs	检出率 /%	$\rho/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$			国家限值 $/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
		最小值	最大值	平均值	
1,1-二氯乙烯	44.00	ND	1.11	0.31	30
反式1,2-二氯乙烯	44.00	ND	1.67	0.44	—
1,1-二氯乙烷	32.00	ND	0.70	0.09	—
1,1,1-三氯乙烷	44.00	ND	2.38	0.73	2 000
四氯化碳	48.00	ND	0.18	0.06	2
苯	88.00	ND	0.51	0.18	10
1,2-二氯乙烷	76.00	ND	0.16	0.11	30
1,2-二氯丙烷	44.00	ND	0.13	0.03	—
顺式1,3-二氯乙烯	96.00	ND	0.68	0.28	—
甲苯	96.00	ND	0.88	0.40	700
乙苯	100.00	0.02	5.05	0.66	30
间/对-二甲苯	100.00	0.02	23.39	1.63	50
邻-二甲苯	100.00	0.03	4.19	1.20	50
苯乙烯	88.00	ND	0.19	0.07	20
异丙苯	44.00	ND	0.31	0.10	250
正丙苯	40.00	ND	1.04	0.26	—
1,3,5-三甲基苯	52.00	ND	3.44	1.04	—
叔丁基苯	48.00	ND	1.76	0.54	—
1,2,4-三甲基苯	12.00	ND	0.27	0.02	—
仲丁基苯	28.00	ND	0.47	0.10	—
4-异丙基甲苯	52.00	ND	0.97	0.32	—
1,2-二氯苯	100.00	0.91	7.45	3.49	1 000
正丁基苯	48.00	ND	2.28	0.73	—
萘	100.00	0.09	3.45	1.27	—

同时对每种 VOCs 在各个点位的浓度进行分析(如图 3),可以看出 24 种 VOCs 含量的中值均处于 $5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。1,2-二氯苯在大多数点位的浓度相较于其他 VOCs 浓度较高,同时在图 3 中乙苯与间/对-二甲苯处出现异常值,该异常值表示乙苯、间/对-二甲苯在 NSH-24 号点位的浓度远超它们在其他点位的浓度。

Chen 等^[6]对于中国五大流域常规 VOCs 浓度有过相关研究,检出的浓度范围为 $0\sim9.81\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,南四湖在我国五大流域中属淮河流域,除间/对-二甲苯在 NSH-24 号点位浓度超过这一范围外,其余 VOC 均处于这一浓度范围内。该研究还发现五大流域中检出率最高的 10 种常规型 VOCs,分别有 7 种(1,2,4-三氯苯甲苯、间/对-二甲苯、萘、1,2-二氯丙烷、溴氯甲烷、乙苯和 1,2,3-三氯苯)在南四湖水体中被检测出,1,2-二氯丙烷检出率为 44%,属 7 种中检出率最低。同时南四湖萘的浓度($0.09\sim3.45\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)也与五大流域检出浓度范围($0.18\sim3.37\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)相似。因此南四湖 VOCs 的检出情况与我国五大流域的检出情况基本相符。

