J. Lake Sci.(湖泊科学),2025,**37**(6):2050-2065
DOI 10.18307/2025.0625
© 2025 by *Journal of Lake Sciences*

基于多介质暴露与危害风险评估的浅水湖泊中优控有机微污染物筛查——以太湖为例*

林梓涛[1],尤　为[2],刘建超[1**],陆光华[1],侯　俊[1]
(1:河海大学环境学院,浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室,南京 210098)
(2:南京水务集团有限公司,南京 210009)

摘　要: 有机微污染物的治理已成为全球高度关注的环境问题,结合流域水环境特点,建立有效的筛选方法识别高风险污染物,是实现有机微污染物有效控制的关键。本研究以浅水湖泊(太湖)为关注区域,以水和沉积物中有机微污染物浓度和毒理数据为基础,开发了基于暴露风险和危害风险为指标组别的优控污染物筛选方法,通过 2/3 累计秩法对检出的 123 种污染物进行优控评分,氟胺氰菊酯、氯菊酯和磷酸三苯酯等 33 种污染物确定为优控对象,其中 31 种污染物是通过水相数据评估确定,炔雌醇和全氟十二酸是结合沉积物暴露风险评估数据后的增补对象,沉积物介质中污染物暴露数据是优控体系评分的重要补充。在 33 种优控物质中有 17 种物质在不同国家的管控清单中出现,16 种物质未受足够重视。优控物质筛选体系的不确定性主要源于部分污染物毒性数据或相关阈值的缺失,以及监测数据的时效性和同步性不足,建议后期重点开展有机微污染物监测标准建立、毒性数据完善等工作。本研究可以为全国河湖区域的有机微污染物有效控制工作提供支撑。
关键词: 太湖;有机微污染物;暴露风险;危害风险;优控筛查方法

A proposed multi-media exposure and risk assessment method for screening organic micropollutants in shallow lakes—A case study of Lake Taihu*

Lin Zitao[1], You Wei[2], Liu Jianchao[1**], Lu Guanghua[1] & Hou Jun[1]
(1: *Key Laboratory for Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes*, *Ministry of Education*, *College of Environment*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *P. R. China*)
(2: *Nanjing Water Group Co.*, *Ltd*, *Nanjing* 210009, *P. R. China*)

Abstract: The treatment of organic micropollutants has become a globally concerned environmental issue. Integrating the watershed characteristics and establishing an effective screening method to identify high-risk contaminants is key to achieving effective control of organic micropollutants. In this study, we focused on the shallow lake area (Lake Taihu), and utilizing the concentration and toxicological data of contaminants in water and sediment, we developed a screening method for preferential control of organic micropollutants based on exposure risk and hazard risk indicators. Using the 2/3 cumulative rank method, 123 aqueous phase contaminants were scored, and 33 contaminants, including fluvalinate, permethrin and triphenyl phosphate etc, were identified as priority contaminants. Among them, 31 substances were determined through aqueous phase data assessment, while ethynylestradiol and perfluorododecanoic acid were added as supplementary targets following the incorporation of sediment exposure risk assessment data, which shows that exposure data of contaminants in sediments serves as an essential supplement to the scoring system for priority control frameworks. Among the selected 33 priority contaminants, 17 substances appear in various control lists of different countries, but 16 substances have not received sufficient attention. The uncertainty in this paper mainly stems from the lack of toxicity data for some contaminants and the acquisition of related thresholds, as well as insufficient timeliness and synchronization of monitoring data. It is recommended that future work should focus on establishing monitoring standards for organic micropollutants and

* 2025-01-06 收稿;2025-03-20 收修改稿。
国家自然科学基金项目(521709063,U23A2058)、江苏省自然科学基金项目(BK20221505)和中央高校基本科研业务费专项(B230201058)联合资助。

improving toxicity data. This study can provide support for the effective control of emerging contaminants in river and lake regions nationwide.

Keywords: Lake Taihu; organic micropollutants; exposure risk; hazard risk; priority contaminant screening method

在过去几十年中,人工合成的化学品的生产量大幅增加,目前登记生产与使用的化学品已超过 35 万种,但现有的废水处理工艺的去除效率有限,导致水生环境的化学污染日益严重。大量有机化学品因浓度低被称之为有机微污染物,痕量水平从 ng/L 到 μg/L 不等[1]。有机微污染物种类繁多,来源广泛,除了传统的有机污染物(如多环芳烃、部分农药等),还包含大量隐蔽性较强、风险不明和尚未被有效监管的新型污染物(如全氟化合物、药品及个人护理品等)。由于有机微污染物大多具有持久性、生物积累性和生物毒性,长期接触可能会对生态环境或人类健康构成较大风险[2]。近年来,我国对有机微污染物的治理愈发重视,《中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》明确了治理新污染物的目标,《国民经济和社会发展"十四五"规划和 2035 年远景目标纲要》提出"重视新污染物治理,健全有毒有害化学物质环境风险管理体制"的任务要求,《新污染物治理行动方案》和《重点管控新污染物清单(2023 版)》相继发布。

针对有机微污染物复合污染的环境现状,基于监测数据开发有效的筛评方法并制定优控污染物清单,是解决有机微污染物治理难题的关键。目前,美国环保署根据污染物对人体健康的风险、暴露水平及检出频率,提出了水环境优先污染物清单(129 种)和"饮用水污染物候选名单(CCL)",欧盟(EU)基于监测和模型的优先设置方案(COMMPS),利用监测浓度、暴露得分、效应评估开展污染物风险评估和优先排序,确定了 45 种优控污染物[3],并提出了污染物观察清单[4]。中国最早于 1991 年基于污染物的毒性和排放量以及环境监测数据,通过专家评判法确定了优控污染物清单[5]。此后有学者采取综合评分等方法在不同流域和环境下制定了区域性优控污染物清单[6-8],但这些研究多针对重金属、多氯联苯、有机氯农药等传统污染物,对新型有机污染物的关注有限。生态环境部于 2021 年发布了《优先评估化学物质筛选技术导则》,各级生态环境主管部门及企事业单位可将该标准作为确定优先评估化学物质的技术依据。

有机微污染物优控筛查研究已有一些成果,基于危害指数和暴露指数建立的优控污染物多指标筛选方法,对我国地表水多类新型有机污染物进行优先排序[9],得到了广泛关注。目前,筛选优控污染物的方法主要有综合评分法、潜在危害指数法、风险排序法、密切值法、Hasse 图解法、模糊评价法、层次分析法等[10]。随着技术手段的不断进步,一些新的技术手段被开发用于协助筛选,如定量一结构活性关系(QSAR)、不良结果途径(AOP)等,它们可以为数据有限的污染物获取毒性终点(如胚胎发育毒性、内分泌干扰效应等),提高筛选效率[11]。但以上方法在人类健康风险耦合、污染物多介质赋存转换、指标权重分配及不确定性分析方面仍存在一定不足。此外,我国地域广袤,区域水环境特征和污染物污染类别差异明显,污染物多介质分配特征迥异,结合区域水环境特征改进筛选方法是精准筛查优控污染物的关键[12]。

太湖是中国第三大淡水湖,面积为 2338 km^2,服务人口超过 6000 万人,是中国长三角地区重要的饮用水水源地。太湖流域工农业发达,人类干扰强度高[13],有机微污染物问题突出。2022 年印发的《太湖流域水环境综合治理总体方案》中提出"探索开展新污染物、生物毒性综合监测试点",保障流域饮用水安全,但此工作目前处于初级阶段,有机微污染物的官方监测数据匮乏。过去在太湖流域优控污染物的筛选主要针对水中单一种类物质,如全氟化合物[14]和酚类物质[15],而对多种类有机污染物在多介质中的优控筛查存在不足。本研究以太湖为研究区域,通过文献获取多种有机微污染物暴露数据,基于太湖流域特点、污染物暴露数据和危害风险数据,提出一种多指标多介质的优控污染物筛查方法。通过暴露风险和危害风险数据进行指标评分和等权重计算,划分污染物优先级类别,确定高优先级即为优控污染物清单,为湖泊有机微污染物监测试点及重点治理工作提供技术支撑。

1 方法

1.1 数据收集与处理

1.1.1 污染物暴露数据　本文在 Web of Science 和中国知网两个数据库中以"太湖+各污染物类别"或"Taihu Lake + various micropollutants"的关键词组合方式查找相关文献,收集了 2015－2024 年发表的关于太

湖流域有机微污染物的赋存研究数据,包括浓度和检出率,同时剔除监测方法不明确、数据残缺的文献。对于同一种污染物可参考文献>1 篇时,综合考察样品采集时间和采样个数,采样时间较近、采样个数较多的文献优先选择。在采样时间与采样个数均相当的情况下,综合考量采样点位空间分布的有效性,研究区域布点均匀、分布全面的优先考虑(选择详情见附表 A Table S1 第 K 和第 Q 列)。污染物数据的使用优先级为平均值>中位值>最大值(或其他)。此次评估涵盖的有机微污染物种类为 8 类,包括农药、药物及个人护理品(含抗生素)、全氟化合物、双酚类似物、邻苯二甲酸酯、多环芳烃、有机磷酸酯和类固醇激素。共 123 种污染物,其中农药(Pesticides)21 种[16-18]、双酚类似物(BPs)7 种[19-20]、有机磷酸酯(OPEs)13 种[21-24]、邻苯二甲酸酯(PAEs)7 种[24-28]、多环芳烃(PAHs)15 种[29-31]、全氟化合物(PFAS)9 种[32-34]、药品及个人护理品 PPCPs(含抗生素类)45 种[18,35-39]和类固醇激素(SEs)6 种[36,40-41]。同时包括水体和沉积物数据的污染物有 78 种(采样时间、点位数量等具体信息见附表 A Table S1)。

