

短链 PFASs 在水环境中的分布及毒性效应研究进展

王龙飞^{1,2}, 钱弢炜^{1,2}

(1. 河海大学环境学院; 2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室)

摘要:系统综述了短链全氟和多氟烷基物质(PFASs)在全球水环境多介质中的赋存特征,总结了其在水体、沉积物和水生生物中的分布特征及其毒性效应的研究成果。结果表明:短链 PFASs 因难降解特性和多样来源途径,在全世界水体、沉积物与水生生物中被频繁检出,并在水环境中长期积累;全球水体总 PFASs 质量浓度为 27.5~1550 ng/L,其中短链 PFASs 占比最高达 78.60%,鱼类肝脏中 PFASs 质量比为 2.65~1100 ng/g;对比长链 PFASs,短链 PFASs 生物富集能力更强,在致死浓度上,对相同水生生物的半致死浓度更低,且对低生态位水生生物可产生多种类型的毒性作用。

关键词:短链 PFASs;水环境;水生生物;毒性效应

Research progress on distribution and toxic effects of short-chain PFASs in aquatic environment//Wang Longfei^{1,2}, Qian Taowei^{1,2} (1. College of Environment, Hohai University; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University)

Abstract: A systematic review of domestic and international literature was conducted to summarize distribution characteristics and toxic effects of short-chain per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in water, sediments and aquatic organisms. Short-chain PFASs are widely detected across global water bodies, sediments and aquatic organisms, and tend to accumulate persistently in aquatic environments owing to their recalcitrance and multiple pollution sources. The total mass concentration of PFASs in global water ranges from 27.5 to 1550 ng/L, among which short-chain PFASs account for the highest proportion, reaching 78.60%. The mass ratio of PFASs in fish liver is measured at 2.65~1100 ng/g. Compared with long-chain PFASs, short-chain counterparts possess higher bioaccumulation potential and lower median lethal concentrations toward same aquatic organisms. They also trigger diverse toxic effects on aquatic organisms at lower trophic levels.

Key words: short-chain PFASs; aquatic environment; aquatic organisms; toxicity

全氟和多氟烷基物质(per-and polyfluoroalkyl substances, PFASs)是一类典型新污染物,其化学结构中至少包含一个全氟甲基($-\text{CF}_3$)或全氟亚甲基($-\text{CF}_2$),且全氟碳原子上不连接氢、氯、溴、碘等原子^[1-2]。PFASs 化学性质稳定,凭借优异的防污、耐油、防水等性能,被广泛应用于各类相关产品的生产制造领域^[3-4],其中碳链碳原子数大于或等于 8 的长链 PFASs 及其钠盐、铵盐具有较强的环境持久性、生物累积性与生物毒性^[5-6],已被列入欧盟监管物质候选清单;我国也将以全氟辛基磺酸及其盐类(PFOS 类)、全氟辛酸及其盐类(PFOA 类)为代表的典型长链 PFASs 纳入《重点管控新污染物清单》。

随着全球对长链 PFASs 的管控力度不断加大,毒性相对较低的短链 PFASs(碳链碳原子数为 1~5)逐步成为主流替代品,产量与使用量大幅提

升^[7],现阶段主要替代品包括:作为 PFOS 潜在替代品的全氟丁烷磺酸(PFBS)、6:2 氯化多氟醚磺酸(F-53B)、全氟乙基环乙烷磺酸(PFECHS),以及 PFOA 的潜在替代品六氟环氧丙烷二聚酸(GenX)。

短链 PFASs 半衰期较短,为 3~4 a,低于长链 PFASs 的 5~7 a,因此其生物累积性与环境持久性相对较弱,可在一定程度上减轻长链 PFASs 带来的潜在污染风险^[8]。然而,与长链 PFASs 相比,短链 PFASs 分子更小、水溶性更强,更易发生长距离、大范围的环境迁移,从而提高了其环境暴露风险^[9]。同时,随着短链 PFASs 的广泛应用,大量短链 PFASs 通过生产、使用等环节进入水环境,使其在环境中的检出浓度逐渐升高,分布范围不断扩大,生态环境风险日益加剧^[10]。因此,本文系统总结了近年来短链 PFASs 在水体、沉积物及水生生物体内的分布特征,

基金项目:河海大学大学生创新创业训练国家级项目(202510294028);国家重点研发计划项目(2024YFC3214600)

作者简介:王龙飞(1988—),男,教授,博士,主要从事流域水环境治理与水生态修复研究。E-mail:lfwang@hhu.edu.cn

及其对各种水生生物的毒性效应,旨在为短链 PFASs 的安全替代与风险管控提供科学依据。

1 水环境中短链 PFASs 的分布特征

短链 PFASs 广泛分布于水环境多种介质中。河湖水体的 PFASs 赋存水平可反映流域内 PFASs 的排放特征,并可通过水循环过程汇入海洋;沉积物亦是水环境中富集 PFASs 的重要载体。

1.1 水体中短链 PFASs 质量浓度分布特征

水体中 PFASs 主要来源于污染物直接或间接排放、大气沉降及地表径流等^[11-12]。当前水体中 PFASs 污染问题不容忽视。近年来相关学者针对水体中 PFASs 的赋存特征开展了大量调查研究^[13-25](部分结果见表 1),其质量浓度普遍处于 ng/L 量级。

在我国内陆河湖水体 PFASs 物质分布中,短链 PFASs 为主要组分。赵源等^[13]对比分析了北京郊区凉水河、刺猬河-小清河的水样后发现,两条河流

的 PFASs 组成存在差异,但占比最高的均为短链 PFASs,其中凉水河以全氟丁酸(PFBA)为主,刺猬河-小清河以全氟戊酸(PFPeA)为主;受水体稀释与降解作用影响,河流中 PFASs 总浓度沿水流方向逐步降低。高珂等^[14]同样证实,黄河水体中短链 PFASs 占主导地位,短链全氟丁基磺酸(PFBS, 1.1~34.8 ng/L)与短链 PFBA(4.0~33.1 ng/L)的总质量浓度已经超过长链 PFOA(6.3~36.0 ng/L)。An 等^[15]对 2018—2019 年太湖流域西北地区 PFASs 污染变化进行追踪,结果显示,占比最高的短链全氟己基磺酸(PFHxS)质量浓度明显下降,占比由 41.8%降至 33.5%。

近岸海域是陆源污染物的重要汇集区域,我国近海水体中已普遍检出短链 PFASs。Cai 等^[17-18]分别于 2014—2015 年、2017 年对福建漳州九龙江河口 PFASs 开展监测,结果表明,受 PFBA 替代效应的影响,旱季水体中占比最高的 PFASs 已从