2.2 VOCs 空间分布

利用 ArcGIS 10.2 软件对南四湖水体的每个点

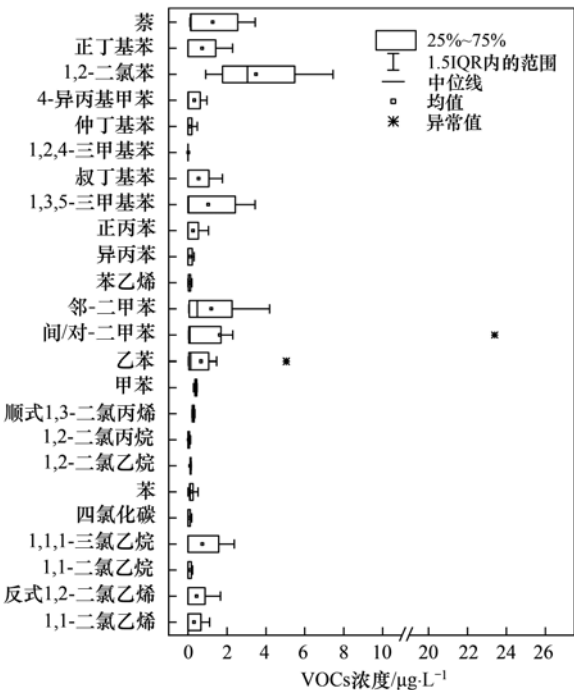


图 3 取样点 VOCs 浓度箱线图

Fig. 3 Boxplot of VOCs concentrations at sampling sites

位的 VOCs 总浓度进行分析(如图 4),可以发现南四湖水体的 VOCs 污染空间分布呈现“两端高,中间低”的情况。即位于湖体东南和西北两端的南阳湖和微山湖 VOCs 的浓度较高,且位于西北端的南阳湖 VOCs 浓度整体高于东南端的微山湖的浓度,处于“中间”位置的昭阳湖和独山湖 VOCs 浓度则较低。

结合现有的地图资料分析,VOCs 浓度较高的点位一般位于码头附近或者码头较为集中的区域,如污染最严重的 NSH-24 号点位附近是微山湖风景区的微山岛码头,NSH-23 号点位附近是微山岛旅游渡口;污染较为严重的 NSH-11 号点位附近是枣庄市滕州港,NSH-8 号点位附近是惠河码头、南阳古镇西渡口码头和北田家岛村码头;污染较轻的 NSH-19 号点位附近有着微山港和微山县夏镇西港两个码头;位于西北端的南阳湖比湖“中间”部分的 VOCs 污染要严重,可以注意到有如白沙港旅游码头、鲁桥码头和口门村旅游渡口等一众码头环绕南阳湖分布。通过采样期间走访当地居民,获悉南四湖航运船舶多采用汽油作为燃料,根据陈鸿展等^[21]的研究,无论使用高硫或低硫汽油的船只排放物主要由烷烃、烯烃和芳香烃化合物(只含有少量炔烃)组成,而南四湖水体中检测出的 VOCs 中芳香烃、烷烃和烯烃占据了一大部分,乙苯和间/对-二甲苯在处于旅游航线附近的 NSH-24 号点位还出现浓度异常高的情况。该研究与前一部分 VOCs 的检出情况吻合,可推测往来船只尾气排放会对环境中 VOCs 的

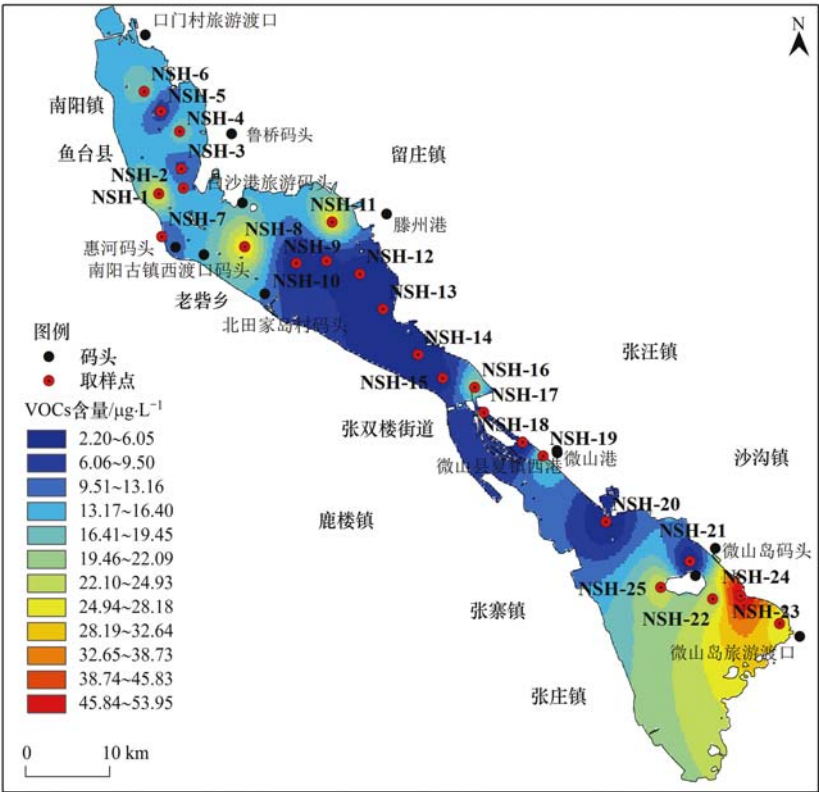


图4 南四湖 VOCs 浓度空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of VOCs concentrations in Nansi Lake