1.1.2 生物积累性和持久性　污染物持久性通过生物降解系数(BioWIN)来衡量,该数据取自美国环保署的 EPI Suite 软件,BioWIN 值越小,污染物的持久性越强[7]。生物积累性用正辛醇/水分配系数(K_{OW})来评估,本研究使用 pH=7 时的正辛醇/水分配系数($logD_{OW}$)[9],用于校正化学形态对生物累积性的影响,数据取自 SciFinder 数据库。

1.1.3 水生态风险熵　本研究采用欧盟技术导则中的风险熵值法(RQ)作为量化表征的手段评估水体中有机微污染物对水生生物系统造成的负面影响[42]。计算公式为:

$$RQ_{water} = MEC/PNEC_{water} \tag{1}$$

式中,RQ 为污染物的生态风险熵,无量纲;MEC 为水环境中污染物的实测浓度(ng/L);$PNEC_{water}$ 为污染物在水体的预测无效应浓度(ng/L)。

为了更好地反映污染物在生态系统水平的负面效应,PNEC 优先采用基于一定数量水生生物毒性数据通过拟合物种敏感度分布曲线(SSD)方法获得的 HC_5(附表 A Table S2),降低污染物单一物种毒性数据的不确定性[43]。在无足够数据支撑/模型拟合效果差的情况下,使用单因子评价法计算 PNEC(附表 A Table S3)。相关公式包括:

$$PNEC_{water} = HC_5/AF \tag{2}$$

$$PNEC_{water} = NOEC(LOEC)/AF \tag{3}$$

$$PNEC_{water} = EC_{50}(LC_{50})/AF \tag{4}$$

式中,NOEC 为最大无观察效应浓度,LOEC 为最低观察效应浓度,EC_{50} 为半数最大效应浓度,LC_{50} 为半致死浓度,AF 为评估因子。$PNEC_{water}$ 计算结果见附表 A Table S4 第 I 列。

水生生物毒性数据主要采自美国环保署 ECOTOX 数据库。参考相关文献与《淡水生物水质基准推导技术指南》(HJ 831－2022)相关规范,在计算过程中秉持的具体原则见附件一。

1.1.4 人类健康风险　在人类健康风险评价的过程中,通常以个体在不同暴露途径下接触污染物时所存在的危害水平为评价目标。据统计,太湖流域周边居民的饮用水量(2.18 L/d)和水产品摄入量(0.0812 kg/d)要大于全国平均水平(1.85 L/d vs 0.0301 kg/d)[44],因此本文选用这两种具有代表性暴露途径的 $PNEC_{hum}$ 表征有机微污染物的人体健康效应,并通过计算 RQ_{hum} 进行定量化表征[9]。公式如下:

$$PNEC_{hum} = \frac{1000 \times ADI \times BW \times AT}{(IngR_{DW} + BCF \times IngR_{F}) \times EF \times ED} \tag{5}$$

$$RQ_{hum} = MEC/PNEN_{hum} \tag{6}$$

式中, 1000 为转换因子;BW 是体重,中国成年人平均体重是 63 kg;AT 为成年人平均暴露时间,定为 10950 d;$IngR_{DW}$ 指成人饮水摄取量,定为 2 L/(人·d);BCF 是鱼类生物富集系数,从美国环保署 Chemistry Dashboard 数据库获得[45](附表 A Table S1 第 V 列);$lngR_F$ 是人均水产品消费量,用于估算食用水产品可能造成的健康风险,本研究取 92.6 g/d[46];EF 为暴露频率,取 350 d/a;ED 为暴露时间,取 30 年;ADI 为每日可允许摄入量,数据来源于国标、数据库、文献或模型模拟(附表 A Table S1 第 T 列)。

1.1.5 沉积物数据应用　太湖是典型的浅水湖泊,水流和风浪扰动易导致表面沉积物的悬浮,导致底泥内源污染物释放,给上覆水体和水生生物带来不利影响[47]。因此,浅水湖泊应重视沉积物中污染物释放引起的

潜在生态风险。

1)孔隙水暴露浓度。沉积物孔隙水中有机微污染物暴露浓度 C_{pore} 依据相平衡分配法由公式(7)转化得到[48]。

$$C_{pore} = \frac{C_{sediment}}{f_{OC} \times K_{OC}} \tag{7}$$

式中, K_{OC} 为污染物的有机碳归一化沉积物/水分配系数(L/kg); f_{OC} 为有机碳在沉积物中的含量(%)。

2)沉积物生态风险。沉积物中有机碳含量等特性会影响有机微污染物生物有效性,但污染物对沉积环境中生物的毒性数据比较匮乏[48],尚不能直接评估污染物在沉积物中的生物毒害效应。在明确沉积物赋存数据的前提下,本研究根据相平衡分配的原理利用 $PNEC_{water}$ 推算出 $PNEC_{sediment}$[39,49]:

$$RQ_{sediment} = C_{sediment} / PNEC_{sediment} \tag{8}$$

$$PNEC_{sediment} = PNEC_{water} \times K_d \tag{9}$$

$$K_d = f_{OC} \times K_{OC} \tag{10}$$

$$\lg K_{OC} = \lg K_{OW} - 0.456 \tag{11}$$

式中, K_d 是沉积物-水分配系数,f_{OC} 取 3%[39]。计算结果具体见附表 A Table S5 第 O 列。

1.2 评估流程

1)指标归类:暴露浓度与检出率归为暴露风险,持久性、生物积累性、生态风险和人类健康风险归为危害风险。

2)评分:借鉴 US EPA 用于确定污染物毒性得分的需通报量法[10],依据等比级数对各项指标进行五级划分,并通过 2/3 累计秩法进行赋分,总分为 100 分(表 1)。暴露风险、生物积累性、生态风险和人类健康风险属于正向计分(即数值所属等比区间越大,区间等级越高,得分越高;数值小于 0,得分为 1.73,不进行等比划分),物质持久性属于负向计分(即数值所属等比区间越大,区间等级越低,得分越低;数值小于 0,得分为 100)。最终暴露风险得分(EP)是由暴露浓度与检出率得分取算术平均值得到。危险风险得分(HP)是由物质持久性(P)、生物积累性(B)、生态风险(RQ_{eco})和人类健康效应(RQ_{hum})四项指标相加得到。

3)等级划分:如前人多项研究所述[6-7,50-51],为避免主观判断带来的差异,在计算中各项指标都被赋予相等的权重,最终得分等于暴露风险得分(EP)与危害风险得分(HP)之和。排序借鉴 Huang 等的方法[52],计算总分组的四分位数,最大值与较大四分位数(由大到小排序后第 25% 的分值)之间被列为高优先级污染物,即优控污染物。

4)对于同时具有水体与沉积相数据的有机微污染物,将沉积相有机微污染物单独列出,分开评比,评分规则如下:①除暴露风险和危害风险中的生态风险指标发生变化外,其他指标值、评分方法、等权重原则和划分等级等不变。②将沉积物孔隙水有机微污染物暴露浓度和检出率并入暴露风险,分别赋分,取算术平均值。③生态风险取水体与沉积物风险中的较大值,然后计算得分,计入 HP。

$$RQ_{eco} = \max\{RQ_{water}, RQ_{sediment}\} \tag{12}$$

表 1 分级和得分的对应关系[6]

Tab. 1 Correspondence between grade and score[6]

区间等级	秩排序	累计秩排序(COR)	(2/3)^(COR)	得分
1	0	0	1.0000	100.00
2	1	1	0.6667	66.67
3	2	3	0.2963	29.63
4	3	6	0.0878	8.78
5	4	10	0.0173	1.73

1.3 不确定性分析

本研究评分体系的不确定性主要来自两部分:监测数据有效性与风险评价过程中参数有效性。

关于污染物的监测数据时空有效性,最直观的两个指标是采样时间和点位布设量。采样时间参考国内

外的经验、环境影响评价技术导则和相关文献[53],同时兼顾化学品使用迭代时效性,认为近 5 年的监测数据具有一定参考价值。采样点位根据《水生态环境质量监测与评价技术指南》,对于湖泊面积大于 2000 km^2(太湖流域面积为 2338 km^2),应布设 30~50 个点位。结合太湖有机微污染物文献收集的情况,以采样时间和点位布设量为指标,将拥有水相监测数据的 123 种污染物与沉积相的 78 种污染物分别进行类别划分,具体分为以下四类:Ⅰ. 采样时间以 2024 年往前 5 年,即 2019 年为界,采样时间晚于 2019 年,点位布设量≥30;Ⅱ. 采样时间晚于 2019 年,但点位布设量<30;Ⅲ. 采样时间早于 2019 年,但点位布设量≥30;Ⅳ. 采样时间早于 2019 年,点位布设量<30。

关于风险评价过程中参数有效性则采取定性分析的方法,对参数 ADI 的来源和 PNEC 的获取方式分别进行不确定类别划分,划分为 4 个类别,类别 1 至类别 4 不确定性逐渐增加。具体可分为以下几种情况:

1)若使用物种敏感度曲线法获取 HC_5,当有效的慢性毒性数据足够拟合时,不确定性类别为 1。在计算人类健康风险时,若 ADI 出自于国标、文献或数据库,不确定类别为 1。

2)在使用物种敏感度曲线法时使用了急性毒性数据作为补充,不确定性类别为 2。ADI 是基于模型预测得到,不确定性类别为 2。

3)若使用单因子评价法计算 PNEC,数据来源于文献或 ECOTOX,且数据由前人实验确定,则不确定性类别为 3,若是基于 ECOSAR 预测的非实验值,则不确定性类别为 4。