表 1 代表性水体中 PFASs 检出情况

Table 1 Detection of PFASs in representative water bodies

地点	年份	PFASs 总质量浓度/(ng/L)	PFASs 平均质量浓度/(ng/L)	主要物质	主要物质质量浓度/(ng/L)	主要物质质量浓度占比/%	参考文献
长江	2014		52.6	短链 PFPeA 短链 PFHxA		36.5~50.3 21.7~30.7	[16]
太湖流域西北	2018	45.22~1563.00		长链 PFHxS		41.8	[15]
	2019	30.45~1102.00		长链 PFHxS		33.5	
九龙江河口	2014—2015	3.1~110.00		旱季长链 PFOS		33	[17]
				旱季短链 PFHxA		47	
		雨季短链 PFPeA		52			
	2017	0.19~98.00		旱季短链 PFBA 雨季短链 PFBS		37 43	[18]
上海市崇明岛周缘地区	2024	43.50~108.00		长链 PFOA	17		[19]
				短链 PFHxA	14.9		
				短链 PFBA	11.4		
太浦河	2022	11.27~168.62		短链 PFBA	24.92		[20]
				长链 PFOA	28.18		
凉水河		0~62.70		短链 PFBA	39.7		[16]
				短链 PFHxA	17.8		
				长链 PFOA	17.3		
刺猬河-小清河		0~93.10		短链 PFPeA	36.6		[16]
				长链 PFUnDA(全氟十一烷酸)	34.1		
				长链 PFDoDs(全氟十二磺酸)	27.1		
辽东湾	2018		124	短链 PFCAs		62	[21]
渤海湾	2018		81.4	短链 PFCAs		50	[21]
莱州湾	2018		1550	短链 PFCAs		31	[21]
韩国西海岸	2018		36.2	短链 PFCAs		77	[21]
孟加拉国达卡	2020	13~42		短链 PFBA	1.6~15		[22]
				短链 PFHxA	1.8~8.1		
印度南部河流	2014—2015			短链 PFHxA	0.929		[23]
				短链 PFBS	0.674		
安大略湖	2008			长链 PFOS	6.01		[24]
				短链 PFBA	2.8		
	2015		长链 PFOS	2.69		[24]	
地中海地区	2010			长链 PFOA	20.3		[25]
				短链 PFBA	19.5		

2014年的长链PFOS转变为2017年的短链PFBA。王先进^[19]对上海市崇明岛周边地区进行调查,发现该区域主要污染物为长链PFOA、短链全氟己酸(PFHxA)与短链PFBA,污染物主要来源于周边工业园区。张红霞等^[20]研究表明,太浦河水体中短链PFASs的质量浓度与检出率明显高于长链PFASs,其中PFHxA、PFBA、L-PFBS(直链全氟丁烷磺酸)3类短链物质合计占比46.45%,污染贡献度呈明显上升趋势。

此外,其他国家和地区水环境中短链PFASs污染同样应予以重视。Shi等^[21]对中韩沿海4个地区开展研究,发现短链全氟烷基羧酸(PFCAs)均为当地PFASs的主要成分,占比分别为62%、50%、31%、77%,占比差异主要归因于区域工业结构及短链PFASs替代程度不同。与过去10年相比,上述区域PFASs总质量浓度有所降低,且韩国河口短链PFASs占比的增长幅度高于我国沿海区域。Morales-McDevitt等^[22]研究显示,孟加拉国达卡地区PFBA占比最高,这与当地纺织行业普遍改用短链PFASs密切相关。印度南部河流共检出12种PFASs,其中短链PFHxA与PFBS质量浓度最高^[23]。此外,加拿大地表水^[24]及五大湖水域^[25]的监测结果显示,近年来,该区域短链PFASs浓度显著上升,而长链PFASs则呈下降趋势。

以全球视角来看,河湖水体中短链PFASs质量浓度占总PFASs质量浓度的比例为17.35%~78.6%。空间分布特征来看,人类活动越频繁的区域,短链PFASs质量浓度越高,其中短链PFBA在全球范围内检出最频繁、浓度水平较突出,是需重点关注的污染物。

1.2 沉积物中短链PFASs含量分布特征

沉积物是PFASs重要的蓄积载体,可吸附并积累有机污染物,是地表水中PFASs的持续来源^[26-27],沉积物中PFASs的监测能够促进污染物多元来源的识别^[28]。

表2总结了典型水环境沉积物中PFASs的分布情况^[29-34]。一般来说,沉积物更易富集长链PFASs,而短链PFASs因水溶性较强难以被固相吸附,即PFASs碳链长度与其在沉积物中的吸附能力呈正相关关系。例如,福建九龙江河口沉积物中PFASs的总浓度近年来呈增长趋势,且均以长链PFOS、PFOA为主(2014—2015年PFOA(干重)质量比为0.12~0.83 ng/g,PFOS 0.02~0.95 ng/g;2017年PFOS占比25%)^[17,35],区域内港口、污水处理厂、机场及交通运输行为,是造成二者浓度偏高的主要原因,该结论与国内部分地区的研究结果一致,即长链PFASs在太浦河^[20]、长江^[36]、渤海湾^[29]、韩国^[37]、美国新泽西州^[30]等地区的沉积物中

表2 沉积物中PFASs含量分布

Table 2 Distribution of PFASs contents in sediments

地点	年份	PFASs 总质量比/(ng/g)	主要物质	主要物质质量比/(ng/g)	主要物质占比/%	参考文献
长江	2019	0.058~0.89	长链PFOS	0.056		[29]
			长链PFOA	0.034		
黄河			短链PFBA	7.9~54.3		[14]
			长链PFOA	2.8~27.2		
			长链PFHpA	0.9~9.4		
			短链PFHxA	0.6~8.4		
九龙江河口	2017	3.0~5.4	长链PFOS		25	[17]
	2014—2015	0.24~1.9	长链PFOA	0.12~0.83		[18]
太浦河	2022	2.36~4.73	长链PFUdA	0.78		[20]
			长链PFDoA	0.52		
渤海湾	2017	2.69~25.0	长链PFOA	0.436~18.9		[29]
			长链PFOS	0.682~5.50		
韩国沿海	2018	0.045~1.13	长链PFOA	>0.005~0.513		[3]
			长链PFOS	>0.005~0.330		
美中新泽西州	2015—2016	0~30.9	长链PFOS	>0.24~27.1		[30]
			长链PFOAng/g	>0.09~0.4		
珠江口	2009—2011	0.79(平均值)	短链PFBS	0.43		[31]
			短链PFHxS	0.19		
骆马湖	2020	2.22~9.55	短链PFBA	1.15~7.93		[32]
捷克摩拉瓦河	2007—2008	0.3~6.8	短链PFHxS 均值	0.53		[33]
			短链PFBS 均值	0.47		
红海		0.57~2.66	长链PFOS		53~98	[34]
			短链PFBA		45~60	