浓度产生较大影响。

同时由于南四湖作为该地区所有支流的汇集点,汇集来自周边区域的污水,上下游生活污水和工业农业用水的排放,也可能造成了水体中 VOCs 污染^[22]。西北端南阳湖受上游支流的影响容纳北端所有支流中的 VOCs。且南水北调东线工程对南端的微山湖水流方向有很大的影响,水流方向由南向北^[23],同样容纳了来自东南端的所有支流中的 VOCs^[24]。微山湖作为著名风景区,VOCs 浓度也会受到人为活动的影响,如人们自驾前往风景区带来的汽车尾气排放也会影响环境中的 VOCs 浓度^[25]。

2.3 健康风险评价

根据 US EPA 所使用的健康风险评价方式,对人体受到 VOCs 危害程度进行评价,各 VOCs 的暴露参数如表 5 所示。所选用数据均来自于 US EPA 综合信息风险库(IRIS)。健康风险评价中最重要的就是暴露参数,而暴露参数又存在不确定性(暴露参数未针对不同人种、性别和地区习惯等等情况),且我国尚未发布相应的暴露参数,因此采用与其他国内水体中相同的评价参数和方式可以反映南四湖水体 VOCs 污染对人体健康的影响程度。

通常长期日摄入量对直接饮用途径和洗浴(皮肤途径)途径需要分别进行计算,经计算后可得

关于南四湖水体 VOCs 健康风险评价中致癌或非致癌风险指数。但参考张映映等^[26]的研究发现洗浴途径所造成的风险远小于饮水途径,对考量各点位总体 VOCs 的致癌或非致癌风险指数时的影响几乎可以忽略不计,且本文所出现 VOCs 在 US EPA 数据库中显示的暴露方式多为口鼻暴露,皮肤暴露方式较为少见,因此直接计算饮水途径造成的风险即可。在计算致癌风险时,南四湖各点位致癌和非致癌风险情况如图 5 所示。

北京官厅水库中 9 个取样点的 HI 取值范围为

表 5 VOCs 健康风险评价参数

Table 5 Chemical and toxicological characteristics of VOCs		
VOCs	SF/(kg·d)·mg ⁻¹	RfD/mg·(kg·d) ⁻¹
1,1-二氯乙烯	ND	0.05
反式 1,2-二氯乙烯	ND	0.02
1,1-二氯乙烷	0.0057	0.2
1,1,1-三氯乙烷	ND	2
四氯化碳	0.07	0.004
苯	0.055	0.004
1,2-二氯乙烷	0.091	0.006
顺式 1,3-二氯丙烯	0.1	0.03
甲苯	ND	0.08
乙苯	0.011	0.01
间/对-二甲苯	ND	0.2
1,3,5-三甲基苯	ND	0.01
1,2-二氯苯	ND	0.09

