

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

PM<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>

• 中风

PM<sub>2.5</sub>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)   |                                                                         |

# 环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评估

张文萍<sup>1,2</sup>, 张振飞<sup>1</sup>, 郭昌胜<sup>1,2</sup>, 吕佳佩<sup>1,2</sup>, 邓洋慧<sup>1</sup>, 张恒<sup>1,2</sup>, 徐建<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国环境科学研究院, 环境健康风险评估与研究中心, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院, 国家环境保护化学品生态效应与风险评估重点实验室, 北京 100012)

**摘要:** 为探究有机磷酸酯(organophosphate esters, OPEs)在太湖流域地表水中的污染特征、潜在来源以及生态风险和健康风险, 采集了环太湖 18 条河流水体样和 11 个太湖湖体水样, 利用超高效液相色谱-质谱联用仪(UPLC-MS/MS)测定了水体中 13 种典型 OPEs 的浓度水平和污染特征. 结果表明, 除磷酸三丙酯(TPrP)、2-乙基己二苯基磷酸酯(EHDPP)和磷酸三甲苯酯(TCrP)外, 其余 10 种 OPEs 在所有采样点水样中均有不同程度地检出, 总检出浓度( $\sum$  OPEs)范围为 152.5 ~ 2 524 ng·L<sup>-1</sup>, 浓度中值为 519.2 ng·L<sup>-1</sup>. 其中磷酸三(1-氯-2-丙基)酯(TCPP)和磷酸三(2-氯乙基)酯(TCEP)是最主要的 OPEs, 浓度范围分别为 73.7 ~ 1 753.9 ng·L<sup>-1</sup> (浓度中值: 204.6 ng·L<sup>-1</sup>) 和 43.9 ~ 313.5 ng·L<sup>-1</sup> (浓度中值: 131.3 ng·L<sup>-1</sup>).  $\sum$  OPEs 呈现西北地区向东南地区逐渐降低的趋势, OPEs 的浓度水平与所在地区经济发展水平和工业发展程度密切相关. 对 OPEs 的来源进行解析, 发现电子、纺织企业废水的排放以及建材、交通和航运排放可能是太湖流域地表水中 OPEs 的主要来源. 生态风险评估结果表明, 部分点位 TCPP、磷酸三(1,3-二氯-2-丙基)酯(TDCP)以及磷酸三苯酯(TPhP)对水生生物具有低风险; 健康风险评估表明, 基于饮用水摄入的 OPEs 暴露的风险商(hazard quotient, HQ)均小于 1, 不存在健康风险, 但 OPEs 对水生生态系统和周边居民的长期风险仍需引起关注.

**关键词:** 有机磷酸酯(OPEs); 太湖; 污染特征; 来源解析; 风险评估

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1801-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202008266

## Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake

ZHANG Wen-ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhen-fei<sup>1</sup>, GUO Chang-sheng<sup>1,2</sup>, LÜ Jia-pei<sup>1,2</sup>, DENG Yang-hui<sup>1</sup>, ZHANG Heng<sup>1,2</sup>, XU Jian<sup>1,2\*</sup>

(1. Center for Environmental Health Risk Assessment and Research, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Effect and Risk Assessment of Chemicals, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** To explore the pollution characteristics, potential sources, and ecological and health risk of organophosphate esters (OPEs) in the surface water of Taihu Lake, water samples from 18 surrounding rivers were collected, as well as 11 water samples from Taihu Lake. The concentrations of 13 OPEs in the water were determined using UPLC-MS/MS, and the spatial distribution of the OPEs in surface water of Taihu Lake basin was further analyzed. The results indicate that, in addition to tripropyl phosphate (TPrP), 2-ethylhexyl diphenyl phosphate (EHDPP), and tricresyl phosphate (TCrP), ten OPEs were detected in all the water samples, the total concentration ( $\sum$  OPEs) ranged from 152.5 ng·L<sup>-1</sup> to 2 524 ng·L<sup>-1</sup>, and the concentration median value was 519.2 ng·L<sup>-1</sup>. Tri (chloropropyl) phosphate (TCP) and tri(2-chloroethyl) phosphate (TCEP) were the dominant OPEs, with the concentration ranges of 73.7-1 753.9 ng·L<sup>-1</sup> (medium value: 204.6 ng·L<sup>-1</sup>) and 43.9-313.5 ng·L<sup>-1</sup> (medium value: 131.3 ng·L<sup>-1</sup>), respectively. The  $\sum$  OPEs decreased from the northwest region to the southeast, which corresponds to the economic and industrial development. The results of the source identification reveal that the wastewater discharge from electronics and textile enterprises, construction materials, and vehicular and marine traffic emissions may be the principal sources of the OPEs in Taihu Lake. The ecological risk assessment results indicate that only TCP, tri(dichloropropyl) phosphate (TDCP), and triphenyl phosphate (TPhP) in some sites had a low risk. The health risk assessment reveals that there were no risks based on water intake, but the long-term risk of OPEs to the aquatic ecosystem and surrounding residents still need attention.

**Key words:** organophosphate esters(OPEs); Taihu Lake; pollution characteristics; source identification; risk assessment

有机磷酸酯(organophosphate esters, OPEs)是一类人工合成的磷酸衍生物, 因其具有良好的阻燃性

和增塑性而被用作阻燃剂和增塑剂, 广泛添加到涂料、纺织品、电子器件和建筑材料等产品中<sup>[1,2]</sup>. 按

收稿日期: 2020-08-26; 修订日期: 2020-09-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07301005); 国家自然科学基金项目(51208482); 国家重点研发计划项目(2019YFC1803401)

作者简介: 张文萍(1997~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: 624546379@qq.com

\* 通信作者, E-mail: xujian@craes.org.cn

取代基的不同可将 OPEs 分为烷基磷酸酯、氯代烷基磷酸酯和芳香基磷酸酯,其中氯代烷基磷酸酯主要用作阻燃剂<sup>[3]</sup>,烷基磷酸酯和芳香基磷酸酯用作增塑剂,兼具阻燃作用,一些非氯代烷基磷酸酯还可用作液压油、车用机油等的耐磨剂等<sup>[4,5]</sup>. 近年来,作为多溴联苯醚(PBDE)主要替代品的 OPEs 的生产量和使用量逐年增加<sup>[6,7]</sup>. 据报道,全球 OPEs 消费量从 2007 年的 70 000 t 增长到 2015 年的 680 000 t<sup>[8,9]</sup>,而中国 OPEs 的消费量在 2011 年达 100 000 t,并以每年 15% 的速率增长<sup>[10]</sup>. 由于 OPEs 是以非化学键方式添加到各种产品中的,在产品的生产、使用和弃置过程中极易直接或间接地释放到环境中<sup>[11]</sup>,甚至有可能通过长距离大气输送到达极地地区<sup>[8]</sup>. 目前在多种环境介质中都有 OPEs 的检出,如大气、灰尘<sup>[12]</sup>、土壤<sup>[13]</sup>、沉积物<sup>[3]</sup>、河流<sup>[14]</sup>、湖泊<sup>[15]</sup>以及水生生物<sup>[16]</sup>,甚至在食品<sup>[17]</sup>、人体指甲、头发<sup>[18]</sup>、母乳<sup>[19]</sup>和尿液<sup>[20]</sup>中也有检出.