若一种污染物同时属于两种不确定类别,以高类别为主。每种污染物的不确定性类别见附表 A Table S4 相关列。

2 结果与讨论

2.1 太湖流域有机微污染物赋存情况

根据前期文献收集汇总,太湖水体中共搜集到 123 种有机微污染物的有效暴露数据,其中有 78 种有机微污染物同时具备沉积物介质的污染数据。图 1 展示了不同类别有机微污染物的浓度对数值,表 2 整理汇总不同类别有机微污染物的时空分布和样品采集信息。从污染水平来看,在太湖水体和沉积物中不同种类有机微污染物的赋存浓度均呈现较大差距(Kruskal-Wallis 检验, $P<0.05$),其中多环芳烃和邻苯二甲酸酯类显著高于其他类别(Mann-Whitney 检验,$P<0.05$)。太湖水体中多环芳烃和邻苯二甲酸酯类污染物浓度范围分别在 3.1~430 和 2.9~490 ng/L 之间,而沉积物中的含量分别在 5.04~60.88 和 9.82~7410 ng/g 之间。药物及个人护理品整体浓度较低(Mann-Whitney 检验,$P<0.05$),水体和沉积物范围分别在 0.04~22 ng/L 和 0.006~127 ng/g 之间。

从时间污染特征来看,有机微污染物污染负荷大多呈现春冬季>夏秋季、枯水期>丰水期的规律,春冬季有机微污染物浓度是夏季的 3~5 倍,这主要与工业生产、降水、气温等因素息息相关。太湖流域化纤、纺织等工业发达,春季经济活动旺盛,且降水少、气温低,水动力条件及微生物的降解能力减弱,这一定程度上导致有机微污染物赋存浓度高。夏季降水多、气温高,雨水稀释效应明显,微生物活性增强,污染物降解效率高[38],再加上充足的光照条件,有机微污染物衰减速度加快,有机微污染物水体浓度相对降低[54]。从空间污染特征来看,污染水平从西北向东南递减,太湖西北部的竺山湾、梅梁湾和贡湖湾是有机微污染物污染重灾区。太湖西北部工业发达,人口密度大,入湖河流携带大量有机微污染物进入太湖,河水中双酚类和有机磷酸酯类污染物浓度是太湖水体的数倍乃至数十倍[20]。此外,太湖西南沿岸邻苯二甲酸二乙酯和药物及个人护理品等污染物浓度偏高,主要原因是受水力环流等偏自然因素的影响,在风力作用下,在太湖西南部形成顺时针环流,推动部分水溶性和持久性较强的有机微污染物向西南沿岸聚集[55-56],导致其在西南部出现浓度偏高的现象[54]。

2.2 太湖流域水体中有机微污染物数据评估及得分排序

在太湖流域水体中有 123 种有机微污染物的检出数据有效,计算得分、排序及所属优先级的情况见图 2a,详细数据见附表 A Table S6。123 种有机微污染物的得分范围为 48.2~401.7(均值为 211.2),其中多环芳烃得分范围(均值)最高,为 234.7~368.4(316.8)、其次是全氟化合物 215.7~346.3(289.4)、双酚类似物 244.3~342.1(267.0)、农药 98.1~401.7(241.5)、有机磷酸酯 159.3~368.4(223.7)、类固醇激素 155.0~

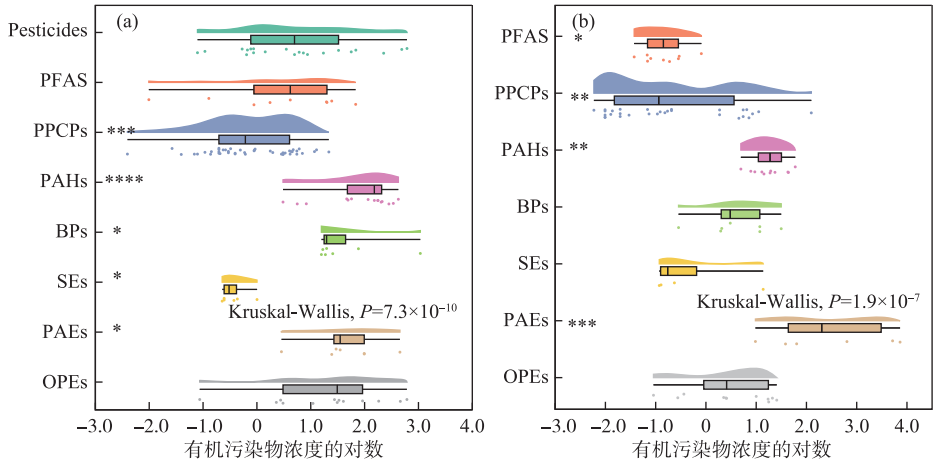

图 1 不同类别有机微污染物在水体(a)和沉积物(b)中浓度对数值分布情况
(使用 Kruskal-Wallis 检验进行各类别有机微污染物的比较;* 代表 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$, *** 表示 $P<0.001$, **** 表示 $P<0.0001$(95%置信水平);
Mann-Whitney 检验用于单个类别与所有类别比较)

Fig. 1 Log distribution of concentrations of different organic micropollutant categories in water(a) and sediments(b)(The Kruskal-Wallis test was used to compare the organic micropollutants across different categories; * represents $P<0.05$, ** represents $P<0.01$, *** represents $P<0.001$, and **** represents $P<0.0001$ (at a 95% confidence level);
The Mann-Whitney test was applied for comparing a single category with all other categories)

280.7(223.1)、邻苯二甲酸酯 134.6~368.4(213.2)和药品及个人护理品 48.2~266.6(132.0)。根据有机微污染物得分分布,采取四分位数将 123 种物质划分为高优先级 Q1(285.1~401.7)、中优先级 Q2(208.7~281.3)、低优先级 Q3(134.6~201.6)和零优先级 Q4(48.1~133.0)4 组。有机微污染物优先级别越高对太湖水环境安全的威胁越大,越应高度关注。高优先级污染物,即优控污染物包含 31 种,主要包括农药($n=8$)、多环芳烃($n=13$)、全氟化合物($n=5$)、双酚类似物($n=1$)、邻苯二甲酸酯($n=2$)和有机磷酸酯($n=2$)。中优先级在 8 类有机微污染物中均有分布,而低优先级和零优先级主要是药品及个人护理品,整体排序靠后的原因是浓度较低,并且具有相对弱的持久性和生物积累性[59]。

从有机微污染物种类来看,不同类型有机微污染物的得分差异性明显(Kruskal-Wallis 检验, $P<0.05$)(图 2b)。全氟化合物和多环芳烃类的评分较高(Mann-Whitney 检验,$P<0.05$),优控污染物数量分别占两类污染物总数的 55.6%和 86.7%,需要特别关注。农药和邻苯二甲酸酯得分范围较广,优控污染物数量分别占两类污染物总数的 38.1%和 28.6%。根据对各指标得分的离散程度(标准差)进行分析,发现相较于其他指标,农药和邻苯二甲酸酯的生物积累性得分离散程度最大,标准差分别为 43.53 和 35.19,这是得分范围广的主要原因(详见附表 A Table S8)。药物及个人护理品评分较低,无高优先级污染物。多环芳烃是典型的"三致"效应有机污染物,来源广泛,燃料燃烧和工业生产废水是最主要的排放途径[60]。多环芳烃在中国湖泊中的污染水平相对较高,在全国湖泊水体和沉积物的平均值分别为(360.0±433.8) ng/L(26 个湖泊)[61]和 753.1 ng/g(21 个湖泊)[62],评估发现太湖 $RQ_{\Sigma PAHs(MPCs)}>1$,有较严重的生态风险[63]。经统计和计算,太湖流域多环芳烃浓度最大达到 430 ng/L(芴)[29],RQ>1 的 PAHs 有 7 种(7/15),风险最大值达 49.27(苯并(a)蒽)。全氟化合物作为一种持久性有机污染物,蓄积性强,具有远距离迁移的特点,在水、空气、食物和人类血清中均有检出[64]。此外,全氟化合物水溶性强,湖泊是全氟化合物主要的汇,太湖流域中 9 种全氟化合物平均浓度达 16.08 ng/L,约为全球湖泊中全氟化合物中值(1.62 ng/L)的 10 倍[65],全氟辛烷磺酸(PFOS)对水生态系统具有中等风险($RQ_{water}>0.1$),而全氟辛酸(PFOA)、全氟壬酸(PFNA)和全氟己烷磺

表 2 太湖有机微污染物时空分布和样品采集信息

Tab. 2 Spatiotemporal distribution and sampling information of organic micropollutants in Lake Taihu

有机微污染物类别	采样日期	点位数	水体	沉积物	参考文献
农药(拟除虫菊酯、磺酰脲类除草剂)	2019、2020 年	33/37	拟除虫菊酯南部和东部污染更严重;磺酰脲类在太湖西北部竺山湖、西部沿岸区污染相对较严重,并呈现向东南递减的趋势	—	[14-16]
全氟化合物	2015 年	28	西北部浓度高	北部 3 个内湾高于南部	[32-33,57]
药品及个人护理品(含抗生素)	2014、2016—2019 年	9/15/16/20	冬春季>夏秋季(4.6 倍);枯水期>丰水期;北部>其他,尤其是梅梁湾和竺山湾;西南地区浓度高	西北部和宜兴东部湖区含量高;水体检出率高于沉积物,但沉积物污染更严重	[16,31-35]
多环芳烃	2015—2018 年	20/41	暖季分布均匀,冷季分布差异大;北部浓度高,由北向南呈先降低后升高的趋势,竺山湾浓度高	西北部高,东南部低,湖岸大于湖心	[29-31,58]
双酚类似物	2016 年	26	入湖河流浓度高,湖体各部分差异不大	支流与湖体浓度相当	[17-18]
类固醇激素	2018 年	20	冬春季>夏季(约 3 倍);北部 3 个湾区及西南沿岸浓度较高	冬季>夏季(约 4 倍);西部、梅梁湾、竺山湾含量高;含量较水体普遍偏低	[36,40-41]
邻苯二甲酸酯	2018、2020 年	19	春夏季>秋冬季;北部和西南部浓度高,总体西北>东南	北部>东部和西部>南部;湖体>环湖河流	[22-25]
有机磷酸酯	2016 年	25/29	北部污染严重,总体西北向东南递减;入湖河流大于湖体(约 2.6 倍)	西北部污染最严重,向东南递减;入湖大于湖体(约 4.6 倍)	[19-22]