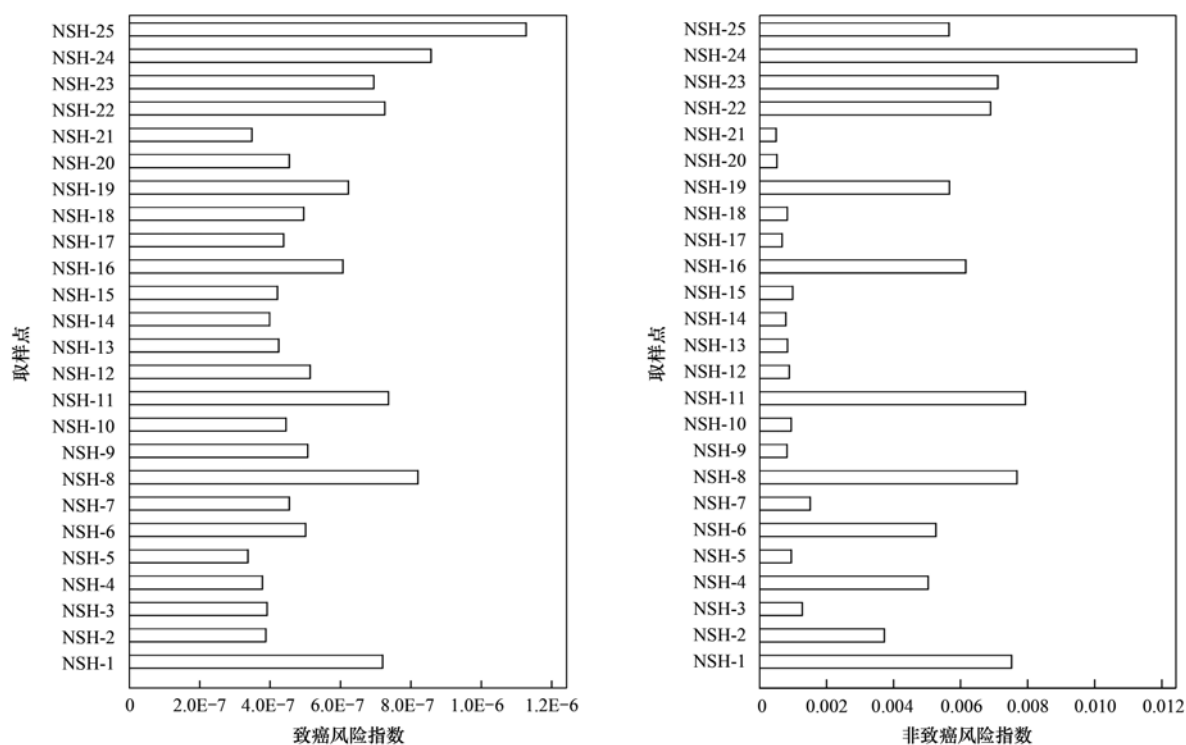


图5 挥发性有机物的致癌/非致癌风险

Fig. 5 Carcinogenic/Non-carcinogenic risk of VOCs

$2.4 \times 10^{-5} \sim 2.5 \times 10^{-4}$ ^[27], 对比发现南四湖水体的非致癌风险指数较北京官厅水库高出数个数量级, 但根据 US EPA 定义当非致癌风险指数大于 1 时才会对人体产生危害, 南四湖水体和北京官厅水库风险指数均远低于这一数值. 因此认为这一物质在两水体中均无对人体健康的非致癌风险. 产生这一差异的原因可能是由于官厅水库选取参与评价的 VOCs 种类较少, 仅有 4 种, 而本文选取了 13 种, 随着未来研究的进一步加深对于水体中 VOCs 的健康风险评价会越来越全面.

根据 US EPA 建议致癌风险在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 属于可接受范围 (风险阈值为 10^{-6}), 南四湖 25 个取样点的致癌风险均处于可接受范围之内, 因此南四湖暂无致癌风险威胁, 但 25 号点位的致癌风险指数较高已接近风险阈值. 江苏某乡镇的饮用水中的致癌风险指数范围为 $1.70 \times 10^{-7} \sim 2.03 \times 10^{-5}$ ^[28], 有 70% 的水样超过风险阈值, 南四湖的致癌风险与之相比属于安全范围, 仅有个别点位致癌物质的污染状况需警惕.

综合以上信息分析, 虽然南四湖整体上对人体暂无致癌与非致癌风险, 与吴云等^[29]的研究结果相似, 但 NSH-1、NSH-8、NSH-11、NSH-16、NSH-19、NSH-22、NSH-23 和 NSH-24 号点位的致癌和非致癌风险是偏高的, NSH-25 号点位的致癌风险甚至超过风险阈值对人体健康存在一定威胁. 下一步对于南四湖 VOCs 风险评估和管控的重

点应放在属于旅游景区的微山湖和其他几个健康风险偏高的点位. 应加强对于高风险值地区船只和机动车数量进行限制, 并采用清洁燃料以保护周边居民的健康.