相关研究表明,OPEs 具有神经毒性、免疫毒性、致癌性和内分泌干扰性等<sup>[7,9]</sup>,如磷酸三(1,3-二氯-2-丙基)酯(TDCP)、磷酸三正丁酯(TnBP)和磷酸三苯酯(TPhP)具有神经毒性<sup>[21]</sup>,磷酸三(2-氯乙基)酯(TCEP)和磷酸三(1-氯-2-丙基)酯(TCPP)被认为是潜在的致癌物<sup>[22]</sup>. OPEs 因其对生态环境和人体造成的潜在危害而引起广泛关注,欧盟在 2014 年第一次规定儿童玩具中 TCEP、TDCP 和 TCPP 的含量不得高于 5 mg·kg<sup>-1</sup>,并于 2015 年禁止了 TCEP 的使用,文献[23]中 TCEP 和 TPhP 被列为优先进行风险评估的化学品. OPEs 可通过产品的损耗、泄漏和大气沉降等途径直接进入地表水,此外,由于污水处理厂对 OPEs 的去除效果不佳<sup>[24]</sup>,污水处理厂出水也成为地表水中 OPEs 的主要来源之一<sup>[25]</sup>. 一项针对欧洲各国污水处理厂水质情况的调查显示,大多数污水处理厂的出水中可以检出 TCPP 和 TCEP,其浓度维持在几百个 ng·L<sup>-1</sup>,并且 TCPP 具有难降解的特性<sup>[26]</sup>. 进入水体中的 OPEs 成为水资源重复利用的巨大障碍. 由于大部分 OPEs 具有持久性<sup>[8]</sup>,地表水环境中 OPEs 的持续输入会对人体健康和生态系统构成潜在危害.

太湖位于我国经济最发达的地区之一,是我国第三大淡水湖,水域面积达 2 338.1 km<sup>2</sup>,湖岸线全长达 393.2 km. 太湖是我国重要的水产养殖基地、饮用水水源地,兼具灌溉和航运等功能. 太湖跨江、浙、皖、沪三省一市,毗邻苏州、湖州、宜兴、常州和无锡,周边城市常住人口达 2 600 多万,经济社会发展迅速,特别是西北部地区工业发达. 而太湖作为周边地区的主要接纳水体,长期承受着较大的环境污染

压力. 已有相关研究报道了太湖中心水体和沉积物中 OPEs 的污染情况<sup>[27-29]</sup>,但针对太湖环湖河流 OPEs 的污染情况和来源解析鲜见报道,此外,太湖作为饮用水水源地,OPEs 的存在对周边居民的健康可能存在一定的风险. 本研究选择 18 条环湖河流及太湖水体为研究对象,分析了 13 种 OPEs 在太湖流域的污染水平及分布特征,探究不同 OPEs 的相关性及其可能的来源. 并采用商值法从生态和人体健康两方面综合评估了 OPEs 在该地区的风险,以期了解 OPEs 在太湖流域地表水中的污染状况和来源提供了数据支撑,对改善太湖流域生态系统及居住人群的健康具有重要意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂与仪器

13 种 OPEs 标准品,包括 6 种烷基磷酸酯:磷酸三甲酯(TMP)、磷酸三乙酯(TEP)、磷酸三丙酯(TPrP)、磷酸三异丁酯(TiBP)、磷酸三(2-乙基己基)酯(TEHP)和磷酸三丁氧乙基酯(TBEP),3 种氯代烷基磷酸酯:TCEP、TCPP 和 TDCP,以及 4 种芳香基磷酸酯:TPhP、磷酸甲苯二苯酯(CDPP)、2-乙基己基二苯基磷酸酯(EHDPP)和磷酸三甲苯酯(TCrP),各物质的理化性质列于表 1. 除 TiBP 外,均购自德国 Dr. Ehremstorfer 公司(纯度≥98%). TiBP 与氘代物 TnBP-d27、TCPP-d18 购自加拿大 Toronto Research Chemicals 公司,TPPr-d21 购自挪威 Chiron AS 公司,氨水(25%~28%)和盐酸(分析纯)购自国药集团化学试剂有限公司(北京),甲醇和乙腈(色谱纯)购自英国 Fisher 公司,甲酸(FA)购自美国 Sigma-Aldrich 公司.

### 1.2 样品采集与前处理

样品采集于 2019 年 6 月,共布设 29 个采样点,包括环太湖 18 条环湖河流(R1~R18)以及 11 个太湖湖心采样点(L1~L11),具体采样点的位置参见图 1. 使用不锈钢采水器取 1 L 水样(0~1 m)于棕色玻璃瓶中,冷藏运回实验室,24 h 内处理分析.

样品前处理及测定参照课题组前期工作<sup>[30]</sup>,量取 500 mL 水样过 0.45 μm 的玻璃纤维滤膜,加入 5 ng 混合内标(TnBP-d27、TCPP-d18 和 TPPr-d21),用 ENVI-18 固相萃取柱富集,依次用 5 mL 二氯甲烷、5 mL 乙腈和 10 mL 超纯水活化,以 1 mL·min<sup>-1</sup> 的流速上样,水样富集后抽干 10 min,用 10 mL 超纯水淋洗,继续抽真空 1 h 至萃取柱充分干燥,8 mL 二氯甲烷:乙腈(体积比为 1:3)溶液洗脱,收集洗脱液在 40℃ 水浴中,氮气吹至近干,初始流动相比比例定容至 1 mL,过 0.22 μm 的尼龙滤膜,待 UPLC-MS/MS 分析.

表 1 OPEs 的名称及理化性质  
Table 1 Name and physicochemical properties of OPEs

| 分类      | 缩写    | 英文名称                            | 中文名称              | 分子式                                                             | lg $K_{ow}$ | 25℃ 时溶解度<br>/mg·L <sup>-1</sup> |
|---------|-------|---------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------|
| 烷基磷酸酯   | TMP   | Trimethyl phosphate             | 磷酸三甲酯             | C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> O <sub>4</sub> P                  | -0.65       | 3.00 × 10 <sup>5</sup>          |
|         | TEP   | Triethyl phosphate              | 磷酸三乙酯             | C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> O <sub>4</sub> P                 | 0.80        | 5.00 × 10 <sup>5</sup>          |
|         | TPrP  | Tripropyl phosphate             | 磷酸三丙酯             | C <sub>9</sub> H <sub>21</sub> O <sub>4</sub> P                 | 2.67        | 827                             |
|         | TiBP  | Tri-iso-butyl phosphate         | 磷酸三异丁酯            | C <sub>21</sub> H <sub>27</sub> O <sub>4</sub> P                | 3.60        | 3.72                            |
|         | TBEP  | Tributoxyethyl phosphate        | 磷酸三丁氧乙酯           | C <sub>18</sub> H <sub>39</sub> O <sub>7</sub> P                | 3.65        | 1.2 × 10 <sup>3</sup>           |
|         | TEHP  | Tri(2-ethylhexyl) phosphate     | 磷酸三(2-乙基己基)酯      | C <sub>24</sub> H <sub>51</sub> O <sub>4</sub> P                | 4.22        | 2.0 × 10 <sup>-6</sup>          |
| 氯代烷基磷酸酯 | TCEP  | Tri(2-chloroethyl) phosphate    | 磷酸三(2-氯乙基)酯       | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> Cl <sub>3</sub> O <sub>4</sub> P | 1.44        | 7 × 10 <sup>3</sup>             |
|         | TCPP  | Tri(chloropropyl) phosphate     | 磷酸三(1-氯-2-丙基)酯    | C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> Cl <sub>3</sub> O <sub>4</sub> P | 2.59        | 1.6 × 10 <sup>3</sup>           |
|         | TDCP  | Tri(dichloropropyl) phosphate   | 磷酸三(1,3-二氯-2-丙基)酯 | C <sub>9</sub> H <sub>15</sub> Cl <sub>6</sub> O <sub>4</sub> P | 3.8         | 1.50                            |
| 芳香基磷酸酯  | TPhP  | Triphenyl phosphate             | 磷酸三苯酯             | C <sub>18</sub> H <sub>18</sub> O <sub>4</sub> P                | 4.59        | 1.9                             |
|         | TCrP  | Tricresyl phosphate             | 磷酸三甲苯酯            | C <sub>21</sub> H <sub>21</sub> O <sub>4</sub> P                | 6.34        | 1.84 × 10 <sup>-2</sup>         |
|         | CDPP  | Cresyldiphenyl phosphate        | 磷酸甲苯二苯酯           | C <sub>19</sub> H <sub>17</sub> O <sub>4</sub> P                | 5.25        | 0.233                           |
|         | EHDPP | 2-Ethylhexyl diphenyl phosphate | 2-乙基己基二苯基磷酸酯      | C <sub>20</sub> H <sub>27</sub> O <sub>4</sub> P                | 6.64        | 1.9                             |

