



有机紫外线吸收剂的环境行为及毒性效应

张慧玲^{1,2}, 雷婷¹, 葛茂发^{1,2}, 王伟罡^{1,2*}

1. 中国科学院化学研究所, 北京分子科学国家研究中心, 分子动态与稳态结构实验室, 北京 100190

2. 中国科学院大学, 北京 100049

*通讯作者, E-mail: wangwg@iccas.ac.cn

收稿日期: 2026-01-30; 接受日期: 2026-03-10; 网络版发表日期: 2026-05-29

国家自然科学基金(编号: 42225503, 22321004, 42461160295, 42427802)资助项目

摘要 有机紫外线吸收剂(OUVFs)作为一类广泛应用于个人护理品及工业材料中的功能性化学品, 因其在环境中广泛检出及潜在内分泌干扰效应而备受关注. 已有综述主要关注单一环境介质尤其在水体中的环境行为以及毒性终点, 因此本文从多圈层过程的视角, 综述了OUVFs的主要理化性质及应用场景, 探讨了其在大气、水体、土壤及生物体的赋存特征. 综合现有研究分析了OUVFs的环境行为, 总结了以往较少关注的陆地与大气转化过程. 进一步梳理了OUVFs的生态与健康风险, 指出其不仅对水生动植物具有内分泌干扰效应, 更关键的是对人体健康存在较大的潜在风险, 并且其部分转化产物表现出比母体化合物更高的毒性. 本文旨在整合OUVFs的多介质环境行为及毒性效应, 为全面认知OUVFs的环境及健康风险提供新视角, 并进一步评估了新型天然大分子OUVFs的环境行为及毒性效应, 展望了未来OUVFs分子合成与毒性评价策略.

关键词 有机紫外线吸收剂, 环境行为, 毒性, 转化

1 引言

紫外线(UV)辐射是太阳光谱中除可见光和红外光外的连续电磁辐射光谱的重要组成部分. 通常, 紫外线辐射被分为三个波段: UV-A (315~400 nm)、UV-B (280~315 nm)和UV-C (100~280 nm)^[1]. UV-A辐射几乎完全到达地球表面, 并可以穿透真皮组织作用于黑色素细胞, 导致皮肤早衰甚至引起皮肤癌^[2]. UV-B辐射对高分子材料破坏力很大, 会导致自由基的产生, 从而破坏聚合物的内部结构, 降低其力学性能, 对人体危害更大, 引起皮肤色素沉着、皮肤癌等损伤^[3]. UV-C穿透力弱, 几乎不能穿过大气层到达地面, 但是

人工来源的此类辐射具有很强的致突变和红斑形成特性^[4]. 虽然人类皮肤具有抵抗紫外线辐射的防御机制, 但仅仅可以起到部分保护作用. 为防止紫外线对皮肤及高分子材料的损伤, 增强对紫外线的稳定性, 有机紫外线吸收剂(OUVFs)被广泛应用于个人护理品、纺织品、塑料橡胶等消费品和工业品中^[5].

2024年全球紫外线稳定剂市场规模为15.6亿美元, 预计到2032年将显著增长到24.1亿美元^[6]. 这些化合物主要通过游泳、洗浴、工业废水以及生活污水等以直接或者间接的方式持续排放到生态环境中^[7]. 并且部分具有半挥发性的OUVFs可以通过挥发与冷凝机制在大气环境中与颗粒相界面迁移, 实现长距离输送^[8].

引用格式: Zhang H, Lei T, Ge M, Wang W. Environmental behavior and toxicological effects of organic ultraviolet filters. *Sci Sin Chim*, 2026, 56: 1647–1660, doi: 10.1360/SSC-2026-0029

目前,在大气、水体、土壤、灰尘中都发现了OUVFs的存在^[9~11]。人体可以通过皮肤吸收、饮食摄入以及空气吸入接触OUVFs。近年来,在人体血液、尿液、母乳以及胎盘组织中广泛检测到了OUVFs^[12~14]。

然而,OUVFs分子中的光活性共轭体系以及易被代谢的官能团导致其具有“伪持久性”,在水体中容易发生光解反应以及卤代反应生成消毒副产品^[15],而在生物体内则主要通过细胞色素P450酶系介导的氧化还原反应进行生物转化^[16]。目前对于水体以及生物体的转化研究较为广泛,但是在大气环境中的研究尚处于起步阶段。现已证明BP-3能在气溶胶表面发生光解反应,并且反应速率显著加快^[17]。此外,大气中氧化剂的存在也会驱动OUVFs发生气相及非均相反应^[18]。