酸(PFHxS)对人类健康存在一定风险(RQ_{hum}>0.1)。

通过 31 种优控有机微污染物指标得分分析(图 2c),发现每种污染物各指标的得分贡献度差别较大。在水相评估中,优控有机微污染物最具共性的两个特点是生物积累强、暴露水平高。如排名前四的氟胺氰菊酯、氯菊酯、磷酸三苯酯和蒽,其暴露水平和强生物积累性得分最高,高暴露水平和强生物积累性的污染物会直接增加对生态环境的风险,并且可以通过食物链传递,对人类健康造成威胁。通过指标因子相关性矩阵分析(图 2d),发现污染物总得分与危害风险(HP)的相关性最强(ρ=0.97, P<0.01),其次是与暴露风险(EP)的相关性(ρ=0.64, P<0.01),且 EP 与 HP 之间相关性良好(ρ=0.43, P<0.01),这说明评分结果是暴露风险和危害风险的客观响应,具有良好的有效性和指示性。

2.3 太湖流域沉积物中有机微污染物数据评估及得分排序

太湖作为典型的浅水湖泊,风浪、水力的扰动易引发沉积物内源的污染释放效应,沉积物中污染物释放是湖体有机微污染物风险的重要来源。水和沉积物中同时监测的有机微污染物有 78 种,根据相平衡原理将沉积物孔隙水浓度及其生态风险两个指标应用于太湖优控有机微污染物的筛选,最终得分、排序及所属优先级的情况见图 3a,详细数据见附表 A Table S7。太湖 78 种有机微污染物的得分范围为 65.2~357.9(均值为 207.0),其中多环芳烃得分均值最高(均值为 307.5),得分范围为 216.0~357.9,其次为全氟化合物 166.5~331.8(265.6)、双酚类物质 229.9~324.5(259.0)、类固醇激素 151.0~293.0(207.9)、有机磷酸酯 144.2~350.8(218.5)、邻苯二甲酸酯 123.0~345.6(210.3)和药品及个人护理品 65.2~238.8(134.6),与

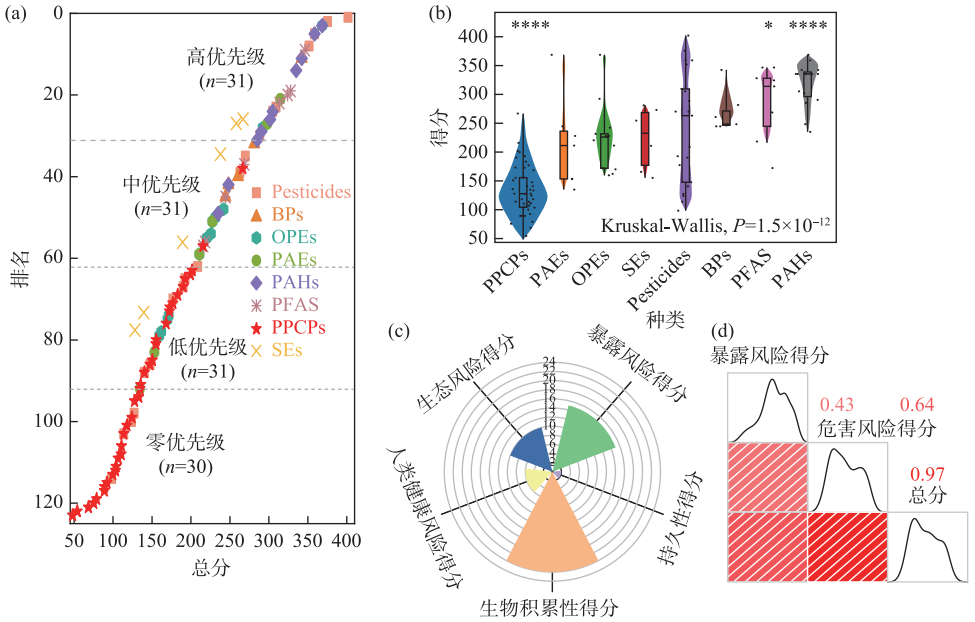

图 2 水相中 123 种有机微污染物得分、排序及所属优先级情况(a);不同有机微污染物类别分值分布情况及组间差异(b)(* 代表 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$, *** 表示 $P<0.001$, **** 表示 $P<0.0001$);在 31 种优控污染物总得分中,不同指标作为最高得分项出现的频次(c);各得分之间的相关性矩阵(d)

Fig. 2 Scoring, ranking, and priority level of 123 organic micropollutants in the aqueous phase (a), Distribution of scores among different categories of organic micropollutants and the differences between categories (b) (* represents $P<0.05$, ** represents $P<0.01$, *** represents $P<0.001$, **** represents $P<0.0001$), The frequency of different indicators appearing as the highest-scoring item in the total score of 31 high-priority contaminants (c) and Correlation matrix between each sub items (d)

水相评估的得分分布趋势一致(图 3b)。根据有机微污染物得分分布,78 种污染物分为 4 个级别,分别是高优先级 Q1(261.4~357.9)、中优先级 Q2(211.0~260.5)、低优先级 Q3(143.8~205.3)和零优先级 Q4(65.2~136.8)。水和沉积物中优控污染物仍以多环芳烃($n=8$)和全氟化合物($n=6$)为主,其次是类固醇激素($n=2$)、双酚($n=2$)、邻苯二甲酸酯($n=1$)和有机磷酸酯($n=1$)。通过图 3c 可以发现,优控污染物得分贡献最大的因子是生物积累性,这些物质的辛醇—水分配系数高,亲脂性强,生物积累性强,并且易在沉积物中蓄积[66-69]。

对比分析发现(图 3d),78 种有机微污染物在水和沉积物两相中的评估得分与水相单独评估得分显著正相关(相关性系数 $R=0.97$, $P<0.01$),水和沉积物两相评估中有 18 种共同有机微污染物的评估结果与水相单独评估一致,均属于高优先级污染物,包括 8 种多环芳烃、5 种全氟化合物、2 种双酚、2 种有机磷酸酯和 1 种邻苯二甲酸酯。8 种多环芳烃中排名靠前的蒽和苯并(a)蒽在太湖中生态风险较高,RQ_{eco} 分别达到 5.08、49.27,这与已有研究的结论一致[69-70]。5 种全氟化合物浓度在 0.13~69.3 ng/L 之间,但其持久性长、生物积累性强和对人体健康的影响较大。邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯在太湖乃至全国多处水源检出频繁[71],检出浓度达到 460 ng/L,同时也是太湖沉积物的主要污染组分,且生态风险高($RQ_{eco}=57.5$)[27,72]。磷酸三苯酯、磷酸三(1,3-二氯异丙基)酯以及双酚 AF 在太湖水/沉积物中检出浓度高,能引起神经和胚胎毒性,呈现高风险态势 $RQ_{eco}>1$,对水生生态系统的影响较大[73-74]。太湖流域经济发达,渔业资源丰富,印染、纺织、化工和塑料等工业密集分布,工农业发展产生的废水排放是太湖流域有机微污染物的重要

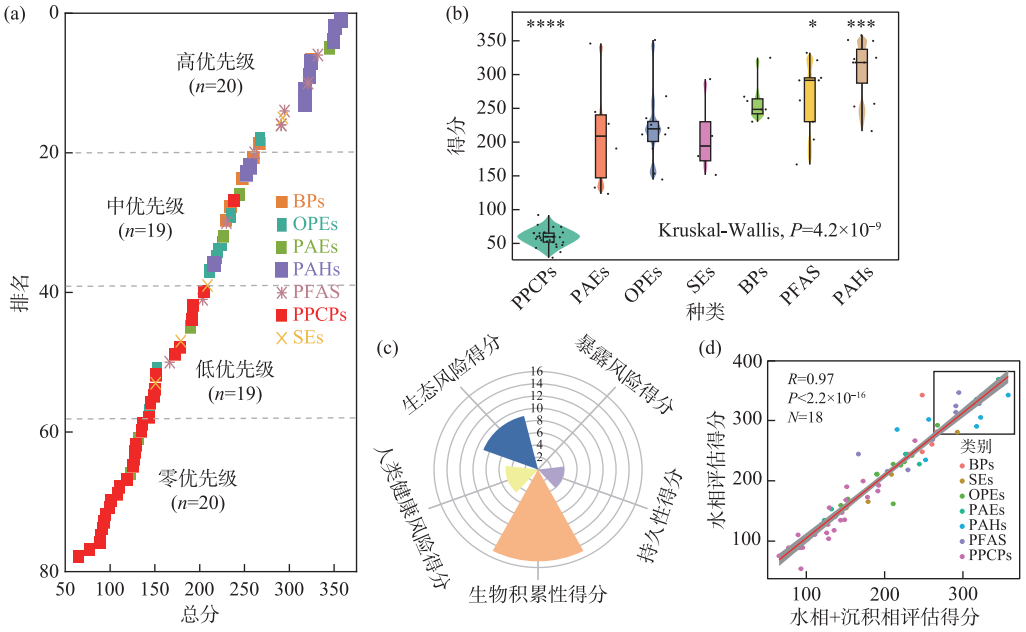

图 3 水和沉积相中 78 种有机微污染物得分、排序及所属优先级情况(a);不同有机微污染物类别组内分值分布情况及组间差异(b)(* 代表 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$, *** 表示 $P<0.001$, **** 表示 $P<0.0001$);在 20 种优控污染物总得分中不同指标作为最高得分项出现的频次(c),以及 78 种有机微污染物在水相数据与水和沉积相数据评估得分相关性散点图(d)

Fig. 3 Scoring, ranking, and priority status of 78 organic micropollutants in the aqueous and sediment phases(a); Distribution of scores within different categories of organic micropollutants and the differences between these categories(b); The frequency of different indicators appearing as the highest-scoring item in the total score of 20 high-priority contaminants(c); The corresponding scores of 78 contaminants under solid and aqueous phase data assessment(d)(* represents $P<0.05$, ** represents $P<0.01$, *** represents $P<0.001$, **** represents $P<0.0001$)