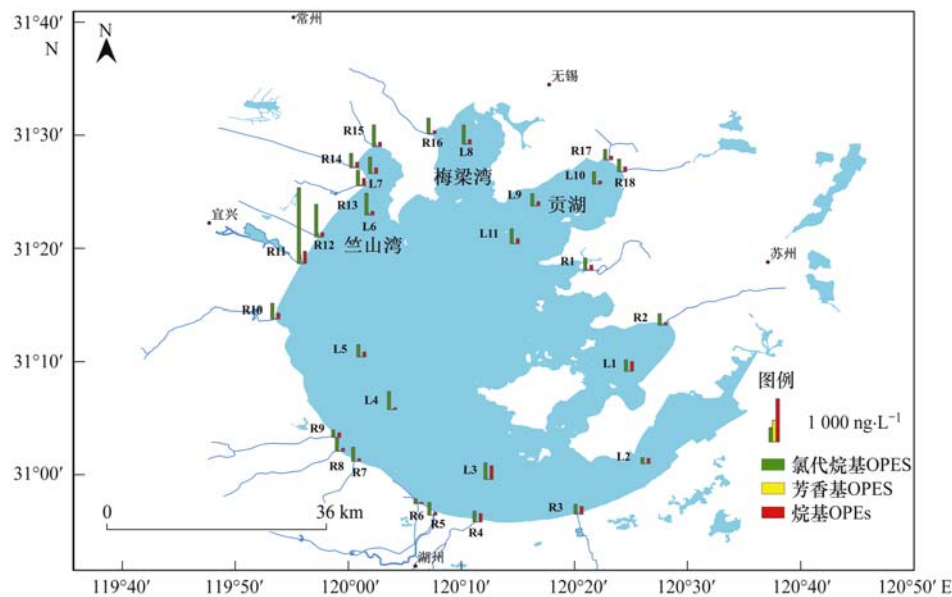


图 1 太湖流域水体有机磷酸酯的空间分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of OPEs in Taihu Lake

1.3 样品分析

使用超高效液相色谱-电喷雾离子源-串联三重四极杆质谱仪(Xevo T-QS, Waters, MA, USA)定量分析水样中的 OPEs,液相色谱柱为 ACQUITY UPLC® BEH C18 (1.7 μm, 50 × 2.1 mm, Waters, MA, USA). 采用多反应监测(multiple reaction monitoring, MRM)与电喷雾正离子源(ESI+)模式. 进样体积为 5 μL,流速 0.4 mL·min<sup>-1</sup>,柱温 40℃,流动相为 0.1% 的甲酸水(A)和乙腈(B),梯度洗脱程序为:0~1 min 2% B, 1.1 min 30% B, 2.5 min 55% B, 6.5 min 65% B, 7.2~8.9 min 98% B, 9~10 min 2% B. 脱溶剂和雾化气体为氮气,脱溶温度和离子源温度分别为 150℃ 和 400℃,碰撞气为氮气,毛细管电压为 0.5 kV.

1.4 质量控制与质量保证

采用内标法定量,线性范围为 0.1~200 μg·L<sup>-1</sup>,各物质标准曲线的 R<sup>2</sup>>0.99. 样品前处理和分析过程中所用玻璃器皿均依次用自来水和去离子水冲洗并烘干,使用前用甲醇和乙腈润洗 3 次,并设置了基质空白和实验室空白. 地表水中 13 种 OPEs 的加标回收率范围为 89.7%~107.9%. 所有水样中均加入 TnBP-d27、TCPP-d18 和 TPrP-d21 校正目标化合物的回收率和基质效应,3 种内标的回收率分别为 (95.3 ± 9.9)%、(101.6 ± 5.9)% 和 (67.4 ± 23.1)%. 各 OPEs 在地表水中的检测限(LOD, S/N = 3)在 0.1~0.7 ng·L<sup>-1</sup>之间,方法定量限(LOQ, S/N = 10)在 0.3~2.5 ng·L<sup>-1</sup>之间.

## 1.5 风险评估

### 1.5.1 生态风险评估

根据欧洲技术指南(European technical guidance document, TGD), 采用商值法(hazard quotient, HQ)评估太湖水体及环湖河流 OPEs 的生态风险, 计算公式如下:

$$HQ = \frac{EC}{PNEC}$$

$$PNEC = L(E)C50/AF$$

式中, EC(environmental concentration)为环境中污染物的测量浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; PNEC(predicted no effect concentration)为对应目标化合物的预测无效应浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; L(E)C50 为供试生物的半数致死(效应)浓度, 由查阅的相关研究获得<sup>[31-33]</sup>; AF(assessment factor)为评价因子, 根据欧盟水框架指令 AF 取 1000. HQ < 0.01 时表明无生态风险, 0.01 ≤ HQ < 0.1 时有较低的生态风险, 0.1 ≤ HQ < 1, 表明有中等生态风险, 当 HQ ≥ 1, 生态风险较高.

### 1.5.2 健康风险评估

太湖作为重要的饮用水水源地, 饮用水的摄入是周边地区人群暴露 OPEs 的可能途径之一, 因此基于饮用水摄入评估 OPEs 对周边居民的健康风险具有重要意义, 具体计算公式如下<sup>[34]</sup>:

$$ADD = c \times IR \times AP/BW$$

式中, ADD 表示饮用水中 OPEs 的单位体重日摄入量[以 bw 计,  $\text{ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ]; c 表示饮用水中某种 OPEs 的浓度( $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ); IR 表示日均总饮水摄入量( $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$ ); AP 表示饮水吸收率, 这里取 100%; BW 为体重(kg)

采用商值法评估饮用水中单个污染物暴露的暴露风险, 公式如下:

$$HQ = ADD/RfD$$

HQ < 1 表明暴露风险较小或忽略不计; 当 HQ > 1 时, 则表明具有潜在的暴露风险.