占据主导地位。

但已有研究表明,部分短链 PFASs 具备与长链 PFASs 相似的吸附潜力^[38],随着短链 PFASs 作为替代品的产能提升,加之相关前体物发生转化降解,部分区域沉积物中短链 PFASs 浓度显著升高,并在介质中成为主导成分。以珠江口^[31]为例,短链 PFBS 和短链 PFHxS 是沉积物中 PFASs 最主要的成分,占比分别为 54.43%、24.05%。骆马湖与黄河沉积物中检出的 PFASs 均以短链 PFBA 浓度最高^[15,32]。杨洪法等^[39]研究发现,环黄渤海地区的沉积物中,长链 PFOS 对 PFASs 的贡献率逐渐减少,逐渐显现短链 PFASs 的优势地位。国外也有相似的研究结果,如捷克摩拉瓦河^[33];此外,在红海^[34]沉积物中,短链 PFBA 为区域第二大 PFASs 组分。

从全球来看,河湖沉积物中仍以长链 PFASs 为主要组分。短链 PFASs 吸附性能偏弱,难以在沉积物中大量累积,其质量比(干重)整体处于 0~1 ng/g。

1.3 PFASs 来源分析

已有研究表明^[20,34],污水处理厂是短链 PFASs 的主要来源,而工业园区排污与航运活动是长链 PFASs 的主要来源,同时也有较多短链 PFASs 分布。相较于长链 PFASs,水环境中短链 PFASs 的来源更为复杂,主要存在 3 种潜在途径:①短链 PFASs 逐渐替代长链 PFASs,其生产量不断增长,生产排放成为短链 PFASs 的主要来源;②长链 PFASs 慢速降解的中间产物包含多种短链 PFASs^[7,40];③污水处理厂出水含有的微塑料等颗粒污染物可吸附短链 PFASs,成为短链 PFASs 的载体,从而造成短链 PFASs 与微塑料两种新污染物的复合污染^[41],同时,随着环境条件的变化,短链 PFASs 与微塑料发生吸附与解吸,也成为其污染的来源之一。

综上,短链 PFASs 的生产与应用规模不断扩大,其在水体和沉积物中占比逐步提升,部分河段短链 PFASs 浓度占比已超过 50%。短链 PFASs 的来源途径广泛,既可来自人工直接生产排放,也可由长链 PFASs 降解转化生成,其水溶性强的特质使其具备良好的扩散能力,微塑料作为载体又可进一步加大其扩散范围。由此可见,来源广泛、迁移性强的特点,促使短链 PFASs 在水环境中分布更广、浓度持续上升,大幅提升了水生生物的暴露概率与接触范围,是水环境中水生生物重要的潜在威胁。

2 短链 PFASs 对水生生物的生态毒理效应

2.1 水生生物体内短链 PFASs 的分布特征与富集效应

水环境中的 PFASs 可被水生生物摄取,进而沿

食物链传递并在生物体内富集。探究短链 PFASs 在不同生物体内及组织中的分布特征,可为阐明其生物富集规律、营养转移路径与潜在毒性效应提供重要依据。

PFASs 疏水性存在差异,致使其在生物不同组织中的浓度各不相同。Wang 等^[35]测得九龙江河口鱼类肌肉与肝脏中 PFASs 质量比(湿重)分别为 25~100、35~1100 ng/g,蛋白质含量丰富的肝脏是 PFASs 的主要蓄积部位。太湖流域鱼类样本也得到相似结论,其肝脏组织中的长链全氟烷基酸(PFAAs)质量比(湿重)最高,为 107~481 ng/g^[42]。部分研究表明,PFASs 碳链长度会影响其环境蓄积能力和持久性,即长链 PFASs 的生物浓缩能力较强,而短链与中链 PFASs 相对稍弱^[43]。

也有研究指出,部分水生生物体内短链 PFASs 呈现高含量、高占比特征。短链全氟戊基磺酸(PFPeS)和 PFBA 是重庆市淡水鱼体内主要的 PFASs 污染物,平均质量比(湿重)分别为 0.67、0.54 ng/g,分别占总 PFASs 的 23.0%和 18.6%^[44]。广州市售海产品与贝类中,短链 PFBA(3 ng/g)、PFHxA(6.46 ng/g)检出质量比(湿重)最高^[45];南海贝类样品中 PFBA 占总 PFASs 的 54.3%^[46]。刘承友等^[47]对辽宁大伙房水库 4 种鱼类开展检测,发现肌肉组织中短链全氟丙烯酸(PFPA)质量比(湿重)范围为 1.64~2.17 ng/g,占 PFASs 总含量的比例均超过 80%;张敏等^[48]的研究同样证实,辽宁省鱼类体内短链 PFASs 检出率偏高,其中 PFBA 是主要污染物,其主要来源于金属电镀厂和皮革加工等行业。可见,PFBA 是我国水生生物体内普遍检出的 PFASs 种类,反映该物质具备较强的生物富集潜力。

此外,生物食性与生理机能的差异,也是造成不同区域主要检出污染物不同的原因。由表 3 可见,红海长吻银鲈肝脏中 PFBS 质量比(湿重)最高^[34],荷兰比目鱼肌肉中短链全氟丁烷磺酰胺(FBSA)质量比(湿重)仅次于 PFOS^[49]。综上,不同水生生物及组织中的检测结果,证实了短链 PFASs 存在明显的富集效应,其较强的蓄积能力与难降解特性,是生物体内该类物质检出浓度偏高的重要原因。

生物富集是评价污染物对生物体潜在毒性的重要指标。当生物富集因子 $F > 5000$ (或 $\lg F > 3.7$) 时,表明该物质生物富集效应显著^[50]。短链 GenX 是 PFOA 的主要替代品^[51]。杨思远等^[52]研究发现,GenX 是鱼类最主要的富集物质, $\lg F$ 达 4.14,显示出较高的生物富集能力。GenX 具有疏水性,易与生物体内蛋白质结合,在生物富集中发挥了关键作用。