2.4 生态风险评估

对于某种特定生物 (此处选用鱼类作为特定生物) 的风险商来说, 当 RQ 大于 1 时认为该区域有高风险, 当 RQ 范围在 0.1 ~ 1 之间时, 认为该区域有中等风险, 若 RQ 范围在 0.1 ~ 0.01 之间, 则认为该区域有低风险. 南四湖 25 个取样点的 RQ 值结果如表 6 所示.

可以发现 25 个取样点中有 12 个点位的风险商值超过 1, 通常 RQ 值超过 1 表明对鱼类有生态风险. 其中 NSH-24 号点位的风险商值最高, NSH-11 号点位次之. 为明确造成这些点位风险商值高的主要物质组成, 选取风险商值大于 1 的点位进行 RQ 值贡献分析如图 6 所示.

从图 6 中可发现上述 12 个点位, 正丁基苯对于生态风险商的贡献最大, 1,2-二氯苯, 叔丁基苯和 1,3,5-三甲基苯对于生态风险商的影响次之, 间/对-二甲苯对 NSH-24 号点位的生态风险商影响最大, 也是造成该点位风险商值最高的原因. 除 1,2-二氯苯外, 其他 3 种影响最大 VOCs 在南四湖中并不是浓度最高, 检出率也不是最大的, 因此对于可造成生态风险 VOCs 的监测并不能简单地靠浓度和检出率等因素去判断.

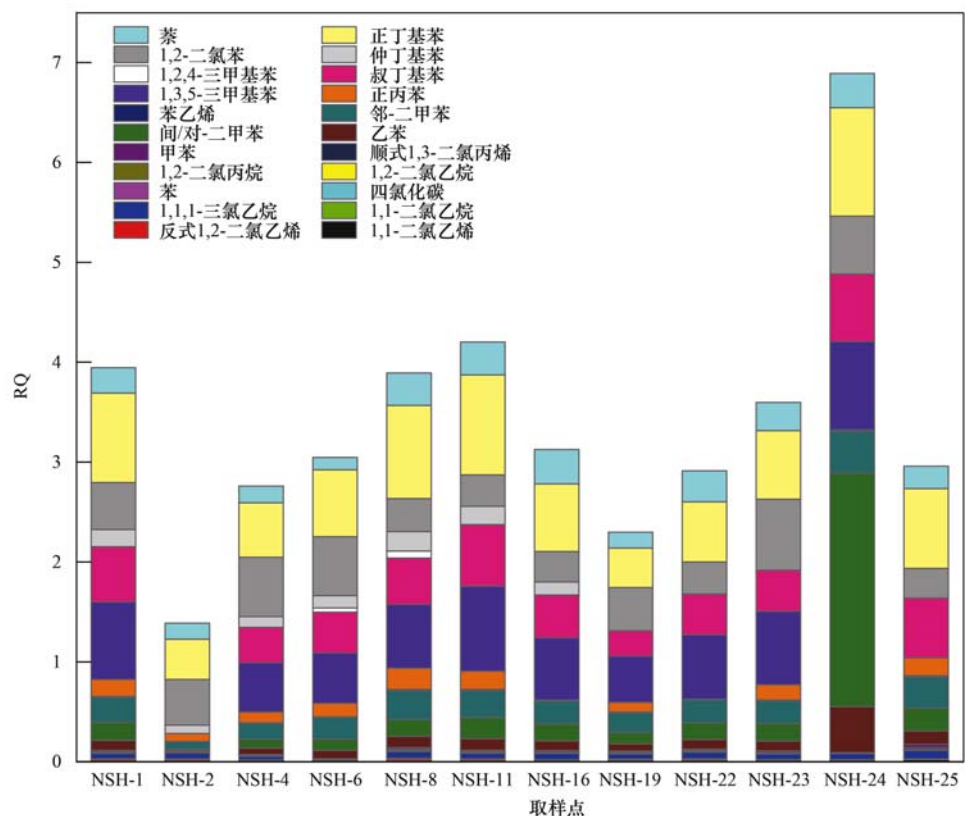


图6 南四湖生态风险商值
Fig. 6 Ecological risk quotients of Nansi Lake

表6 南四湖25个取样点生态风险商(RQ)值
Table 6 Ecological risk quotients(RQ) of the 25 water samples of Nansi Lake