### 1.6 数据处理

采用 SPSS 22.0 进行统计学分析, 采用 OriginPro 2016 作图. 为满足统计需求, 将低于 LOQ 的 OPEs 的浓度定为 1/2 LOQ, 通过 Shapiro-Wilk 检验判定数据是否符合正态分布, Mann-Whitney 检验验证 OPEs 在太湖水体和环湖河流中的差异性, 采用 Spearman 相关分析和主成分分析(PCA)探讨 OPEs 的来源. ArcGIS 10.2 用于绘制 OPEs 的空间分布.

## 2 结果与讨论

### 2.1 太湖水体及环湖河流中 OPEs 的浓度及组成

太湖水体及环湖河流中 OPEs 的浓度及检出频率如表 2 所示, 除 TPtP、EHDPP 和 TCtP 未检出外, 其余 10 种 OPEs 在所有采样点水样中均有不同程度的检出, TMP、TEHP、TPhP 和 CDPP 的检出率分别为 48.28%、20.69%、44.83% 和 13.79%, 其余 6 种 OPEs 的检出率为 100%, 表明 OPEs 在太湖水体及环湖河流中广泛存在.  $\sum$  OPEs 的浓度范围为 152.5 ~ 2 524  $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , 浓度中值为 519.2  $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ . 较 2016 年检测结果<sup>[35]</sup> (100 ~ 1 700  $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 太湖水体  $\sum$  OPEs 升高, 这说明近年来太湖周边 OPEs 的使用量和排放量逐年增加.

表 2 13 种 OPEs 的检测限(LOD)、定量限(LOQ)、检出率、加标回收率以及检测浓度<sup>1)</sup>

Table 2 Detection limits(LOD), quantitative limits(LOQ), detection rates, recoveries, and concentrations of 13 OPEs

| 目标物         | LOD<br>/ $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ | LOQ<br>/ $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ | 检出频率<br>/% | 浓度/ $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ |       |       |       |
|-------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|
|             |                                          |                                          |            | 最大值                                 | 最小值   | 均值    | 中值    |
| TMP         | 0.3                                      | 0.9                                      | 48.2       | 10.3                                | nd    | 1.4   | nd    |
| TEP         | 0.3                                      | 1                                        | 100        | 328.8                               | 2.1   | 100.4 | 89.3  |
| TPtP        | 0.1                                      | 0.3                                      | —          | nd                                  | nd    | nd    | nd    |
| TiBP        | 0.3                                      | 0.9                                      | 100        | 62.6                                | 11.9  | 33.9  | 29.1  |
| TBEP        | 0.1                                      | 0.4                                      | 100        | 32.2                                | 0.4   | 7.3   | 5.7   |
| TEHP        | 0.2                                      | 0.5                                      | 20.69      | 6                                   | nd    | 0.4   | nd    |
| TCEP        | 0.7                                      | 2.5                                      | 100        | 313.5                               | 43.9  | 138.1 | 131.3 |
| TCPP        | 0.5                                      | 1.5                                      | 100        | 1 753.9                             | 73.7  | 295.1 | 204.6 |
| TDCP        | 0.1                                      | 0.3                                      | 100        | 108.6                               | 6.5   | 27.6  | 22.3  |
| TPhP        | 0.2                                      | 0.7                                      | 44.83      | 11.2                                | nd    | 1.1   | nd    |
| CDPP        | 0.2                                      | 0.7                                      | 13.79      | 1                                   | nd    | 0.1   | nd    |
| EHDPP       | 0.4                                      | 1.1                                      | —          | nd                                  | nd    | nd    | nd    |
| TCtP        | 0.5                                      | 1.5                                      | —          | nd                                  | nd    | nd    | nd    |
| $\sum$ OPEs | —                                        | —                                        | —          | 2 524                               | 152.5 | 605.4 | 519.2 |

1) nd 表示未检出(not detected), “—”表示无有效数据

太湖流域  $\sum$  OPEs 的浓度显著高于我国沿海地区,如青岛海湾( $75.8 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[36]</sup>、渤海入海河流( $300 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[10]</sup>、连云港( $392.1 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )、北部湾水产养殖区( $91.8 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[37]</sup>及珠江入海口( $198.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[6]</sup>,这可能是开阔海域对 OPEs 的稀释作用会影响其在水环境中的浓度水平.但与一些大城市相比,如北京城市河流( $954 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[38]</sup>、上海市地表水( $850.2 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[39]</sup>、成都锦江( $3\,747.9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[40]</sup>和美国纽约( $1\,250 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[12]</sup>,城市地表水中的  $\sum$  OPEs 的浓度要远高于太湖流域,但法国罗纳河水体( $142.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[14]</sup>以及西班牙城市河流( $230 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[41]</sup>的  $\sum$  OPEs 的浓度低于太湖流域,这可能与不同地区使用含 OPEs 产品的多少或生活污水的排放量有关.重庆市万州县农业地区河流中  $\sum$  OPEs 的浓度最低(浓度范围为  $24.5 \sim 68 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ),该样品采集于农业地区,远离市区和工厂,OPEs 的污染较轻<sup>[42]</sup>.检出的 10 种 OPEs 中,TCPP 和 TCEP 是最主要的 OPEs,与海河、渤海入海河流、上海市地表水等水体中检测到的结果吻合,其检出浓度分别为  $73.7 \sim 1\,753.9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $43.9 \sim 313.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ,浓度中值分别为  $204.6 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $131.3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ .TCPP 和 TCEP 主要作为阻燃剂应用于聚氨酯泡沫、纺织品和橡胶中,且 TCPP 由于成本低且阻燃性能好<sup>[22]</sup>,是全球产量最高的 OPEs,太湖

流域周边工业企业密集,TCPP 的使用量大<sup>[27]</sup>.TCEP 在工业混合物 V6(主要应用于汽车内饰和屋内装饰)中作为一种伴生添加剂存在,在太湖流域检测到高浓度的 TCPP 和 TCEP,与周边城市发达的纺织、电子和橡胶等制造业有关.此外,TEP 在太湖流域水体中的浓度也较高,占  $\sum$  OPEs 的  $1.40\% \sim 40.66\%$ .TEP 是工业用品中用量较大的一类烷基磷酸酯,主要用作纤维素、不饱和树脂的增塑剂,且 TEP 的半衰期较长,在环境中比较稳定,因此在水体中有较高占比.

由图 2 可知,氯代烷基磷酸酯是浓度最高的一类 OPEs,  $\sum$  (TCPP + TCEP + TDCP) 的浓度范围为  $124.2 \sim 2\,176 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ,占  $\sum$  OPEs 的  $62.95\% \sim 91.95\%$ ,烷基磷酸酯次之,浓度最低的是芳香基磷酸酯,这与 Shi 等人<sup>[6]</sup>在珠江口水域的研究结果一致.一方面这与三类有机磷酸酯的使用量相关.另一方面,氯代烷基磷酸酯本身化学性质稳定,在各种环境介质中都不易降解,污水处理厂对氯代烷基磷酸酯的去除率较低<sup>[43]</sup>.此外,光降解是地表水中 OPEs 消除的主要原因,而芳香基磷酸酯比烷基磷酸酯和氯代烷基磷酸酯更易光降解,这也是氯代烷基磷酸酯占比最高的原因之一<sup>[44]</sup>.