研究发现,PFOS 的主要替代品,即 F-53B,在

表3 不同地区短链 PFASs 的生物积累

Table 3 Bioaccumulation of short-chain PFASs in different regions

地区	生物物种	主要物质	主要物质 质量比/(ng/g)
荷兰	比目鱼		80.12
红海	长吻银鲈		2.65
重庆市	淡水鱼	短链 PFPeS	0.67
		短链 PFBA	0.54
广州市与 南海区域	海珍品 & 贝类	短链 PFBA	3
		短链 PFHxA	6.46
辽宁大伙 房水库	鱼类	短链 PFPeS	0.67
		短链 PFHxA	0.54
太湖藻类	鱼类	短链 PFASs	107~481
九龙河河口	鱼类	肌肉 PFASs	25~100
		肝脏 PFASs	35~1100

斜生栅藻中的 $\lg F$ 为 4.66, 显著高于已报道的淡水浮游生物体内 PFOS 的 $\lg F$ (2.2~3.2), F-53B 在藻类体内富集后, 可能引发其在水生食物链中的生物放大效应^[53]。湖北汤逊湖鲫鱼体内检测结果显示, F-53B 的 $\lg F$ 值也明显高于 PFOS (分别为 4.322 和 3.279)^[54]。但 Cheng 等^[55] 研究发现, 海鱼体内 F-53B 和 PFOS 的 $\lg F$ 无显著差异 (平均值分别为 3.1、3.4), 说明海鱼对短链和长链 PFASs 均有一定的富集潜力, 不同物种对 PFASs 的富集能力存在差异。Li 等^[56] 指出, 双壳类动物体内短链 PFBS、PFHxS 与长链 PFOA 的 $\lg F$ 相似, 平均值分别为 1.61、1.65、1.44。双壳类动物对 PFASs 的富集能力较弱, 但对短链 PFASs 的富集潜力略高于长链。

以上结果说明, 短链 PFASs 的取代政策对降低环境风险在一定程度上并未达到预期效果。已有部分生物体能够对短链 PFASs 展现更好的生物富集效应, 亟待确认该生物富集效应能否通过食物链放大, 并产生更强的毒性效应。当前, 已有研究较深入地探讨了短链 PFASs 在不同生物体内富集后的毒性效应, 对评估短链 PFASs 的潜在环境影响起到关键作用。

2.2 短链 PFASs 对水生生物毒性效应

2.2.1 短链 PFASs 对藻类的毒性效应

微藻是水生生态系统的基础生产者, 评估短链 PFASs 对微藻的毒性影响, 对预测其在整个生态系统的潜在危害具有重要意义。研究表明, 短链 PFASs 主要通过造成生理生化损伤对微藻产生毒害, 具体表现为破坏光合系统、诱导氧化应激以及扰乱能量代谢等。

短链 PFASs 可显著干扰藻细胞的光合作用。Li 等^[56] 开展了为期 12 d 的毒理试验, 探究了 GenX 与 PFOA 对小球藻的影响, 基因分析结果显示, 两种物质均会下调与光合蛋白及碳固定途径相关基因的表

达, 影响了小球藻的光合活性。Zhang 等^[57] 指出, PFBS 和 PFOS 均会造成叶绿素 a 含量下降, 减弱微藻的光合作用能力。

活性氧 (ROS) 的过量产生会导致氧化应激, 这也是短链 PFASs 对微藻的主要毒性机制之一。Li 等^[58] 发现, PFBS 暴露会使铜绿微囊藻体内 ROS 水平显著升高, 进而诱发氧化应激反应, 损伤 DNA、蛋白质等细胞成分, 最终抑制其细胞生长。F-53B 暴露同样会对小球藻造成氧化损伤, 并影响超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 和过氧化物酶 (POD) 等氧化应激生物标志物^[59]。

短链 PFASs 还会引起微藻能量代谢失调。Liu 等^[60] 通过京都基因与基因组百科全书 (Kyoto encyclopedia of genes and genomes, KEGG) 分析发现, GenX 暴露影响了小球藻的 N-代谢、DNA 复制和 RNA 转运等生命代谢过程; 同时, ROS 的大量生成, 破坏了包括光系统 II (PS II) 相关蛋白在内的多种细胞功能物质, 损害了小球藻光合系统。此外, 部分短链 PFASs 对微藻的毒性作用可能高于长链 PFASs。研究表明, F-53B 对斜生栅藻的半抑制质量浓度 (IC_{50}) 为 40.3 mg/L^[52], 而 PFOS 对该藻种的 IC_{50} 为 77.8 mg/L^[61], 可见 F-53B 对藻类生长的损害更加严重。Zhang 等^[57] 的试验结果也印证了该结论: 暴露 4 d 后, PFBS 对小球藻的半最大效应质量浓度 (EC_{50}) 值为 103.19 mg/L, 低于 PFOS 的 118.85 mg/L, 显示出 PFBS 具有更高的毒性。作为初级生产者, 微藻不可避免地受到水环境中广泛存在的短链 PFASs 的威胁, 尤其是长期暴露于低浓度短链 PFASs 的情况, 其潜在的生态毒理学效应及生物积累的影响亟须进行更为深入的研究。

2.2.2 短链 PFASs 对斑马鱼的毒性效应

水环境是 PFASs 重要的蓄积场所, 短链 PFASs 对初级生产者的生物毒性已得到充分证实, 该类化学物质经直接接触及食物链传递, 对各类水生生物造成了危害。作为水生生态系统的小型脊椎动物, 斑马鱼为研究 PFASs 毒性效应的典型模式生物。

短链 PFASs 可能会对斑马鱼的生长发育产生不良影响。Shi 等^[62] 研究发现, F-53B 暴露可能引起斑马鱼胚胎孵化延迟、存活率下降, 并引发脊柱弯曲、尾畸形、鱼鳔未充气等形态改变, 具有一定的致畸性。Gebreab 等^[63] 同样发现 GenX 会损害斑马鱼的发育与运动能力, 并诱发一系列发育畸形, 其毒性效应与 PFOA 类似, 鱼卵绒毛膜可对污染物摄取起到屏障作用。短链 PFASs 还可引发斑马鱼的器官损伤, 如肝脏因承担解毒功能而成为污染物主要作用靶点。支链/芳香氨基酸 (BCAA/AAA) 是公认的

体外肝损伤评价指标, GenX 暴露会导致斑马鱼体内 BCAA/AAA 水平显著下降;同时,与肝脏解毒有关的谷胱甘肽(GSH)浓度降低,该现象可能与线粒体损伤介导的氧化应激有关^[61]。Ulhaq 等^[64]发现,短链 PFHxS 会显著加重斑马鱼肝脏的病变;转录组分析表明,肝脏的胰岛素抵抗在短链 PFHxS 诱发的非酒精性脂肪性肝病进程中发挥了重要作用。