来源[23,75-77]。

炔雌醇和全氟十二酸是补充沉积物数据后新增的优控有机微污染物,增加沉积物数据后这两种污染物排名由单独水相评估的前 50%~25% 上升至两相评估的前 25%。炔雌醇作为类固醇雌激素在沉积物中的含量高达 14 ng/g[36],远大于 $PNEC_{sediment}$(0.27 ng/g),具有高生态风险($RQ_{sediment}=51.37$),有研究指出太湖北部沉积物中类固醇雌激素含量最高,炔雌醇是我国沉积物中主要的雌激素污染种类[78]。全氟十二酸属于长链全氟化合物,辛醇—水分配系数高达 7.49,疏水性强,生物积累性强,在太湖鱼类样品中的含量最高可达 158 ng/g,并且在沉积相的检出率高(100%)[32],分布广泛,是太湖主要的全氟化合物之一[79-80]。

2.4 太湖流域优控有机微污染物清单验证

本研究将太湖优控污染物清单与国内外提出的清单、标准进行对比(表 3),有 17 种优控物质被列入不同的清单或标准中,其中苯并[b]荧蒽和苯并[k]荧蒽列入了中国优先污染物清单[5](共 68 种),全氟辛酸、全氟辛烷磺酸、溴氰菊酯和邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯在我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)或《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中设有相应水质监测指标,氯菊酯、苯并(a)蒽和炔雌醇等 16 种物质列入了美国或欧盟不同类型的管控清单中,这表明本研究构建的方法能较客观筛选出具有一定危害且已受到重视的优先污染物。

表 3 太湖优控污染物清单与其他清单、标准或研究对比

Tab. 3 Summary of intersections of high-priority contaminants in Lake Taihu with national and international standards, lists or other studies

本研究优控污染物	CAS	中国(1991)[5]	GB 5749—2022	美国 CCL4	美国(2014)[82]	欧盟物质观察清单	欧盟(2013)[83]	GB 18918—2002	其他研究
氟胺氰菊酯	102851-06-9								
氯菊酯	52645-53-1			•					40/123[9]
氰戊菊酯	51630-58-1								
联苯菊酯	82657-04-3								39/123[9]
胺菊酯	7696-12-0								
氟丙菊酯	101007-06-1								
氟氯氰菊酯	68359-37-5								26/123[9]
溴氰菊酯	52918-63-5		•(20 μg/L)						
双酚 AF	1478-61-1								
双酚 Z	843-55-0								
磷酸三苯酯	115-86-6								
磷酸三(1,3-二氯异丙基)酯	13674-87-8								18/123[9]
邻苯二甲酸二(2-乙基已基)酯	117-81-7		•(400 μg/L)			•	•	•(100 μg/L)	
蒽	120-12-7				•		•		
苯并(a)蒽	56-55-3			•	•				102/117[84]
芘	129-00-0				•				29/117[84]
荧蒽	206-44-0				•		•		30/117[84]
菲	1985/1/8				•				40/117[84]
芴	86-73-7				•				22/117[84]
屈	218-01-9				•				46/117[84]
2-甲基萘	91-57-6								
1-甲基萘	90-12-0								
苯并(b)荧蒽	205-99-2	•			•		•		
苊	83-32-9				•				27/117[84]
苯并(k)荧蒽	207-08-9	•			•				
苊烯	208-96-8				•				24/117[84]
全氟辛烷磺酸	1763-23-1		•(40 ng/L)	•		•	•		1/41[8]
全氟辛酸	335-67-1		•(80 ng/L)	•					1/123[9]、9/117[84]、2/41[8]
全氟壬酸	375-95-1								9/41[8]
全氟癸酸	335-76-2								79/117[84]、30/41[8]
全氟十一酸	2058-94-8								83/117[84]、8/41[8]
全氟十二酸	307-55-1								
炔雌醇	57-63-6			•		•			

•代表清单含有该物质。其他研究列表示的是在其他研究中目标污染物优控排名/参与排名的污染物总数。

由表 3 可知,有 16 种物质未进入各类清单或标准中,包括农药($n=6$)、双酚($n=2$)、有机磷酸酯($n=2$)、多环芳烃($n=2$)和全氟化合物($n=4$)五类,但有的已经被不同国家或组织关注或管控,例如在水相评估

中排名第一的氟胺氰菊酯,常被用于蜂螨防治,因具有发育和生殖毒性被欧盟列入可疑的内分泌干扰物名单[81],以及磷酸三苯酯作为一种生产和需求量较高的阻燃剂,具有一定神经和胚胎毒性,因为其潜在的内分泌干扰特性被列入欧盟滚动行动计划(CoRAP)[52]。这些具有一定区域性与隐秘性的优控有机微污染物可为太湖有机微污染物治理提供了一定的借鉴与参考,与此同时与其他研究的排序比较后可以发现,因研究区域或评分体系不同会带来一定差异,说明优控有机微污染物的筛选具有一定主观性和地方特色。

2.5 不确定性分析

基于风险评价过程中参数的有效性,对有机微污染物优控评估进行不确定类别归类(图 4),结果表明,不确定性类别 3 是所有有机微污染物优控筛选的主要不确定性因子,在农药、多环芳烃、全氟化合物、药物及个人护理品、类固醇激素、有机磷酸酯、邻苯二甲酸酯和双酚类的占比分别为 52.4%、46.7%、77.8%、48.9%、66.7%、46.2%、14.3%和 71.4%。不确定类别 3 的组成因子主要包括由急性毒性或慢性毒性值计算得到的 PNEC,优化 PNEC 的获取方式是减小不确定性类别 3 的主要途径。然而,由于有机微污染物毒性数据的缺失或不足,导致 PNEC 的代表性严重不足。此外,由于有机微污染物的毒性数据多是基于标准模式生物或典型水生生物毒理实验获取,这与区域性本土生物的契合度不高,这也是造成有机微污染物风险评估偏差的主要原因。未来研究工作应进一步构建和完善有机微污染物毒性数据库,利用现有毒理学数据库建立毒性预测模型(如 OECD QASRToolbox 和 Toxmatch 模型等[85]),实现新出现污染物毒性快速准确预测。针对太湖流域有机微污染物优控研究,应进一步聚焦本土物种保护工作,研究鲤鱼、银鱼、溞、臂尾轮虫科、摇蚊、蚬科、颤蚓科及敏感水生植物或藻类对有机微污染物的毒理学响应,准确评估有机微污染物的生态风险[86]。

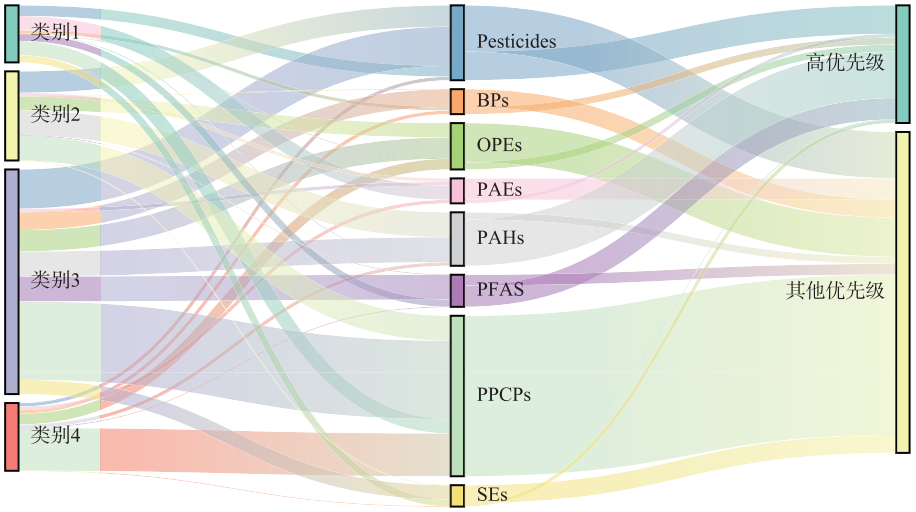

图 4 不确定性类别在有机微污染物中的分布情况

Fig. 4 Distribution of uncertainty categories in organic micropollutants

综合分析太湖流域有机微污染物采样时间与采样点位布设情况,发现水相中 74%的有机微污染物(91/123)和沉积相中 78%的有机微污染物(61/78)监测方案属于 IV 类(见附表 A Table S9),即采样时间大多早于 2019 年,采样点位数一般小于 30 个,在采样时间、采样点位布设方面有效性不足,这表明虽然有机微污染物监测在太湖流域开展较早,但科学性与系统性研究缺乏。基于系统性研究数据,在太湖流域开展优控污染物筛选,是该流域有机微污染物精准治理与有效管控的关键[87-88]。此外,在有机微污染物监测方面需进一步规范监测方法与检测技术,明确有机微污染物在水、底泥等介质中的环境归宿,服务于有机微污染物风险精准识别与全面筛查[9,52]。

综上,本研究的筛选方法在运用时会遇到参数或数据来源引发的不确定性问题,但评分体系已得到广泛应用,是科学有效的。除此之外,太湖作为浅水湖泊,沉积物引发的内源污染问题不可忽视,本文还创新

性地将沉积相的数据融入计算,建立了多介质多指标的综合评分方法,可适用于其他浅水湖泊优控污染物筛选。相较于潜在危害指数法和风险商法等其他方法,综合评分法广泛运用于湖泊优控污染物筛选[6-7,51,89],结果有效性强,考虑的指标更全面综合,可信度高[11]。未来需进一步在沉积相—水相赋存转换、指标权重赋值和风险评价模型等方面加强研究,进一步完善有机微污染物评价指标体系。

3 结论

本文构建了一种基于有机微污染物水和沉积物两相介质污染数据,涵盖暴露风险和危害风险的多指标综合评分法,采取了 2/3 累计秩赋分法,以等权重的方式计算总分,以四分法划分得到优控污染物,并且对结果进行不确定性分析,流程简单有效,在有机微污染物多介质暴露风险评估等方面提出新思路。在太湖水体 123 种有机微污染物中共筛选出 31 种优控物质,多环芳烃和全氟化合物是需要重点关注的对象。考虑到浅水湖泊水和沉积物介质交换频繁,在纳入沉积相介质的污染数据后,增选炔雌醇和全氟十二酸 2 种有机微污染物,综合得到 33 种优控污染物。与国内外清单或标准比较发现,已有氯菊酯和全氟辛酸等 17 种物质受到了国内外的关注,但仍有氟胺氰菊酯、双酚 AF 等 16 种物质暂未被列入,应引起重视。本文以太湖为例,建立了有机微污染物优控筛查方法,综合考虑了浅水湖泊沉积相中有机微污染物的释放风险,有效评估了该流域有机微污染物的优先管控对象,为制定具有区域水环境特点的有机微污染物优控清单提供技术参考。

4 附录

附表 A 和附件一见电子版(DOI: 10.18307/2025.0625)。

5 参考文献

[1] Yang Y, Zhang XR, Jiang JY *et al*. Which micropollutants in water environments deserve more attention globally. *Environmental Science & Technology*, 2022, **56**(1): 13-29. DOI: 10.1021/acs.est.1c04250.