2.2 太湖水体及环湖河流中 OPEs 的空间分布特征  
OPEs 在太湖流域水体中的空间分布如图 1 所

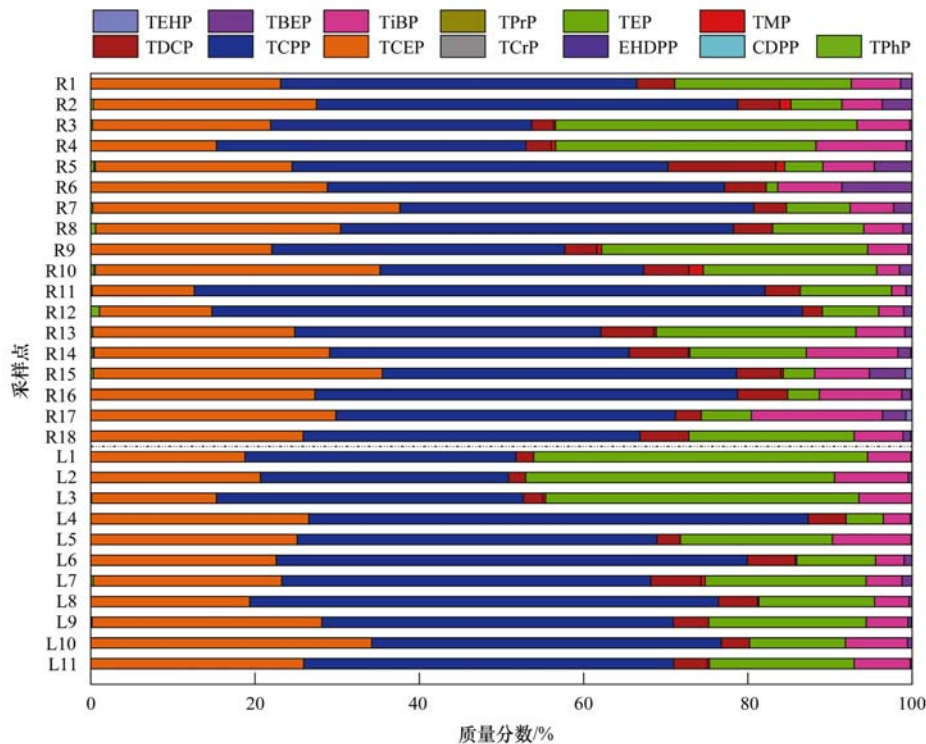


图 2 太湖水体及环湖河流有机磷酸酯的组成特征  
Fig. 2 Composition of OPEs in the surface water of Taihu Lake

示. 18 条环湖河流中,北部和西部沿岸入湖河流是 OPEs 浓度最高的地区,其中位于西北部的 R11(大浦河)OPEs 浓度最高,  $\sum$  OPEs 为  $2\,524\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ,该采样点靠近我国最大的有机磷阻燃剂工厂——雅克科技<sup>[27]</sup>,大量含 OPEs 的工业废水的排放可能是大浦河中 OPEs 浓度较高的原因. 西北部入湖河流上游是宜兴市、常州市和无锡市,这些地区城市化进程快速,工业发达,分布着众多的印刷企业、电子加工企业和纺织企业,有机磷酸酯的使用量较大,进入环境中的 OPEs 多. 此外,竺山湾和梅梁湾水域相对封闭,水与外界湖体交换作用小,水体自净能力差, OPEs 污染较为严重. 南太湖沿岸河流的 OPEs 浓度较西部和北部低,浓度范围为  $152.5\sim530.5\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ,位于太湖南部的 R6(环渚溪)的检出浓度最低. 南太湖周边城市为湖州市,和宜兴、常州市相比,该市经济发展相对较慢,人口较少,工业少,有机磷酸酯的生产和使用量少. 同时,南部湖区湖岸线开阔,为典型的圆弧形岸线,水流交换作用快,水体自净作用强,这也加快了 OPEs 在该区域的迁移. 东部河流采样点位 R1~R3 的  $\sum$  OPEs 浓度范围为  $250.2\sim587.5\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . 采样点位 R2 位于胥江,胥江是太湖的出湖河流之一,河水水质较好,因此胥江江口的稀释作用可能是 R2 点位 OPEs 较低的原因

之一.

通过 Mann-Whitney *U* 检验可知,除 TBEP 外,太湖湖心水体和环湖河流中的各 OPEs 以及  $\sum$  OPEs 的浓度无显著性差异,湖心水体  $\sum$  OPEs 的浓度中值 ( $545.6\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 略高于环湖河流 ( $456.2\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ). 太湖湖心水体 OPEs 主要来源是入湖河流, 11 个分布在太湖湖心的采样点中,位于南太湖的 L3 浓度最高,为  $862.5\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ,且高于南太湖沿岸入湖河流,浓度最低的采样点位于东太湖 (L2,  $313.6\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ). 由图 1 可以看出,湖心水体  $\sum$  OPEs 的差异不明显,这可能与水体的稀释和流动作用有关.

2.3 OPEs 的源解析

剔除检出率较低的 TEHP 和 TDCP,太湖流域水体和环湖河流中 OPEs 的相关性分析如表 3 所示. TCPP、TCEP 和 TDCP 的相关性较强 ( $P<0.01$ ),三者均为氯代烷基磷酸酯,表明其可能来自同一种源,而且氯代烷基磷酸酯在环境中不易降解,在各种环境介质中均有较高的检出浓度,这与 Niu 等<sup>[45]</sup>在海河流域水体中的发现一致. TPhP 和 TBEP、TCEP 以及 TDCP 有较为显著的相关性 ( $P<0.01$ ),表明其可能具有同源性.

表 3 太湖水体及环湖河流中 OPEs 的相关性分析<sup>1)</sup>

|      | TMP    | TEP      | TiBP   | TBEP    | TCEP    | TCPP    | TDCP    | TPhP  |
|------|--------|----------|--------|---------|---------|---------|---------|-------|
| TMP  | 1.000  |          |        |         |         |         |         |       |
| TEP  | 0.222  | 1.000    |        |         |         |         |         |       |
| TiBP | -0.036 | 0.224    | 1.000  |         |         |         |         |       |
| TBEP | 0.185  | -0.476** | -0.088 | 1.000   |         |         |         |       |
| TCEP | -0.001 | 0.022    | 0.177  | 0.236   | 1.000   |         |         |       |
| TCPP | 0.012  | 0.109    | 0.286  | 0.042   | 0.631** | 1.000   |         |       |
| TDCP | 0.345  | -0.004   | 0.101  | 0.423*  | 0.663** | 0.653** | 1.000   |       |
| TPhP | 0.210  | -0.039   | -0.018 | 0.546** | 0.487** | 0.291   | 0.473** | 1.000 |

1) \*\*表示在  $P<0.01$  水平上(双尾)显著相关,\*表示在  $P<0.05$  水平上(双尾)显著相关

为明确太湖流域水体中 OPEs 的可能来源,采用 PCA 做进一步分析,结果如图 3 所示. 分析得到两个主成分(PC1 和 PC2),对总方差的贡献率分别为 40.50% 和 18.66%. 各个 OPEs 对 PC1 都有一定的载荷,主要对应于 TCPP、TCEP 和 TDCP,反映和氯代烷基磷酸酯相关的排放源,这与相关性分析结果一致. 这 3 种物质具有相似的化学和物理特性,常用作家具、电子产品和纺织品中的阻燃剂<sup>[46]</sup>,且污水处理厂对氯代烷基磷酸酯的去除效果不佳,通过污水处理厂出水又排放到自然水体中. 位于太湖西北部地区的 R11、R12 和 R15 等采样点在 PC1 上有较高的得分,太湖西北部上游地区为常州和宜兴,工

业发展迅速,其中电子和纺织印染工厂分布密集<sup>[27]</sup>,因此 PC1 对应于太湖流域电子、纺织印染企业废水排放污染源. PC2 主要对应于 TEP 和 TiBP,二者均为烷基磷酸酯. TiBP 可用于混凝土、涂料中的增塑剂以及液压油中的润滑剂,TEP 可从建筑材料,如绝缘硬泡沫、天花板建材中释放出来<sup>[39]</sup>,在大气中也有较高的检出率和检出浓度<sup>[47]</sup>,因此水体中的 TEP 和 TiBP 可能来自大气沉降,这与建材、交通和航运排放有关<sup>[9]</sup>.