心脏是斑马鱼胚胎早期最先行使功能的器官之一, Shi 等^[62]研究发现, F-53B 对斑马鱼心血管系统具有严重毒性,可造成心跳频率降低、心囊水肿,并抑制心脏发育相关基因的表达。Hu 等^[65]发现,质量浓度为 10 μg/L 的 PFBS 暴露会降低斑马鱼脂质含量,诱发肠道微生物菌群失调与胆汁淤积。神经功能障碍也是短链 PFASs 暴露的另一种表现。如 GenX 暴露可使斑马鱼体内与代谢相关的神经递质谷氨酸和 γ-氨基丁酸,以及与神经细胞相关的 N-乙酰天门冬氨酸浓度显著下降,进而扰乱碳水化合物和氨基酸等代谢过程^[63]。多组学分析结果显示, PFBS 的神经毒性与氧化应激、脂质代谢及糖酵解/糖生成有关,且毒性机制不受碳链长度影响^[66]。

短链 PFASs 也会对斑马鱼产生生殖毒性并对下一代产生影响。Shi 等^[67]在斑马鱼性腺中检出 F-53B,该物质造成与脂质转运、脂肪酸氧化等过程相关的基因转录水平改变,损害了 F0、F1 代斑马鱼的代谢过程。相关研究也证实了短链 PFASs 的免疫毒性:Tang 等^[68]将胚胎斑马鱼暴露于 PFBA 环境后,体内巨噬细胞和中性粒细胞被显著诱导,机体抗菌能力下降、死亡率上升,多项免疫功能的生物标志物指标也出现明显异常。此外, Wang 等^[69]测得 F-53B 和 PFOS 对斑马鱼的 96 h 半致死质量浓度分别为 15.5、17.0 mg/L, F-53B 的毒性略强。综上,短链 PFASs 对斑马鱼的毒性效应不可忽视,主要体现在发育毒性、器官毒性、生殖毒性、神经毒性及免疫毒性等方面。

2.2.3 短链 PFASs 对其他水生生物的毒性效应

除上述两类生物外,其他水生生物同样在生态系统物质循环与能量流动关键环节中扮演重要角色。研究表明,其他水生生物也会受到短链 PFASs 的干扰。PFPeA、PFHxA 与 PFBA 可扰乱蓼花臂尾轮虫的内分泌系统,造成生长速率降低、繁殖模式改变,并使个体与卵体形态异常增大^[70]。PFBS 对大型蚤的成虫生存、繁殖能力和种群增长率存在持续抑制效应,且该负面影响持续六代恶化^[71]。PFHxA 在慢性暴露与急性暴露下均会导致大型蚤死亡^[72]。PFBA 和 PFBS 在高质量浓度暴露 (PFBA 1.37 mg/L、PFBS 277.30 mg/L) 时会引起多齿新米

虾的氧化应激,损害生物膜结构,导致蛋白质变性并最终造成虾体死亡^[73]。Otero-Sabio 等^[74]开展 PFBA 体外试验,发现 10 μmol/L 与 100 μmol/L 的 PFBA 会造成宽吻海豚皮肤细胞周期紊乱,但细胞增殖能力与活性未出现显著变化。

综上,短链 PFASs 对微藻、蓼花臂尾轮虫、大型蚤等微型水生生物的毒性主要包括破坏光合系统、诱发氧化应激、扰乱能量代谢、干扰内分泌与生殖功能、改变繁殖特征等;对斑马鱼等小型水生生物,可引发发育、脏器、生殖、神经及免疫等多方面损伤;而对宽吻海豚等大型水生生物的影响相对有限,仅会引起海豚皮肤细胞周期失调,对其细胞增殖和活性未发现显著影响。目前,有关短链 PFASs 对水生生物毒性效应的研究缺乏系统性评估,亟须构建完善的研究体系,以深入评估短链 PFASs 对水生生物的影响。

3 结 语

本文总结了短链 PFASs 在全球水环境多介质中的赋存特征,并分析了其在多种水生生物体内的富集与毒性效应。总体而言,短链 PFASs 具有难降解、来源广泛等特点,在多种介质中广泛检出,并在水环境中长期积累,部分水体中其占总 PFASs 比例已超过 50%,辽东湾、渤海湾和韩国西海岸环境中,短链 PFASs 浓度占总 PFASs 的比例分别为 62%、50%、77%。短链 PFASs 可沿水生生物的食物链逐级放大,并在生物体内富集,进而对多种生物产生毒性效应。针对同一水生生物,短链 PFASs 的半致死浓度普遍低于长链 PFASs。短链 PFASs 的毒性随着水生生物所在生态位升高而减小,对微型和小型水生生物的毒性作用类型更为丰富,甚至会干扰其种群良性繁衍,对生态系统基础生物种群造成深远影响。

参考文献:

- [1] 黄显雷. 新污染物的危害与治理[J]. 生态经济, 2023, 39(8): 5-8. (Huang Xianlei. Harms and treatment of emerging pollutants [J]. Ecological Economy, 2023, 39(8): 5-8. (in Chinese))
- [2] 崔后金. 水体环境中新污染物的污染现状及处理方法研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(5): 6-7. (Cui Houjin. Research on pollution status and treatment methods of emerging contaminants in water environment [J]. Leather Making and Environmental Technology, 2024, 5(5): 6-7. (in Chinese))
- [3] Stahl T, Mattern D, Brunn H. Toxicology of perfluorinated compounds[J]. Environmental Sciences Europe, 2011, 23