点位	RQ 范围		RQ _总
	Min	Max	
NSH-1	0.00	0.89	3.94
NSH-2	0.00	0.46	1.39
NSH-3	0.00	0.71	0.76
NSH-4	0.00	0.59	2.76
NSH-5	0.00	0.57	0.61
NSH-6	0.00	0.67	3.05
NSH-7	0.00	0.78	0.86
NSH-8	0.00	0.93	3.89
NSH-9	0.00	0.12	0.19
NSH-10	0.00	0.26	0.32
NSH-11	0.00	1.00	4.20
NSH-12	0.00	0.18	0.24
NSH-13	0.00	0.16	0.21
NSH-14	0.00	0.14	0.19
NSH-15	0.00	0.24	0.41
NSH-16	0.00	0.68	3.13
NSH-17	0.00	0.09	0.15
NSH-18	0.00	0.20	0.26
NSH-19	0.00	0.46	2.30
NSH-20	0.00	0.11	0.17
NSH-21	0.00	0.12	0.16
NSH-22	0.00	0.64	2.91
NSH-23	0.00	0.74	3.60
NSH-24	0.00	2.34	6.89
NSH-25	0.00	0.80	2.96

3 结论

(1)对于南四湖水体25个取样点52种VOCs的检测,共有24种VOCs被检测出,有7种VOCs在各点位的检出率超过95%。间/对-二甲苯和乙苯在24号点位浓度远超其他VOCs,1,2-二氯苯在所有点位浓度均较高,但总体上看南四湖水域VOCs浓度处于较低水平,均处于国家标准限值之下。

(2)南四湖水体中的VOCs空间分布呈现南北两端含量较高,中间含量较低的情况,结合现状分析后,发现VOCs浓度较高的点位周围通常分布有一定数量的码头,因此认为航运船只所使用的燃料对南四湖VOCs浓度有较大影响,同时南四湖上下游支流中的工业农业生产和周边人为活动也影响了其VOCs浓度。

(3)针对南四湖水体的健康风险评价中发现,南四湖非致癌和致癌风险指数均处于安全范围,部分被US EPA列入风险评价标准体系常规VOCs致癌和非致癌风险较其他湖泊水体高,但总体上除个别点位外不会对人体健康产生实质性的威胁。

(4)对南四湖鱼类进行生态风险评估,有12个点位存在对鱼类的生态风险。对高风险商值的点位每种VOCs进行具体的分析,可发现南四湖的生态风险主要由正丁基苯,1,2-二氯苯,叔丁基苯和

1,3,5-三甲基苯造成。正丁基苯,叔丁基苯和1,3,5-三甲基苯的风险商值与它们的检出率,浓度没有必然的联系。

参考文献:

- [1] Liu L, Zhou H. Investigation and assessment of volatile organic compounds in water sources in China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **173**(1): 825-836.
- [2] 张云, 李彦锋. 环境中 VOCs 的污染现状及处理技术研究进展[J]. 化工环保, 2009, **29**(5): 411-415.
Zhang Y, Li Y F. Pollution situation of VOCs in ambient air and research progresses of VOCs treatment technologies [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2009, **29**(5): 411-415.
- [3] Dewulf J, Van Langenhove H, Heireman B. The air/water exchange of volatile organic compounds from waters in the transient and turbulent regime[J]. Water Research, 1998, **32**(7): 2106-2112.
- [4] 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.
- [5] Fan C, Wang G S, Chen Y C, et al. Risk assessment of exposure to volatile organic compounds in groundwater in Taiwan [J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(7): 2165-2174.
- [6] 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.
- [7] Zhao Q, Wang Q, Li Y J, et al. Influence of Volatile Organic Compounds (VOCs) on pulmonary surfactant monolayers at air-water interface: implication for the pulmonary health [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, **562**: 402-408.
- [8] Morakinyo O M, Mokgobu M I, Mukhola M S, et al. Health risk assessment of exposure to ambient concentrations of benzene, toluene and xylene in Pretoria West, South Africa[J]. African Journal of Science, Technology, Innovation and Development, 2017, **9**(4): 489-496.
- [9] Aslani F, Juraimi A S, Ahmad-Hamdani M S, et al. Phytotoxic interference of volatile organic compounds and water extracts of *Tinospora tuberculata* Beumee on growth of weeds in rice fields [J]. South African Journal of Botany, 2015, **100**: 132-140.
- [10] 孟瑶瑶, 薛丽芳. 南四湖流域土地利用及其景观格局变化分析[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(3): 246-252.
Meng Y Y, Xue L F. Analysis on landscape pattern change and land use in Nansi Lake basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, **24**(3): 246-252.
- [11] 张炜, 薛丽芳, 杜杰. 南四湖流域水循环要素的时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2020, **18**(3): 65-72.
Zhang W, Xue L F, Du J. Spatiotemporal variation characteristics of water cycle elements in the Nansihu Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, **18**(3): 65-72.
- [12] 高秋生, 赵永辉, 焦立新, 等. 白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2048-2055.
Gao Q S, Zhao Y H, Jiao L X, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds in Baiyangdian Lake [J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2048-2055.
- [13] USEPA. Risk assessment guidance for superfund: Volume 1: human health evaluation manual (part A): interim final [R]. Washington, DC, USA: U. S. Environmental Protection Agency, 1989.
- [14] NRC. Risk assessment in the federal government: managing the process [M]. Washington, DC: National Academies Press, 1983. 191.
- [15] 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.
- [16] Norton S B, Rodier D J, van der Schalie W H, et al. A framework for ecological risk assessment at the EPA [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1992, **11**(12): 1663-1672.
- [17] Van Leeuwen C J, Vermeire T G. Risk assessment of chemicals: an introduction (2nd ed.) [M]. The Netherlands: Springer, 2007.
- [18] Cao F M, Qin P, Lu S Y, et al. Measurement of volatile organic compounds and associated risk assessments through ingestion and dermal routes in Dongjiang Lake, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **165**: 645-653.
- [19] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
GB 3838-2002, Environmental quality standards for surface water [S].
- [20] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
GB 5749-2006, Standards for drinking water quality [S].
- [21] 陈鸿展, 何俊杰, 陈俊文, 等. 排放控制区政策下船舶辅机大气污染物排放特征研究[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(6): 1943-1950.
Chen H Z, He J J, Chen J W, et al. Emission characteristics of air pollutants from marine auxiliaries under ECA policy [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(6): 1943-1950.
- [22] 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.
- [23] 武周虎, 乔海涛, 付莎莎, 等. 南水北调东线工程对南四湖环境的影响及对策[J]. 青岛理工大学学报, 2006, **27**(1): 1-7.
Wu Z H, Qiao H T, Fu S S, et al. Effect of south-to-north water transfer on environment of Nansi Lake and defending strategies [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2006, **27**(1): 1-7.
- [24] 戴文婷, 安英莉, 葛冬梅, 等. 微山湖内源有机氯农药残留的生态风险评估[J]. 水生态学杂志, 2016, **37**(5): 41-48.
Dai W T, An Y L, Ge D M, et al. Ecological risk assessment of organochlorine pesticide residues in Weishan Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2016, **37**(5): 41-48.
- [25] Simayi M, Shi Y Q, Xi Z Y, et al. Understanding the sources and spatiotemporal characteristics of VOCs in the Chengdu Plain, China, through measurement and emission inventory [J]. Science of the Total Environment, 2020, **714**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136692.

- [26] 张映映, 冯流, 刘征涛. 长江口区域水体半挥发性有机污染物健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(1): 18-23.
Zhang Y Y, Feng L, Liu Z T. Health risk assessment on semivolatile organic compounds in water of Yangtze Estuary area [J]. Research of Environmental Sciences, 2007, **20**(1): 18-23.
- [27] 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价[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.
- [28] 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.
- [29] 吴云, 林增, 季海峰, 等. 上海市金山区地表水中挥发性有机物检测及其健康风险评估[J]. 环境与职业医学, 2016, **33**(12): 1180-1183.
Wu Y, Lin Z, Ji H F, *et al.* Detection and health risk assessment of volatile organic compounds in surface water of Jinshan District of Shanghai [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2016, **33**(12): 1180-1183.

环境科学

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Hua-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)