随着OUVFs在各种环境以及生物体内的广泛检出,其生态毒性与健康风险引起了广泛的关注^[19,20]。已有研究表明OUVFs对水生植物尤其是珊瑚造成了巨大的威胁,会引起珊瑚白化最终造成珊瑚死亡^[21]。OUVFs具有内分泌干扰性,对生物体和人体的生长发育具有不利的影响,长期暴露于环境浓度的OUVFs尤其是二苯甲酮类物质会造成生物体以及人体的甲状腺、神经发育以及肾脏功能的损伤^[22]。多项流行病学证据明确指出多种OUVFs与新生儿体重降低、青少年发育以及骨关节炎等疾病的发生具有显著的相关性^[23,24]。

基于此,本文旨在系统综述OUVFs的分类理化性质及应用,梳理其在环境不同介质以及生物体的分布、迁移转化过程,结合流行病学研究探讨其健康风险,并对转化产物演变以及毒性评估的研究进行总结。此外,为应对传统OUVFs带来的生态与健康挑战,本文进一步将新型天然有机紫外吸收剂(如黑色素及木质素衍生物)纳入评价体系,系统评述其研究进展、环境行为与毒性效应。最后综合上述内容对OUVFs在环境中的毒性评估及绿色环保型替代品的研究进行展望。

2 OUVFs的分类理化性质及应用

OUVFs通常是含有离域 π 电子的强共轭结构(如苯环、杂环)构成生色团吸收光子,使分子从基态跃迁到激发态,通过快速的振动弛豫将能量转化为热能回到基态,随后再次吸收光子,持续抵抗紫外线的危害^[25]。

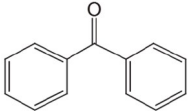
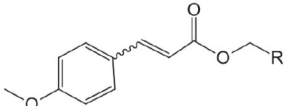
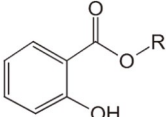
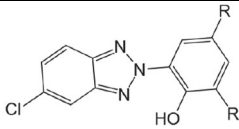
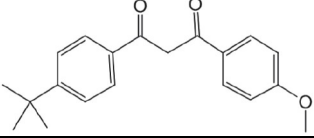
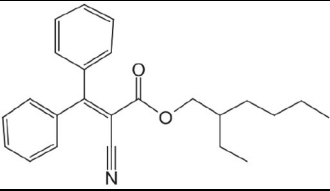
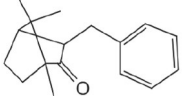
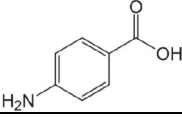
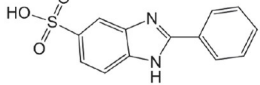
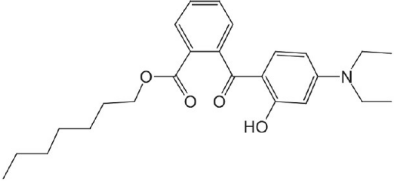
根据化学结构,OUVFs主要分为:二苯甲酮类、肉桂酸盐类、水杨酸酯类、苯并三唑类、二苯甲酰甲烷衍生物类、丙烯酸酯类、樟脑类、对苯甲酸类以及咪唑衍生物类等^[26]。

不同结构的OUVFs对紫外线的防护作用不同,吸收波长存在差异,具有不同的物理化学性质。表1列出了不同OUVFs的理化性质,其中Log Kow (辛醇-水分分配系数)是用于评估有机化合物在正辛醇相与水相间分配能力的参数^[27]。其值越大表明该物质更容易分配到有机相中,具有较强的亲脂性^[28];同时,高Log Kow也预示着其具有生物放大潜力,表现出持久有机污染物中的高生物累积性^[29]。通常OUVFs是芳香族化合物,与羰基或者双键等基团共轭,大多具有较高的Log Kow,即亲脂性强,更容易在环境基质和沉积物中积累。也存在少数因为官能团不同而表现出不同的性质,如BP-4、PBSA由于磺酸基团的引入而具有亲水性。Log Koa (辛醇-空气分配系数)是描述化合物在空气和环境有机相分配的重要参数,低Log Koa值表明在大气环境中主要配分到气相,较高则主要吸附在大气颗粒物表面^[30];并且Log Koa在人体毒理学中,也有助于模拟呼吸空气中有有机物的生理吸收,高Log Koa容易通过呼吸道进入肺部,进而被肺泡表面脂质层吸收进入血液循环^[27]。蒸汽压(vapor pressure, VP)则是衡量化合物的挥发潜力,具有较高VP (10^{-10} ~ 10^{-5} Pa)表现出半挥发性污染物的特性,可以从皮肤表面或海洋表面挥发而进入大气环境中,而低VP ($<10^{-5}$ Pa)物质则更倾向于在颗粒物中存在^[31]。结合这三个参数可以更好地理解其在水体-沉积物-大气-生物体的多介质迁移行为。