- (1):38.
- [4] 尹乐陶,陈宣樾,秦占芬.典型PFAS的肝毒性和脂代谢干扰效应研究进展[J].生态毒理学报,2025,20(3):80-92. (Yin Letao, Chen Xuanyue, Qin Zhanfen. Research progress of hepatotoxicity and lipid metabolism disrupting effects of typical pre-and polyfluoroalkyl substances [J]. Journal of Ecological Toxicology, 2025, 20 (3) :80-92. (in Chinese))
- [5] Xue Xinyan, Gao Ning, Xu Fuli. Toxicity of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorobutane sulfonate (PFBS) to *Scenedesmus obliquus*: photosynthetic characteristics, oxidative damage and transcriptome analysis [J]. Environmental Pollution, 2022, 315: 120397.
- [6] Wasel O, Thompson K M, Gao Yu, et al. Comparison of zebrafish in vitro and in vivo developmental toxicity assessments of perfluoroalkyl acids (PFAAs) [J]. Journal of Toxicology and Environmental Health: Part A, 2021, 84 (3) : 125-136.
- [7] 程静,梁光愉,冯雯凤,等.水环境中短链全氟及多氟烷基化合物污染水平及其处理技术研究进展[J].环境化学,2024,43(12):4022-4043. (Cheng Jing, Liang Guangyu, Feng Wenfeng, et al. Advances in pollution levels and treatment technologies of short chain per-and polyfluoroalkyl substances in aquatic environment [J]. Environmental Chemistry, 2024, 43 (12) : 4022-4043. (in Chinese))
- [8] Carlson G L, Tupper S. Ski wax use contributes to environmental contamination by per-and polyfluoroalkyl substances [J]. Chemosphere, 2020, 261 : 128078.
- [9] Ateia M, Maroli A, Tharayil N, et al. The overlooked short- and ultrashort-chain poly- and perfluorinated substances: a review [J]. Chemosphere, 2019, 220: 866-82.
- [10] Gagliano E, Sgroi M, Falciglia P P, et al. Removal of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) from water by adsorption: role of PFAS chain length, effect of organic matter and challenges in adsorbent regeneration [J]. Water Research, 2020, 171: 115381.
- [11] 黄柳青,王雯冉,张浴瞳,等.地表水中全氟及多氟烷基化合物(PFASs)的污染现状研究进展[J].环境化学,2024,43(3):693-710. (Huang Liuqing, Wang Wenran, Zhang Yutong, et al. Research progress on the pollution status of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in surface water: a review [J]. Environmental Chemistry, 2024, 43 (3) :693-710. (in Chinese))
- [12] Xia Chunjie, Capozzi S L, Romanak K A, et al. The ins and outs of per-and polyfluoroalkyl substances in the great lakes: the role of atmospheric deposition [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58 (21) : 9303-9313.
- [13] 赵源,杨红菊,温雅君,等.京郊典型河流农用水中全氟化合物赋存特征、源解析及生态风险评估[J].农业资源与环境学报,2024,41(2):392-400. (Zhao Yuan, Yang Hongju, Wen Yajun, et al. Characteristics, sources, and risk assessment of perfluorinated compounds in agricultural water of typical rivers in suburban Beijing [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41 (2) :392-400. (in Chinese))
- [14] 高珂,辛晓东,刘红,等.超高效液相色谱-三重四极杆质谱联用仪测定环境水相和沉积物中19种全/多氟烷基化合物[J].净水技术,2024,43(8):61-69. (Gao Ke, Xin Xiaodong, Liu Hong, et al. Determination of 19 PFASs compounds in environmental water and sediments with ultra high performance liquid chromatography-triple quadrupole mass spectrometry [J]. Water Purification Technology, 2024, 43 (8) :61-69. (in Chinese))
- [15] An Wenkai, Duan Lei, Zhang Yizhe, et al. Occurrence, spatiotemporal distribution, seasonal and annual variation, and source apportionment of poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) in the northwest of Tai Lake Basin, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 416: 125784.
- [16] 张杰,赵璞君,夏星辉.河流不同分子量溶解性有机质对全氟化合物赋存形态的影响[J].环境科学研究,2022,35(9):2058-2066. (Zhang Jie, Zhao Pujun, Xia Xinghui. Effects of different molecular weight dissolved organic matter on occurrence form of polyfluoroalkyl substances in river [J]. Environmental Science Research, 2022, 35 (9) :2058-2066. (in Chinese))
- [17] Cai Yizhi, Wang Xinhong, Wu Yuling, et al. Temporal trends and transport of perfluoroalkyl substances (PFASs) in a subtropical estuary: Jiulong River Estuary, Fujian, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 263-270.
- [18] Wang Siqian, Ma Liya, Chen Can, et al. Occurrence and partitioning behavior of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in water and sediment from the Jiulong Estuary-Xiamen Bay, China [J]. Chemosphere, 2020, 238: 124578.
- [19] 王先进.崇明岛周缘地表水中全氟化合物的分布特征[J].当代化工研究,2025(10):122-124. (Wang Xianjin. Distribution characteristics of perfluoroalkyl compounds (PFCs) in surface water around Chongming Island [J]. Contemporary Chemical Research, 2025 (10) : 122-124. (in Chinese))
- [20] 张红霞,张洪昌,胡双庆,等.太浦河水体和沉积物中24种全氟化合物分布特征[J].环境化学,2024,43(3):722-733. (Zhang Hongxia, Zhang Hongchang, Hu Shuangqing, et al. Distribution characteristics of 24 perfluorocarbons in Taipu River and sediments [J]. Environmental Chemistry, 2024, 43 (3) : 722-733. (in Chinese))
- [21] Shi Bin, Wang Tiejyu, Yang Hongfa, et al. Perfluoroalkyl acids in rapidly developing coastal areas of China and