[2] Wołowicz A, Munir HMS. Emerging organic micropollutants as serious environmental problem: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 2025, **958**: 177948. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177948.

[3] Council of the European Union EP. Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the council of 12 August 2013 amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy: L 226, 1-17.

[4] European C. Commission Implementing Decision (EU) 2018/840 of 5 June 2018 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy pursuant to Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Implementing Decision (EU) 2015/495. Off J Eur Union 2018.

[5] Zhou WM, Fu DQ, Sun ZG. Determination of black list of China's priority pollutants in water. *Research of Environmental Sciences*, 1991, **4**(6): 9-12. DOI: 10.13198/j.res.1991.06.11.zhouwm.002. [周文敏, 傅德黔, 孙宗光. 中国水中优先控制污染物黑名单的确定. 环境科学研究, 1991, **4**(6): 9-12.]

[6] Ding QQ, Gong XH, Wang ZD *et al*. Aproposed multi-criteria scoring method for identifying priority pollutants in surface water: A case study of Lake Zhangdu, Hubei Province. *J Lake Sci*, 2022, **34**(1): 90-108. DOI: 10.18307/2022.0109. [丁琪琪, 龚雄虎, 王兆德等. 基于多指标综合评分法筛选地表水环境优先污染物——以湖北涨渡湖为例. 湖泊科学, 2022, **34**(1): 90-108.]

[7] Gong XH, Ding QQ, Jin M *et al*. Screening of priority pollutants and risk assessment for surface water from Shengjin Lake. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4727-4738. DOI: 10.13227/j.hjkx.202102117. [龚雄虎, 丁琪琪, 金苗等. 升金湖水体优先污染物筛选与风险评价. 环境科学, 2021, **42**(10): 4727-4738.]

[8] Wu YQ, Song S, Shi YJ *et al*. Screening and control measures for new priority pollutants in surface water of Tianjin. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 4074-4086. DOI: 10.13227/j.hjkx.202111166. [吴颜岐, 宋帅, 史雅娟等. 天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策. 环境科学, 2022, **43**(8): 4074-4086.]

[9] Zhong MM, Wang TL, Zhao WX *et al*. Emerging organic contaminants in Chinese surface water: Identification of priority pollutants. *Engineering*, 2022, **11**: 111-125. DOI: 10.1016/j.eng.2020.12.023.

[10] Wang YZ, Zhang YH, Zhao Y *et al*. Comparison on screening and sorting methods of environmental priority pollutants at home and abroad. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2018, **8**(4): 456-464. [王一喆, 张亚辉, 赵莹等. 国内外环境优先污染物筛选排序方法比较. 环境工程技术学报, 2018, **8**(4): 456-464.]

[11] Li S, Li YB. Research progress on screening priority pollutants in aquatic environments. *Environmental Chemistry*, 2024, **43**(6): 1966-

1979.[李上, 李雁宾. 水环境优控污染物筛选研究进展. 环境化学, 2024, **43**(6): 1966-1979.]

[12] Wang B, Yu G. Emerging contaminant control: From science to action. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2022, **16**(6): 81. DOI: 10.1007/s11783-022-1559-y.

[13] Yu T, Zhang Y, Wu FC *et al*. Six-decade change in water chemistry of large freshwater Lake Taihu, China. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(16): 9093-9101. DOI: 10.1021/es401517h.

[14] Fu Y, Ji YY, Tian YW *et al*. Unveiling priority emerging PFAS in Taihu Lake using integrated nontarget screening, target analysis, and risk characterization. *Environmental Science & Technology*, 2024, **58**(42): 18980-18991. DOI: 10.1021/acs.est.4c06731.

[15] Zhong WJ, Wang DH, Xu XW *et al*. Screening level ecological risk assessment for phenols in surface water of the Taihu Lake. *Chemosphere*, 2010, **80**(9): 998-1005. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.05.036.

[16] Wang R, Zhang SW, Xiao KY *et al*. Occurrence, sources, and risk assessment of pyrethroid insecticides in surface water and tap water from Taihu Lake, China. *Journal of Environmental Management*, 2023, **325**: 116565. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116565.

[17] Dai QZ, Xu F, Yu L *et al*. Pollution characteristics of 13 sulfonylurea herbicides in Taihu Lake area. *Environmental Science & Technology*, 2021, **44**(9): 1-6.[代倩子, 徐枫, 虞霖等. 太湖区域13种磺酰脲类除草剂污染特征. 环境科学与技术, 2021, **44**(9): 1-6.]

[18] Liu N, Jin XW, Xue LD *et al*. Concentrations distribution and ecological risk assessment of pharmaceuticals and personal care products in Taihu Lake. *China Environmental Science*, 2017, **37**(9): 3515-3522.[刘娜, 金小伟, 薛荔栋等. 太湖流域药物和个人护理品污染调查与生态风险评估. 中国环境科学, 2017, **37**(9): 3515-3522.]

[19] Liu YH, Zhang SH, Song NH *et al*. Occurrence, distribution and sources of bisphenol analogues in a shallow Chinese freshwater lake (Taihu Lake): Implications for ecological and human health risk. *Science of the Total Environment*, 2017, **599**: 1090-1098. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.069.

[20] Chen MH, Guo M, Xu HZ *et al*. Distribution characteristics and potential risk of bisphenol analogues in surface water and sediments of Lake Taihu. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2793-2800. DOI: 10.13227/j.hjkx.201611091.[陈玫宏, 郭敏, 徐怀洲等. 太湖表层水体及沉积物中双酚A类似物的分布特征及潜在风险. 环境科学, 2017, **38**(7): 2793-2800.]

[21] Chen MH, Liu YH, Guo RX *et al*. Spatiotemporal distribution and risk assessment of organophosphate esters in sediment from Taihu Lake, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(14): 13787-13795. DOI: 10.1007/s11356-018-1434-3.

[22] Liu YH, Song NH, Guo RX *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. *Chemosphere*, 2018, **202**: 255-263. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.03.108.

[23] Wang XL, Zhu LY, Zhong WJ *et al*. Partition and source identification of organophosphate esters in the water and sediment of Taihu Lake, China. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **360**: 43-50. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.07.082.

[24] 张文萍. 太湖流域沉积物中PAEs和OPEs的污染特征及生态风险评价[学位论文]. 北京: 中国环境科学研究院, 2021.

[25] Luo X, Shu S, Feng H *et al*. Seasonal distribution and ecological risks of phthalic acid esters in surface water of Taihu Lake, China. *Science of the Total Environment*, 2021, **768**: 144517. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144517.

[26] Liu SJ, Ding JN, Shi JZ *et al*. Spatiotemporal distribution and ecological risk assessment of plastic additives in Taihu Lake. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2557-2565. DOI: 10.13227/j.hjkx.202108309.[刘舒娇, 丁剑楠, 石浚哲等. 太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价. 环境科学, 2022, **43**(5): 2557-2565.]

[27] Gao XY, Li J, Wang XN *et al*. Exposure and ecological risk of phthalate esters in the Taihu Lake basin, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **171**: 564-570. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.01.001.

[28] Liu RL, Tao YQ. Occurrence, bioaccumulation, and partitioning of phthalate acid esters in the third largest freshwater lake (Lake Taihu) in China. *Environmental Research*, 2024, **263**: 120188. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120188.

[29] Kong JJ, Dai YX, Han MS *et al*. Nitrated and parent PAHs in the surface water of Lake Taihu, China: Occurrence, distribution, source, and human health risk assessment. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **102**: 159-169. DOI: 10.1016/j.jes.2020.09.025.

[30] Li AL, der Beek TA, Zhang J *et al*. Characterizing spatiotemporal variations of polycyclic aromatic hydrocarbons in Taihu Lake, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, **194**(10): 713. DOI: 10.1007/s10661-022-10358-4.

[31] Li Y, Wang GM, Wang JX *et al*. Determination of influencing factors on historical concentration variations of PAHs in West Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*, 2019, **249**: 573-580. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.03.055.

[32] Chen M, Wang Q, Shan GQ *et al*. Occurrence, partitioning and bioaccumulation of emerging and legacy per- and polyfluoroalkyl substances in Taihu Lake, China. *Science of the Total Environment*, 2018, **634**: 251-259. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.301.

[33] Guo CS, Zhang Y, Zhao X *et al*. Distribution, source characterization and inventory of perfluoroalkyl substances in Taihu Lake, China. *Chemosphere*, 2015, **127**: 201-207. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.01.053.