2.4 风险评估

2.4.1 生态风险评估

本研究收集不同水生生物(鱼类、水蚤和藻类)

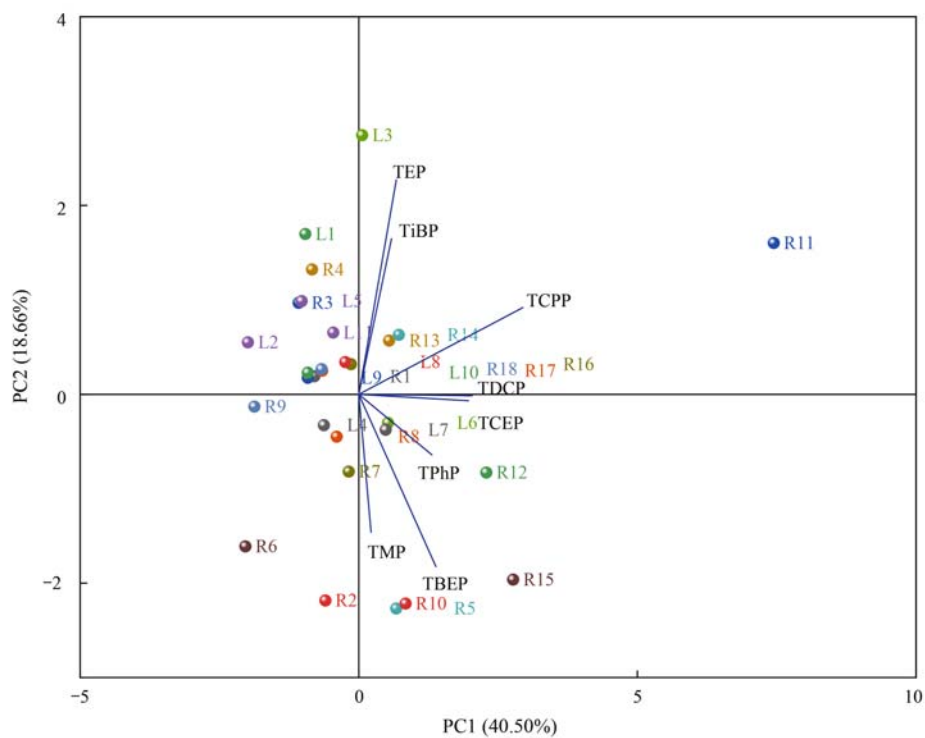


图3 因子载荷与主成分得分  
Fig. 3 Loading and score plot of PCA

的半数致死(效应)浓度(LC50/EC50),选出最为敏感的生物毒性数据,除以AF得到对应OPEs的PNEC,如表4所示.太湖流域水体及环湖河流中OPEs的生态风险评估结果见图4. 10种有检出的OPEs的HQ均小于0.10,生态风险较低.采样点R11、R12、R15、L3、L4、L6和L8的水体中TCPP对水生生物存在较低风险,采样点R5、R11和L6的水体中TDCP对水生生物存在较低风险,低风险区域大都位于太湖西北部工业污染较为严重的区域.本次研究发现,尽管TPhP的检出浓度较低,但因其毒性较大<sup>[46]</sup>,在武夷运河入湖口(R12)存在较低风险.

2.4.2 健康风险评估

本研究评估了基于饮用水摄入的8种OPEs的暴露风险,所需参数DC及BW参考中国人群暴露

参数手册中江苏地区的参数<sup>[48]</sup>,对应的具体数值列于表5,RfD(reference dose)通过查阅文献<sup>[9,49]</sup>取得,列于表4.

如图5所示,单个OPEs在不同地区不同类别人群(年龄和性别)中的暴露风险均小于 $10^{-3}$ ,即太湖流域周边居民通过饮用水日均摄入的OPEs至少比参考剂量低3个数量级,并且8种OPEs的总暴露风险 $\sum HQ$ 均小于 $10^{-2}$ ,可认为OPEs不存在暴露风险.TCEP的暴露风险最大,TMP、TEP、TEHP和TPhP的暴露风险在不同类别人群中相差不大,而TEP、TBEP、TCEP和TCPP的儿童暴露风险要高于成人.TCEP和TCPP以及总暴露风险在成人群体中,男性暴露风险略大于女性,而在儿童群体中,女

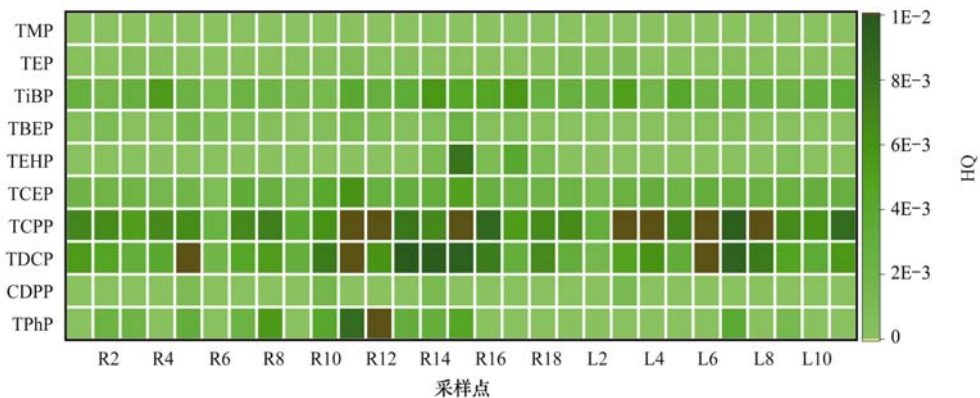


图4 太湖流域地表水中有机磷酸酯的生态风险  
Fig. 4 HQ values of OPEs in the surface water in Taihu Lake