- South Korea: spatiotemporal variation and source apportionment [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 761:143297.
- [22] Morales-McDevitt M E, Dunn M, Habib A, et al. Poly- and perfluorinated alkyl substances in air and water from Dhaka, Bangladesh [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2022, 41(2):334-342.
- [23] Selvaraj K K, Murugasamy M, Nikhil N P, et al. Investigation of distribution, sources and flux of perfluorinated compounds in major southern Indian rivers and their risk assessment [J]. *Chemosphere*, 2021, 277: 130228.
- [24] Lalonde B, Garron C. Perfluoroalkyl substances (PFASs) in the Canadian freshwater environment [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2022, 82(4):581-591.
- [25] Gewurtz S B, Bradley L E, Backus S, et al. Perfluoroalkyl acids in great lakes precipitation and surface water (2006-2018) indicate response to phase-outs, regulatory action, and variability in fate and transport processes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(15): 8543-8552.
- [26] Campo J, Pérez F, Masiú A, et al. Perfluoroalkyl substance contamination of the Llobregat River ecosystem (Mediterranean area, NE Spain) [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 503-504:48-57.
- [27] 陆卞和, 王沛芳, 钱进, 等. 农田生态系统中新污染物的生态环境效应与去除技术研究 [J]. *水资源保护*, 2025, 41(3):244-254. (Lu Bianhe, Wang Peifang, Qian Jin, et al. Research on ecological and environmental effects and removal technologies of emerging contaminants in agricultural ecosystems [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(3):244-254. (in Chinese))
- [28] Guo Rui, Megson D, Myers A L, et al. Application of a comprehensive extraction technique for the determination of poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) in Great Lakes Region sediments [J]. *Chemosphere*, 2016, 164: 535-546.
- [29] Liu Yunqing, Zhang Ying, Li Jiafu, et al. Distribution, partitioning behavior and positive matrix factorization-based source analysis of legacy and emerging polyfluorinated alkyl substances in the dissolved phase, surface sediment and suspended particulate matter around coastal areas of Bohai Bay, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 246:34-44.
- [30] Goodrow S M, Ruppel B, Lippincott R L, et al. Investigation of levels of perfluoroalkyl substances in surface water, sediment and fish tissue in New Jersey, USA [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 729: 138839.
- [31] Gao Yan, Fu Jianjie, Meng Mei, et al. Spatial distribution and fate of perfluoroalkyl substances in sediments from the Pearl River Estuary, South China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 96(1):226-234.
- [32] 黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 等. 骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估 [J]. *环境科学*, 2022, 43(7):3562-3574. (Huang Jiahao, Wu Wei, Huang Tianyin, et al. Characteristics, sources, and risk assessment of perfluoroalkyl substances in surface water and sediment of Luoma Lake [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(7):3562-3574. (in Chinese))
- [33] Bečanová J, Komprdová K, Vrana B, et al. Annual dynamics of perfluorinated compounds in sediment: a case study in the Morava River in Zlín District, Czech Republic [J]. *Chemosphere*, 2016, 151:225-233.
- [34] Ali A M, Sanden M, Higgins C P, et al. Legacy and emerging per- and polyfluorinated alkyl substances (PFASs) in sediment and edible fish from the Eastern Red Sea [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 280:116935.
- [35] Wang Siqun, Cai Yizhi, Ma Liya, et al. Perfluoroalkyl substances in water, sediment, and fish from a subtropical river of China: environmental behaviors and potential risk [J]. *Chemosphere*, 2022, 288:132513.
- [36] Li Tianyi, Chen Yulin, Wang Yile, et al. Occurrence, source apportionment and risk assessment of perfluorinated compounds in sediments from the longest river in Asia [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 467:133608.
- [37] Lee J W, Lee H K, Lin J E, et al. Legacy and emerging per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the coastal environment of Korea: occurrence, spatial distribution, and bioaccumulation potential [J]. *Chemosphere*, 2020, 251: 126633.
- [38] Guelfo J L, Higgins C P. Subsurface transport potential of perfluoroalkyl acids at aqueous film-forming foam (AFFF)-impacted sites [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(9):4164-4171.
- [39] 杨洪法, 史斌, 周云桥, 等. 中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险 [J]. *环境科学*, 2020, 41(4):1607-1618. (Yang Hongfa, Shi Bin, Zhou Yunqiao, et al. Spatial characteristics and ecological risks of perfluoroalkyl substances in coastal urbanized areas of China and South Korea [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(4):1607-1618. (in Chinese))
- [40] 侯俊, 许晓雅, 程芳, 等. 微塑料与有机污染物的相互作用及环境行为研究进展 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(1):22-28. (Hou Jun, Xu Xiaoya, Cheng Fang, et al. Research progress on interaction and environment behavior between microplastics and organic pollutants [J]. *Journal of Hohai University (Natural Science)*, 2020, 48(1):22-28. (in Chinese))
- [41] Ma Min, Coulon F, Tang Zhiwen, et al. Unveiling the truth of interactions between microplastics and per-and

- polyfluoroalkyl substances (PFASs) in wastewater treatment plants: microplastics as a carrier of PFASs and beyond [J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(4):2211-2221.
- [42] Chen Meng, Zhu Lingyan, Wang Qiang, et al. Tissue distribution and bioaccumulation of legacy and emerging per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in edible fishes from Taihu Lake, China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 268:115887.
- [43] Liu Ruolin, Liu Mei, Zhao Chuxuan, et al. Occurrence and health risk of perfluoroalkyl acids in popular shellfish from a typical coastal area of the East China [J]. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2023, 39(3):492-501.
- [44] 张敏. 全氟化合物及其替代品在淡水鱼类中的累积放大特征和健康风险评估 [D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2023.
- [45] 王旭峰, 王强, 黎智广, 等. 广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价 [J]. *环境科学*, 2019, 40(4):1931-1938. (Wang Xufeng, Wang Qiang, Li Zhiguang, et al. Contamination characteristics and safety risk assessment of perfluorinated alkylated substances in aquatic products from Guangzhou [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(4):1931-1938. (in Chinese))
- [46] Wang Xufeng, Mo Mengsong, Chen Haigang, et al. Distribution and exposure risk assessment of perfluorinated alkyl substances in aquatic products along the coastal region of the South China Sea [J]. *Exposure and Health*, 2021, 13(3):505-515.
- [47] 刘承友, 刘金林, 郭婧, 等. 大伙房水库多介质中全氟化合物赋存特征、源解析及健康风险评估 [J]. *环境监控与预警*, 2022, 14(5):133-142. (Liu Chengyou, Liu Jinlin, Guo Jing, et al. Characteristics, sources and risk assessment of polyfluoroalkyl substances in multi-media of Dahuofang Reservoir [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2022, 14(5):133-142. (in Chinese))
- [48] 张敏, 蔡丹, 陈小霞, 等. 辽宁省鱼类水产品中全氟化合物及其替代品的污染特征与健康风险评估 [J]. *环境化学*, 2024, 43(7):2224-2235. (Zhang Min, Cai Dan, Chen Xiaoxia, et al. Contamination characteristics and health risk assessment of poly-and perfluoroalkyl substances and alternatives in fish from Liaoning Province [J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(7):2224-2235. (in Chinese))
- [49] Chu Shaogang, Letcher R J, Mcgoldrick D J, et al. A new fluorinated surfactant contaminant in biota: perfluorobutane sulfonamide in several fish species [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(2):669-675.
- [50] Munoz G, Mercier L, Duy S V, et al. Bioaccumulation and trophic magnification of emerging and legacy per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in a St. Lawrence River food web [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 309:119739.
- [51] 李厚禹, 徐艳, 谭璐, 等. 多介质土壤渗滤系统去除农村污水中典型污染物的研究进展 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(4):156-165. (Li Houyu, Xu Yan, Tan Lu, et al. Research progress on removal of typical pollutants from rural sewage by multi-media soil infiltration system [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4):156-65. (in Chinese))
- [52] 杨思远, 刘建超, 陆光华, 等. 不同尾水接纳河流中 PFASs 的赋存特征、生物累积及生态风险 [J]. *环境科学*, 2025, 46(8):5082-5091. (Yang Siyuan, Liu Jianchao, Lu Guanghua, et al. Occurrence characteristics, bioaccumulation, and ecological risk of PFASs in rivers receiving different effluents [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(8):5082-5091. (in Chinese))
- [53] Liu Wei, Li Jingwen, Gao Lichen, et al. Bioaccumulation and effects of novel chlorinated polyfluorinated ether sulfonate in freshwater alga *Scenedesmus obliquus* [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 233:8-15.
- [54] Shi Yali, Vestergren R, Zhou Zhen, et al. Tissue distribution and whole body burden of the chlorinated polyfluoroalkyl ether sulfonic acid F-53B in Crucian Carp (*Carassius carassius*): evidence for a highly bioaccumulative contaminant of emerging concern [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(24):14156-14165.
- [55] Cheng Haixiang, Lyu Chenhai, Li Jianhui, et al. Bioaccumulation and biomagnification of emerging poly-and perfluoroalkyl substances in marine organisms [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851:158117.
- [56] Li Yanyao, Liu Xianglin, Zheng Xiaowei, et al. Toxic effects and mechanisms of PFOA and its substitute GenX on the photosynthesis of *Chlorella pyrenoidosa* [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 765:144431.
- [57] Zhang Liangliang, Zheng Xiaowei, Liu Xianglin, et al. Toxic effects of three perfluorinated or polyfluorinated compounds (PFCs) on two strains of freshwater algae: implications for ecological risk assessments [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, 131:48-58.
- [58] Li Jue, Zhang Liangliang, Li Qihui, et al. Hormetic effect of a short-chain PFBS on *Microcystis aeruginosa* and its molecular mechanism [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 467:133596.
- [59] Niu Zhangguang, Na Jing, Xu Weian, et al. The effect of environmentally relevant emerging per-and polyfluoroalkyl substances on the growth and antioxidant response in marine *Chlorella* sp. [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 252:103-109.