[34] Liu JC, Xie YN, Zhou L *et al*. Co-accumulation characteristics and interaction mechanism of microplastics and PFASs in a large shallow lake. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, **480**: 135780. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.135780.

[35] Huang JC, Ding JN, Jiang H *et al*. Pharmaceuticals and personal care products across different water bodies in Taihu Lake basin, China:

Occurrence, source, and flux. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, **19**(17): 11135. DOI: 10.3390/ijerph191711135.

[36] Xie ZX, Lu GH, Yan ZH *et al*. Bioaccumulation and trophic transfer of pharmaceuticals in food webs from a large freshwater lake. *Environmental Pollution*, 2017, **222**: 356-366. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.12.026.

[37] Xu ZA, Li T, Bi J *et al*. Spatiotemporal heterogeneity of antibiotic pollution and ecological risk assessment in Taihu Lake Basin, China. *Science of the Total Environment*, 2018, **643**: 12-20. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.175.

[38] Ding JN, Liu SJ, Zou JM *et al*. Spatiotemporal distributions and ecological risk assessments of typical antibiotics in surface water of Taihu Lake. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1811-1819. DOI: 10.13227/j.hjkx.202009082. [丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明等. 太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价. 环境科学, 2021, **42**(4): 1811-1819.]

[39] Zhang PW, Zhou HD, Zhao GF *et al*. Spatial, temporal distribution characteristics and potential risk of PPCPs in surface sediments from Taihu Lake. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3348-3355. DOI: 10.13227/j.hjkx.2016.09.013. [张盼伟, 周怀东, 赵高峰等. 太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险. 环境科学, 2016, **37**(9): 3348-3355.]

[40] 罗鑫. 太湖中甾体激素污染特征及生态风险研究[学位论文]. 无锡: 江南大学, 2021.

[41] Wang YH, Wang QY, Hu LF *et al*. Occurrence of estrogens in water, sediment and biota and their ecological risk in Northern Taihu Lake in China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2015, **37**(1): 147-156. DOI: 10.1007/s10653-014-9637-0.

[42] Li Y, Zhang LY, Liu XS *et al*. Ranking and prioritizing pharmaceuticals in the aquatic environment of China. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 333-342. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.048.

[43] Lin RH, Jiang H, Wang M *et al*. Application of species sensitivity distribution(SSD) to the environmental risk assessment of pesticides. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, **12**(4): 110-118. [林荣华, 姜辉, 王猛等. 物种敏感度分布(SSD)方法在农药环境风险评估中的应用. 生态毒理学报, 2017, **12**(4): 110-118.]

[44] Ai SH, Li J, Wang XN *et al*. Water quality criteria and risk assessment of bisphenol a in Taihu Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(3): 581-588. [艾舜豪, 李霁, 王晓南等. 太湖双酚 A 的水质基准研究及风险评价. 环境科学研究, 2020, **33**(3): 581-588.]

[45] Chemistry Dashboard [Internet]. Washington, DC: US Environmental Protection Agency; [cited 2019 Aug 15]. Available from: https://comptox.epa.gov/dashboard..

[46] Xu Y, Zhou YZ, Chen X *et al*. Chemical characterization and risk assessment of organochlorine pesticides in sediments and biota from Meiliang Bay of Taihu Lake. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2015, **45**(2): 328-335. [许妍, 周亚子, 陈曦等. 太湖梅梁湾沉积物和水生生物中有机氯农药分布特征及风险评估. 东南大学学报: 自然科学版, 2015, **45**(2): 328-335.]

[47] Hua ZL, Wang Y. Advance on the release of pollutants in river and lake sediments under hydrodynamic conditions. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2018, **46**(2): 95-105. [华祖林, 王苑. 水动力作用下河湖沉积物污染物释放研究进展. 河海大学学报: 自然科学版, 2018, **46**(2): 95-105.]

[48] Zhao JL, Ying GG, Wei DB *et al*. Ecological risk assessment methodology of toxic pollutants in surface water and sediments: A review. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2011, **6**(6): 577-588. [赵建亮, 应光国, 魏东斌等. 水体和沉积物中毒害污染物的生态风险评价方法体系研究进展. 生态毒理学报, 2011, **6**(6): 577-588.]

[49] Zheng YT, Wang BC, Yu Y *et al*. A computational toxicological modeling tool for screening potentially persistent, mobile, and toxic (PMT) emerging contaminants. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2022, **17**(3): 111-120. [郑玉婷, 王宝成, 于洋等. 一种筛选具有潜在持久性、迁移性和毒性(PMT)新污染物的计算毒理学模型工具. 生态毒理学报, 2022, **17**(3): 111-120.]

[50] Zhao JL, Hou S, Zhang H *et al*. Spatiotemporal variations and priority ranking of emerging contaminants in Nanwan Reservoir: A case study from the agricultural region in Huaihe river basin in China. *Journal of Environmental Management*, 2024, **368**: 122195. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122195.

[51] Gong XH, Xiong LL, Xing JS *et al*. Implications on freshwater lake-river ecosystem protection suggested by organic micropollutant (OMP) priority list. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, **461**: 132580. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132580.

[52] Huang FY, Chen LP, Zhang C *et al*. Prioritization of antibiotic contaminants in China based on decennial national screening data and their persistence, bioaccumulation and toxicity. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**: 150636. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150636.

[53] Zhou LJ, Xing WL, Zhang B *et al*. Principles for environmental exposure assessment and investigation monitoring of emerging pollutants. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2024, **16**(3): 1-8. [周林军, 邢维龙, 张冰等. 新污染物环境暴露评估与调查监测总体要求. 环境监控与预警, 2024, **16**(3): 1-8.]

[54] Zhou LJ, Zhang BB, Zhao YG *et al*. Occurrence, spatiotemporal distribution, and ecological risks of steroids in a large shallow Chinese lake, Lake Taihu. *Science of the Total Environment*, 2016, **557**: 68-79. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.059.

[55] Huang L, Fang HW, He GJ *et al*. Effects of internal loading on phosphorus distribution in the Taihu Lake driven by wind waves and lake currents. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 760-773. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.07.049.

[56] Han J. Study on regularities of water flow and water body migration of Zhushan Lake, Taihu Lake. *Water Resources Planning and Design*, 2020, (7): 59-64, 123. [韩景. 太湖竺山湖湖流和水体迁移规律研究. 水利规划与设计, 2020, (7): 59-64, 123.]

[57] Chen XW, Zhu LY, Pan XY *et al*. Isomeric specific partitioning behaviors of perfluoroalkyl substances in water dissolved phase, suspended particulate matters and sediments in Liao River Basin and Taihu Lake, China. *Water Research*, 2015, **80**: 235-244. DOI: 10.1016/j.watres.2015.04.032.

[58] Wen JL, Li Y, Li Y *et al*. The spatial distribution, source and risk of polycyclic aromatic hydrocarbon in surface sediments of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2024, **36**(4): 1082-1097. DOI: 10.18307/2024.0422. [温佳乐, 李岩, 李晔等. 太湖表层沉积物多环芳烃的空间分布、来源及其风险. 湖泊科学, 2024, **36**(4): 1082-1097.]

[59] Tian YJ, Wu YS, Huang TY *et al*. Occurrence of PPCPs in surface water and sediment in China and influencing factors of interactive migration. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, **13**(2): 585-596. [田永静, 武宇圣, 黄天寅等. 我国地表水和沉积物 PPCPs 赋存与交互迁移影响因素. 环境工程技术学报, 2023, **13**(2): 585-596.]

[60] Gong XH, Zhao ZH, Zhang L *et al*. North-south geographic heterogeneity and control strategies for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Chinese lake sediments illustrated by forward and backward source apportionments. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **431**: 128545. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.128545.

[61] Tao YQ, Zhao RH. Occurrence and distribution of persistent organic pollutants in water of Chinese lakes and reservoirs. *J Lake Sci*, 2020, **32**(2): 309-324. DOI: 10.18307/2020.0203. [陶玉强, 赵睿涵. 持久性有机污染物在中国湖库水体中的污染现状及分布特征. 湖泊科学, 2020, **32**(2): 309-324.]

[62] Li SY, Tao YQ, Yao SC *et al*. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons(pahs) in lake sediments from China. *Quaternary Sciences*, 2015, **35**(1): 118-130. [李珊英, 陶玉强, 姚书春等. 我国湖泊沉积物多环芳烃的分布特征及来源分析. 第四纪研究, 2015, **35**(1): 118-130.]

[63] Meng Y, Liu XH, Lu SY *et al*. A review on occurrence and risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in lakes of China. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 2497-2506. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.162.

[64] Kurwadkar S, Dane J, Kanel SR *et al*. Per- and polyfluoroalkyl substances in water and wastewater: A critical review of their global occurrence and distribution. *Science of the Total Environment*, 2022, **809**: 151003. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151003.

[65] Sims JL, Stroski KM, Kim S *et al*. Global occurrence and probabilistic environmental health hazard assessment of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in groundwater and surface waters. *Science of the Total Environment*, 2022, **816**: 151535. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151535.

[66] 赵丽霞. 典型全氟化合物在沉积物中的分配行为与微观机制研究[学位论文]. 天津: 南开大学, 2013.

[67] 许卓奇. 典型人工湿地 PFASs 时空分布规律研究[学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2021.

[68] Huang Y, Zhang W, Wang RG *et al*. Advances on pollution status and endocrine disrupting effects of bisphenols. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2022, **17**(1): 60-81. [黄苑, 张维, 王瑞国等. 双酚类化合物污染现状和内分泌干扰效应研究进展. 生态毒理学报, 2022, **17**(1): 60-81.]

[69] Jiang DL, Yue L, Ma D *et al*. Ecological risk assessment of water in Taihu Lake and Tianmu Lake using species sensitivity distribution model. *Environmental Chemistry*, 2012, **31**(3): 296-301. [蒋丹烈, 岳龙, 马迪等. 应用物种敏感性分布法分析太湖及天目湖水体的生态风险. 环境化学, 2012, **31**(3): 296-301.]