性暴露风险略大于男性。

表 4 有机磷酸酯的半数致死(效应)浓度  
L(E)C50、PNEC 和 RfD 值<sup>1)</sup>

Table 4 Half effect concentration L(E)C50, PNEC,  
and RfD values of organophosphate esters

| 目标<br>化合物 | L(E)C50/mg·L <sup>-1</sup> |      |     | PNEC                | RfD(以 bw 计)              |
|-----------|----------------------------|------|-----|---------------------|--------------------------|
|           | 鱼类                         | 水蚤   | 藻类  | /ng·L <sup>-1</sup> | /ng·(kg·d) <sup>-1</sup> |
| TMP       | 7010                       | na   | na  | 7 010 000           | 10 000                   |
| TEP       | 2140                       | 350  | 900 | 350 000             | 130 000                  |
| TiBP      | 20                         | 11   | 34  | 11 000              | na                       |
| TBEP      | 13                         | 75   | na  | 13 000              | 15 000                   |
| TEHP      | na                         | 0.74 | na  | 740                 | 100 000                  |
| TCEP      | 90                         | 330  | 51  | 51 000              | 22 000                   |
| TCPP      | 30                         | 91   | 45  | 30 000              | 80 000                   |
| TDCP      | 5.1                        | 4.2  | 39  | 4 200               | 20 000                   |
| TPhP      | 0.7                        | 1    | 0.5 | 500                 | 70 000                   |
| CDPP      | na                         | na   | 0.6 | 600                 | na                       |

1) na 表示文献[31~33]中查无可用的 L(E)C50 或文献[4,49]中查无可用的 RfD

表 5 不同人群日均总饮水摄入量及体重参数<sup>1)</sup>

Table 5 IR and BW in different groups

| 项目                   | 成人    |       | 儿童    |       |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|
|                      | 男性    | 女性    | 男童    | 女童    |
| IR/L·d <sup>-1</sup> | 2.591 | 1.994 | 0.877 | 0.986 |
| BW/kg                | 69.2  | 58.2  | 20.8  | 20.2  |

1)成人和儿童数据分别引自中国人群暴露参数手册的成人卷和儿童卷

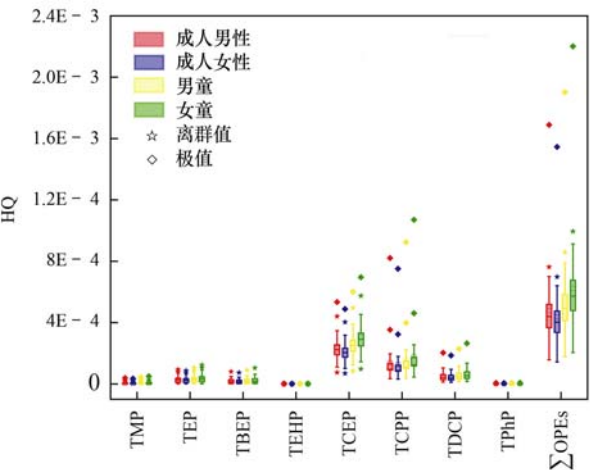


图 5 太湖流域不同人群基于饮用水摄入的 OPEs 暴露风险

Fig. 5 Exposure risks of OPEs among different people  
based on water intake in Taihu Lake

3 结论

(1)环太湖河流及湖体中检测到不同浓度的 OPEs,总检出浓度(∑OPEs)范围为 152.5~2 524 ng·L<sup>-1</sup>,浓度中值为 519.2 ng·L<sup>-1</sup>.其中检出浓度最高的 OPEs 是 TCPP,浓度中值为 204.6 ng·L<sup>-1</sup>,其次为 TCEP(131.3 ng·L<sup>-1</sup>)和 TEP(89.3 ng·L<sup>-1</sup>).OPEs 在太湖北部和西部的检出率和检出浓度较高,

OPEs 的污染程度与当地经济、工业发展程度相关。

(2)相关性分析结果表明,3 种氯代烷基磷酸酯 TCPP、TCEP 和 TDCP 显著相关,具有同源性.源解析判别出太湖流域水体中 OPEs 的主要来源与电子、纺织印染企业废水的排放及建材、交通和航运排放有关。

(3)对太湖流域 OPEs 进行生态风险评估,10 种 OPEs 的 HQ 均小于 0.1,8 个点位检出的 TCPP、TDCP 和 TPhP 对水生生态环境存在较低风险,但个别 OPEs 毒性较强,其对水生生物的毒性效应和复合污染仍需长期监控。

(4)OPEs 对人体健康风险评估表明,太湖流域周边居民不存在基于饮用水摄入的 OPEs 暴露风险,但人体 OPEs 的暴露途径还包括呼吸摄入、饮食摄入和皮肤接触等,因此仍需进一步完善居民 OPEs 暴露风险的评估工作。

参考文献:

[1] Wang Y, Wu X W, Zhang Q N, *et al.* Organophosphate esters in sediment cores from coastal Laizhou Bay of the Bohai Sea, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, **607-608**: 103-108.

[2] Ding J J, Deng T Q, Xu M M, *et al.* Residuals of organophosphate esters in foodstuffs and implication for human exposure[J]. Environmental Pollution, 2018, **233**: 986-991.

[3] Liao C Y, Kim U J, Kannan K. Occurrence and distribution of organophosphate esters in sediment from northern Chinese coastal waters[J]. Science of the Total Environment, 2020, **704**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135328.

[4] Luo Q, Gu L Y, Wu Z P, *et al.* Distribution, source apportionment and ecological risks of organophosphate esters in surface sediments from the Liao River, Northeast China [J]. Chemosphere, 2020, **250**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126297.

[5] Greaves A K, Letcher R J. A review of organophosphate esters in the environment from biological effects to distribution and fate [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2017, **98**(1): 2-7.

[6] Shi Y F, Zhang Y, Du Y M, *et al.* Occurrence, composition and biological risk of Organophosphate Esters (OPEs) in water of the Pearl River Estuary, South China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(13): 14852-14862.

[7] Qi Y J, Liu X, Wang Z, *et al.* Comparison of receptor models for source identification of organophosphate esters in major inflow rivers to the Bohai Sea, China [J]. Environmental Pollution, 2020, **265**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114970.

[8] Sun Y X, De Silva A O, St Pierre K A, *et al.* Glacial melt inputs of organophosphate ester flame retardants to the largest high arctic lake [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **54**(5): 2734-2743.

[9] Xing L Q, Tao M, Zhang Q, *et al.* Occurrence, spatial distribution and risk assessment of organophosphate esters in surface water from the lower Yangtze River Basin [J]. Science of the Total Environment, 2020, **734**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139380.