(下转第 250 页)

emissions from municipal wastewater collection and treatment systems [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(6) :2248-2261.

- [48] Guo Shuai, Qian Yu, David Z, et al. Effects of drop structures and pump station on sewer air pressure and hydrogen sulfide: field investigation [J]. Journal of Environmental Engineering, 2018, 144:1336.
- [49] Ren Daheng, Zuo Zhiqiang, Xing Yaxin, et al.

Simultaneous control of sulfide and methane in sewers achieved by a physical approach targeting dominant active zone in sediments [J]. Water Research, 2022, 211: 118010.

- [50] Hou Feng, Liu Shuai, Yin Wanxin, et al. Methane production mechanism and control strategies for sewers: a critical review [J]. Water, 2024, 16(24) :3618.

(收稿日期: 2025 - 08 - 25 编辑: 胡新宇)

(上接第 226 页)

- [60] Liu Xianglin, Li Yanyao, Zheng Xiaowei, et al. Antioxidant mechanisms of *Chlorella pyrenoidosa* under acute GenX exposure [J]. Science of The Total Environment, 2021, 797: 149005.

- [61] Liu Wei, Chen Shuo, Quan Xie, et al. Toxic effect of serial perfluorosulfonic and perfluorocarboxylic acids on the membrane system of a freshwater alga measured by flow cytometry [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, 27(7) :1597 -1604.

- [62] Shi Guohui, Cui Qianqian, Pan Yitao, et al. 6: 2 Chlorinated polyfluorinated ether sulfonate: a PFOS alternative, induces embryotoxicity and disrupts cardiac development in zebrafish embryos [J]. Aquatic Toxicology, 2017, 185:67-75.

- [63] Gebreab K Y, Eeza M N H, Bai T, et al. Comparative toxicometabolomics of perfluorooctanoic acid (PFOA) and next-generation perfluoroalkyl substances [J]. Environmental Pollution, 2020, 265:114928.

- [64] Ulhaq Z S, Tse W K F. PFHxS exposure and the risk of non-alcoholic fatty liver disease [J]. Genes, 2024, 15(1) : 93.

- [65] Hu Chenyan, Liu Mengyuan, Tang Lizhu, et al. Probiotic intervention mitigates the metabolic disturbances of perfluorobutanesulfonate along the gut-liver axis of zebrafish [J]. Chemosphere, 2021, 284:131374.

- [66] Min E K, Lee H, Sung E J, et al. Integrative multi-omics reveals analogous developmental neurotoxicity mechanisms between perfluorobutanesulfonic acid and perfluorooctanesulfonic acid in zebrafish [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 457:131714.

- [67] Shi Guohui, Cui Qianqian, Wang Jinxing, et al. Chronic exposure to 6 : 2 chlorinated polyfluorinated ether sulfonate acid (F-53B) induced hepatotoxic effects in adult zebrafish and disrupted the PPAR signaling pathway in their offspring [J]. Environmental Pollution, 2019, 249: 550-559.

- [68] Tang Liang, Qiu Wenhui, Zhang Shuwen, et al. Poly-and

perfluoroalkyl substances induce immunotoxicity via the TLR pathway in zebrafish; links to carbon chain length [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57 (15) :6139-6149.

- [69] Wang Siwen, Huang Jun, Yang Yang, et al. First report of a Chinese PFOS alternative overlooked for 30 years: its toxicity, persistence, and presence in the environment [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47 (18) : 10163-10170.

- [70] Wang Yujuan, Niu Junfen, Zhang Lilan, et al. Toxicity assessment of perfluorinated carboxylic acids (PFCA) towards the rotifer *Brachionus calyciflorus* [J]. Science of The Total Environment, 2014, 491-492:266-270.

- [71] Xie Ge, Van Gestel C A M, Vonk J A, et al. Multigeneration responses of daphnia magna to short-chain per-and polyfluorinated substances (PFAS) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2025, 294: 118078.

- [72] Barmantlo S H, Stel J M, Van Doorn M, et al. Acute and chronic toxicity of short chained perfluoroalkyl substances to daphnia magna [J]. Environmental Pollution, 2015, 198:47-53.

- [73] 梁宏仪, 杜士林, 张亚辉, 等. 短链全氟化合物 PFBA 和 PFBS 对多齿新米虾急性毒性与氧化应激的研究 [J]. 生态毒理学报, 2024, 19(6) :344-353. (Liang Hongyi, Du Shilin, Zhang Yahui, et al. Acute toxicity of short-chain perfluorinated compounds PFBA and PFBS on *Neocaridina denticulata*: mortality and effects on four biomarkers [J]. Journal of Ecological Toxicology, 2024, 19 (6) :344-353. (in Chinese))

- [74] Otero-Sabio C, Giacomello M, Centelleghé C, et al. Cell cycle alterations due to perfluoroalkyl substances PFOS, PFOA, PFBS, PFBA and the new PFAS C604 on bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) skin cell [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 244: 113980.

(收稿日期: 2025 - 10 - 18 编辑: 胡新宇)