[70] Li LR, Wang YL, Gao JY *et al*. Source and risk assessment of PAHs in surface sediments from rivers and lakes of China. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(6): 92-98. [李利荣, 王艳丽, 高璟赟等. 中国表层水体沉积物中多环芳烃源解析及评价. 中国环境监测, 2013, **29**(6): 92-98.]

[71] Liu XW, Shi JH, Bo T *et al*. Occurrence of phthalic acid esters in source waters: A nationwide survey in China during the period of 2009-2012. *Environmental Pollution*, 2014, **184**: 262-270. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.08.035.

[72] Cui XH, Li BH, Chen HH *et al*. A review of phthalic acid esters contamination and sorption in soil and sediment, China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(2): 472-479. [崔学慧, 李炳华, 陈鸿汉等. 中国土壤与沉积物中邻苯二甲酸酯污染水平及其吸附研究进展. 生态环境学报, 2010, **19**(2): 472-479.]

[73] van der Veen I, de Boer J. Phosphorus flame retardants: Properties, production, environmental occurrence, toxicity and analysis. *Chemosphere*, 2012, **88**(10): 1119-1153. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.03.067.

[74] Peng T, Wang SS, Ren L *et al*. Neurotoxicity of triphenyl phosphate on the early life stages of zebrafish. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, **11**(1): 254-260. DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20150506001. [彭涛, 王思思, 任琳等. 磷酸三苯酯对斑马鱼早期生命阶段的神经毒性研究. 生态毒理学报, 2016, **11**(1): 254-260.]

[75] Yan ZY, Liu YH, Yan K *et al*. Bisphenol analogues in surface water and sediment from the shallow Chinese freshwater lakes: Occurrence, distribution, source apportionment, and ecological and human health risk. *Chemosphere*, 2017, **184**: 318-328. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.06.010.

[76] Kong JJ, Han MS, Cao XY *et al*. Sedimentary spatial variation, source identification and ecological risk assessment of parent, nitrated and

oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons in a large shallow lake in China. *Science of the Total Environment*, 2023, **863**: 160926. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.160926.

[77] Li T, Wang Y, Xu F *et al*. Pollution characteristics, source apportionment and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water from Taihu Lake basin. *Environmental Science & Technology*, 2018, **41**(11): 198-204. [李涛, 王玉, 徐枫等. 太湖流域地表水中多环芳烃的来源解析及风险评价. 环境科学与技术, 2018, **41**(11): 198-204.]

[78] Zhong RY, Zou HY, Gao J *et al*. A critical review on the distribution and ecological risk assessment of steroid hormones in the environment in China. *Science of the Total Environment*, 2021, **786**: 147452. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147452.

[79] Chen M, Zhu LY, Wang Q *et al*. Tissue distribution and bioaccumulation of legacy and emerging per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in edible fishes from Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*, 2021, **268**: 115887. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115887.

[80] Wei ZH, Zhou DR, Hao GJ *et al*. Distribution characteristics of perfluorinated compounds in six typical fish species from South Taihu Lake and their health risks. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, **44**(4): 390-400. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2023.0297. [魏子皓, 周冬仁, 郝贵杰等. 南太湖6种典型鱼类中全氟化合物的分布特征及其健康风险. 环境科学学报, 2024, **44**(4): 390-400.]

[81] Liu JH, Li YS, Zhang T *et al*. Detection of tau-fluvalinate residues in honey by QuEChERS-gas chromatography-tandem mass spectrometry. *Journal of Food Safety & Quality*, 2019, **10**(22): 7591-7595. [刘建辉, 李彦生, 张婷等. QuEChERS-气相色谱-串联质谱法检测蜂蜜中氟胺氰菊酯残留量. 食品安全质量检测学报, 2019, **10**(22): 7591-7595.]

[82] US EPA. Quality criteria for water. Spring field, Virginia: US Department of Commerce, National Technical Information Service. US EPA, 1986.

[83] Zhou LJ, Zhang Q, Shi LL. The formulation methods of priority water pollutants and environmental quality standards in the EU and their reference significance to China. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2019, **11**(1): 1-9. [周林军, 张芹, 石利利. 欧盟优先水污染物与环境质量标准制定及其对我国的借鉴作用. 环境监控与预警, 2019, **11**(1): 1-9.]

[84] Li Z, Li M, Liu X *et al*. Identification of priority organic compounds in groundwater recharge of China. *Science of the Total Environment*, 2014, **493**: 481-486. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.06.005.

[85] Jia L, Fan RQ, Zhang WJ *et al*. Development and application of new approach methodologies in chemical risk assessment. *Chinese Journal of Pharmacology and Toxicology*, 2022, **36**(10): 793-800. [贾栗, 范瑞棋, 张婉君等. 化学品风险评估新技术方法的发展及应用. 中国药理学与毒理学杂志, 2022, **36**(10): 793-800.]

[86] Guo HJ, Xiao X, Kong XZ *et al*. Species selection derived from the water quality criteria based on hydrobios in the Taihu Lake basin. *Environmental Protection Science*, 2017, **43**(5): 57-61. [郭海娟, 肖霄, 孔祥震等. 太湖流域水生生物水质基准推导的物种选择. 环境保护科学, 2017, **43**(5): 57-61.]

[87] Cheng F, Huang JH, Li HZ *et al*. Text mining-based suspect screening for aquatic risk assessment in the big data era: Event-driven taxonomy links chemical exposures and hazards. *Environmental Science & Technology Letters*, 2023, **10**(11): 1004-1010. DOI: 10.1021/acs.estlett.3c00250.

[88] Huang JH, Cheng F, He LW *et al*. Effect driven prioritization of contaminants in wastewater treatment plants across China: A data mining-based toxicity screening approach. *Water Research*, 2024, **264**: 122223. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122223.

[89] Zhao ZH, Yao XL, Ding QQ *et al*. A comprehensive evaluation of organic micropollutants (OMPs) pollution and prioritization in equatorial lakes from mainland Tanzania, East Africa. *Water Research*, 2022, **217**: 118400. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118400.

附录

附件一

计算原则

(1)毒性数据物种尽量不少于 10 种，尽可能采用 HJ 831—2022 中附表——中国淡水生物水质基准推导受试物种推荐名录涉及物种的毒性数据，以及剔除 HJ 831—2022 中附表——部分中国淡水外来入侵物种名录涉及物种的毒性数据。

(2)慢性毒性数据能够更好地反映出水生生物暴露于环境污染物的真实情况，所以 NOEC 或 1/2 LOEC 是优先采用的数据[Ⅰ]。当慢性毒性的数据量无法构建较好的 SSD 模型时，利用急性慢性比率(ACR)，ACR 取 10，将急性毒性数据转化为慢性毒性数据进行使用[Ⅱ]。

(3)毒性数据的优先性准则为 NOEC＞LOEC＞EC50＞LC50。

(4)若同一物种有不同的测试终点时，应选择最敏感的毒性数据；若同一物种和测试终点存在多个毒性数据时，则计算其几何平均值。

(5)毒性效应终点应尽量统一，如生长、生存、繁殖等。

(6)当有效毒性数据包括的物种数量大于 15 时，AF 取值为 2；有效毒性数据包括的物种数量小于等于 15 时，AF 取值为 3。

(7)若采用单因子评估法，优先选择藻类、鱼类和溞类中最敏感物种的慢性毒性数据 NOEC，如果 NOEC 不可用，则采用 EC50 或 LC50。优先考虑优先标准试验/本地优势物种。评估因子 AF 参照有关文献[Ⅲ, Ⅳ]，取值为 1000(急性毒性数据)或 100(慢性毒性数据)。

使用国家生态环境基准计算软件(EEC-SSD)拟合物种敏感度曲线，EEC-SSD 软件主要用于毒性数据的物种敏感度分布拟合，软件涵盖的拟合模型包括正态分布、对数正态分布、逻辑斯谛分布、对数逻辑斯谛分布 4 个模型，对于模型模拟结果的好坏，用 RMSD(均方根误差)和 P(A-D)(A-D 检验的 P 值)两个拟合参数考量，当 RMSE 越小且 P>0.05(服从正态分布)时，模型拟合效果越好。当数据量较大，偏向正态类型的分布，反之偏向逻辑斯谛类型的分布[Ⅴ]。

附录参考文献

[Ⅰ] Guo L, Li Z, Gao P *et al*. Ecological risk assessment of bisphenol A in surface waters of China based on both traditional and reproductive endpoints. *Chemosphere,* 2015, **139**: 133-137.

[Ⅱ] Chen CS. Ecological risk assessment for aquatic species exposed to contaminants in Keelung River, Taiwan. *Chemosphere*, 2005, **61**(8): 1142-1158.

[Ⅲ] Zhang YR, Zhang GD, Wang YQ *et al*. Occurrence and ecological risk of typical antibiotics in surface water of the Lake Sayram, Xinjiang. *J Lake Sci,* 2021, **33**(2): 483-493. DOI:10.18307/2021.0214. [张亚茹，张国栋，王永强等. 新疆赛里木湖近岸表层水典型抗生素的赋存与风险评价. 湖泊科学, 2021, **33**(2): 483-493.]

[Ⅳ] Li BL, Wang H, Wang J *et al*. Pollution characteristics and risk assessment of antibiotics and resistance genes in different water sources in the Wuhan section of the Yangtze River. *Environmental Science,* 2023, **44**(4): 2032-2039. [李柏林，张贺，王俊等. 长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价. 环境科学, 2023, **44**(4): 2032-2039.]

[Ⅴ] Qiao Y, Yan ZF, Fong CL *et al*. Applications and differences analysis of several typical models in species sensitivity distribution. *Environment Engineering*, 2021, **39**(10): 85-92. [乔宇，闫振飞，冯承莲等. 几种典型模型在物种敏感度分布中的应用和差异分析. 环境工程, 2021, **39**(10): 85-92.]