[10] Wang R M, Tang J H, Xie Z Y, *et al.* Occurrence and spatial

- distribution of organophosphate ester flame retardants and plasticizers in 40 rivers draining into the Bohai Sea, north China [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **198**: 172-178.
- [11] Wang Y, Hou M M, Zhang Q N, *et al.* Organophosphorus Flame retardants and plasticizers in building and decoration materials and their potential burdens in newly decorated houses in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51** (19): 10991-10999.
- [12] Li W H, Wang Y, Kannan K. Occurrence, distribution and human exposure to 20 organophosphate esters in air, soil, pine needles, river water, and dust samples collected around an airport in New York state, United States [J]. *Environment International*, 2019, **131**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105054.
- [13] He J H, Li J F, Ma L Y, *et al.* Large-scale distribution of organophosphate esters (flame retardants and plasticizers) in soil from residential area across China: implications for current level [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **697**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133997.
- [14] Schmidt N, Castro-Jiménez J, Fauvelle V, *et al.* Occurrence of organic plastic additives in surface waters of the Rhône River (France) [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113637.
- [15] Venier M, Dove A, Romanak K, *et al.* Flame retardants and legacy chemicals in Great Lakes' water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48** (16): 9563-9572.
- [16] Wang X L, Zhong W J, Xiao B W, *et al.* Bioavailability and biomagnification of organophosphate esters in the food web of Taihu Lake, China: impacts of chemical properties and metabolism [J]. *Environment International*, 2019, **125**: 25-32.
- [17] Zhao L M, Jian K, Su H J, *et al.* Organophosphate esters (OPEs) in Chinese foodstuffs: dietary intake estimation via a market basket method, and suspect screening using high-resolution mass spectrometry [J]. *Environment International*, 2019, **128**: 343-352.
- [18] Liu L Y, He K, Hites R A, *et al.* Hair and nails as noninvasive biomarkers of human exposure to brominated and organophosphate flame retardants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50** (6): 3065-3073.
- [19] Kim J W, Isobe T, Muto M, *et al.* Organophosphorus flame retardants (PFRs) in human breast milk from several Asian countries [J]. *Chemosphere*, 2014, **116**: 91-97.
- [20] He C, Toms L L, Thai P, *et al.* Urinary metabolites of organophosphate esters: concentrations and age trends in Australian children [J]. *Environment International*, 2018, **111**: 124-130.
- [21] Wang Q W, Lam J C W, Man Y C, *et al.* Bioconcentration, metabolism and neurotoxicity of the organophosphorus flame retardant 1,3-dichloro 2-propyl phosphate (TDCPP) to zebrafish [J]. *Aquatic Toxicology*, 2015, **158**: 108-115.
- [22] van der Veen I, de Boer J. Phosphorus flame retardants: properties, production, environmental occurrence, toxicity and analysis [J]. *Chemosphere*, 2012, **88** (10): 1119-1153.
- [23] Blum A, Behl M, Birnbaum L S, *et al.* Organophosphate ester flame retardants: are they a regrettable substitution for polybrominated diphenyl ethers? [J]. *Environmental Science & Technology Letter*, 2019, **6** (11): 638-649.
- [24] Kim U J, Oh J K, Kannan K. Occurrence, removal, and environmental emission of organophosphate flame retardants/plasticizers in a wastewater treatment plant in New York State [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51** (14): 7872-7880.
- [25] Li Y, Yao C, Zheng Q X, *et al.* Occurrence and ecological implications of organophosphate triesters and diester degradation products in wastewater, river water, and tap water [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **259**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113810.
- [26] 王晓伟, 刘景富, 阴永光. 有机磷酸酯阻燃剂污染现状与研究进展 [J]. *化学进展*, 2010, **22** (10): 1983-1992.
- Wang X W, Liu J F, Yin Y G. The pollution status and research progress on organophosphate ester flame retardants [J]. *Progress in Chemistry*, 2010, **22** (10): 1983-1992.
- [27] Wang X L, Zhu L Y, Zhong W J, *et al.* Partition and source identification of organophosphate esters in the water and sediment of Taihu Lake, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **360**: 43-50.
- [28] Chen M H, Liu Y H, Guo R X, *et al.* Spatiotemporal distribution and risk assessment of organophosphate esters in sediment from Taihu Lake, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25** (14): 13787-13795.
- [29] Cao S X, Zeng X Y, Song H, *et al.* Levels and distributions of organophosphate flame retardants and plasticizers in sediment from Taihu Lake, China [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, **31** (7): 1478-1484.
- [30] 吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 等. 太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (12): 5438-5447.
- Lü J P, Zhang Z F, Liu Y, *et al.* Distribution characteristics and source identification of organophosphate esters in waters of key areas of Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (12): 5438-5447.
- [31] Hanna P J. Effects on spermatogenesis in the guppy *Poecilia reticulata* by prolonged exposure to trimethylphosphate [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1982, **28** (1): 28-32.
- [32] Wong P T S, Chau Y K. Structure-toxicity of triaryl phosphates in freshwater algae [J]. *Science of the Total Environment*, 1984, **32** (2): 157-165.
- [33] Verbruggen E M J, Rila J P, Traas T P, *et al.* Environmental Risk Limits for several phosphate esters, with possible application as flame retardant [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 2005.
- [34] Ding J J, Shen X L, Liu W P, *et al.* Occurrence and risk assessment of organophosphate esters in drinking water from Eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **538**: 959-965.
- [35] Liu Y H, Song N H, Guo R X, *et al.* Occurrence and partitioning behavior of organophosphate esters in surface water and sediment of a shallow Chinese freshwater lake (Taihu Lake): implication for eco-toxicity risk [J]. *Chemosphere*, 2018, **202**: 255-263.
- [36] Hu M Y, Li J, Zhang B B, *et al.* Regional distribution of halogenated organophosphate flame retardants in seawater samples from three coastal cities in China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **86** (1-2): 569-574.
- [37] Shi Y L, Gao L H, Li W H, *et al.* Occurrence, distribution and seasonal variation of organophosphate flame retardants and plasticizers in urban surface water in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **209**: 1-10.
- [38] 曾维斌. 北部湾海水养殖区有机磷酸酯污染特征及海产品食用风险 [D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- Zeng W B. Occurrence of organophosphorus esters and risk

- assessment of seafood in mariculture areas of the Beihai Gulf [D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [39] Zhang Z Y, Shao H Y, Wu M H, *et al.* Occurrence, distribution, and potential sources of organophosphate esters in urban and rural surface water in Shanghai, China[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2019, **77**(1): 115-126.
- [40] 吴迪, 印红玲, 李世平, 等. 成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1245-1251.
- Wu D, Yin H L, Li S P, *et al.* Pollution characteristics of OPEs in the surface water and sediment of the Jinjiang river in Chengdu city[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1245-1251.
- [41] Cristale J, García Vázquez A, Barata C, *et al.* Priority and emerging flame retardants in rivers: occurrence in water and sediment, *Daphnia magna* toxicity and risk assessment [J]. Environment International, 2013, **59**: 232-243.
- [42] He M J, Lu J F, Wei S Q. Organophosphate esters in biota, water, and air from an agricultural area of Chongqing, western China: concentrations, composition profiles, partition and human exposure[J]. Environmental Pollution, 2019, **244**: 388-397.
- [43] Xu L, Hu Q P, Liu J, *et al.* Occurrence of organophosphate esters and their diesters degradation products in industrial wastewater treatment plants in China: implication for the usage and potential degradation during production processing [J]. Environmental Pollution, 2019, **250**: 559-566.
- [44] Cristale J, Dantas R F, De Luca A, *et al.* Role of oxygen and DOM in sunlight induced photodegradation of organophosphorous flame retardants in river water [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **323**: 242-249.
- [45] Niu Z G, Zhang Z Z, Li J F, *et al.* Threats of Organophosphate Esters (OPEs) in surface water to ecological system in Haihe River of China based on species sensitivity distribution model and assessment factor model [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(11): 10854-10866.
- [46] Wei G L, Li D Q, Zhuo M N, *et al.* Organophosphorus flame retardants and plasticizers: sources, occurrence, toxicity and human exposure[J]. Environmental Pollution, 2015, **196**: 29-46.
- [47] Wang G W, Shi H H, Du Z K, *et al.* Bioaccumulation mechanism of organophosphate esters in adult zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Environmental Pollution, 2017, **229**: 177-187.
- [48] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [49] Li J F, Zhang Z Z, Ma L Y, *et al.* Implementation of USEPA RfD and SFO for improved risk assessment of organophosphate esters (organophosphate flame retardants and plasticizers) [J]. Environment International, 2018, **114**: 21-26.

## 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)    |