OUVFs广泛用于防晒霜和其他个人护理产品,如沐浴露、润肤露、口红、发胶、洗发水、香水、面霜等,还有一些具有防晒功能的化妆品,如粉底、BB霜等,可以防止皮肤细胞造成伤害,延缓衰老^[32,33]。OUVFs也广泛应用于塑料、橡胶中作为光稳定剂,可以通过吸收紫外线防止材料在阳光暴露下发生降解,从而提高材料的抗老化性能^[34];还应用于纺织品、衣物等,尤其是户外服装、窗帘等,提高紫外线防护的能力,减少紫外线对皮肤的伤害^[35];还在各种工业过程中用作防冻剂、防腐剂和光引发剂^[36]。防晒霜中OUVFs在不同国家具体种类略有不同,大多数国家都有OUVFs正面清单,其中写明了允许使用的种类及其最高用量。欧盟批准了28种UVFs,其中包括26种有机

表 1 常见OUVFs的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of common OUVFs

分类	母体结构	常见OUVFs ^{a)}	CAS号	分子式	Log Kow	Log Koa	VP (Pa, 25 °C)
二苯甲酮类		BP-1	131-56-6	C ₁₃ H ₁₀ O ₃	2.96	11.925	1.88×10 ⁻⁵
		BP-3	131-57-7	C ₁₄ H ₁₂ O ₃	3.52	9.72	8.83×10 ⁻⁴
		BP-4	4065-45-6	C ₁₄ H ₁₂ O ₆ S	0.37	15.232	1.79×10 ⁻⁹
		BP-8	131-53-3	C ₁₄ H ₁₂ O ₄	3.04	13.233	2.59×10 ⁻⁵
肉桂酸酯类		EHMC/OMC	5466-77-3	C ₁₈ H ₂₆ O ₃	5.8	8.52	1.85×10 ⁻³
		IPMC	71617-10-2	C ₁₅ H ₂₀ O ₃	4.33	8.837	2.51×10 ⁻²
水杨酸酯类		EHS	118-60-5	C ₁₅ H ₂₂ O ₃	5.9	9.45	9.51×10 ⁻⁴
		HMS	118-56-9	C ₁₆ H ₂₂ O ₃	6.2	9.71	3.73×10 ⁻⁴
苯并三唑类		UV-320	3846-71-7	C ₂₀ H ₂₅ N ₃ O	5.9	17.090	1.47×10 ⁻⁷
		UV-327	3864-99-1	C ₂₀ H ₂₄ ClN ₃ O	5.52	17.861	3.61×10 ⁻⁸
		UV-328	25973-55-1	C ₂₂ H ₂₉ N ₃ O	7.22	17.824	2.57×10 ⁻⁸
二苯甲酰甲烷 衍生物类		AVO	70356-09-1	C ₂₀ H ₂₂ O ₃	4.51	12.579	1.82×10 ⁻⁴
丙烯酸酯类		OC	6197-30-4	C ₂₄ H ₂₇ NO ₂	6.88	13.791	4.2×10 ⁻⁷
樟脑类		3-BC	15087-24-8	C ₁₇ H ₂₀ O	5.37	9.468	5.07×10 ⁻³
		4-MBC	36861-47-9	C ₁₈ H ₂₂ O	5.92	9.976	2.02×10 ⁻³
		BCSA	56039-58-8	C ₁₇ H ₂₀ O ₄ S	2.22	12.649	—
对苯甲酸类		PABA	150-13-0	C ₇ H ₇ NO ₂	0.65	9.455	3.36×10 ⁻³
		OD-PABA	21245-02-3	C ₁₇ H ₂₇ NO ₂	5.77	9.555	4.72×10 ⁻³
咪唑衍生物		PBSA	27503-81-7	C ₁₃ H ₁₀ N ₂ O ₃ S	1.5	12.111	9.75×10 ⁻¹³
其他		DHBB	302776-68-7	C ₂₄ H ₃₁ NO ₄	6.54	14.652	3.33×10 ⁻⁹

a) BP-1: 二苯甲酮-1; BP-3: 二苯甲酮-3; BP-4: 二苯甲酮-4; BP-8: 二苯甲酮-8; EHMC/OMC: 甲氧基肉桂酸乙基己酯; IPMC: 甲氧基肉桂酸异戊酯; EHS: 水杨酸-2-乙基己基酯; HMS: 胡莫柳酯; AVO: 阿伏苯宗; OC: 奥克立林; 3-BC: 3-亚苄基樟脑; 4-MBC: 3-(4-甲基苯亚甲基)樟脑; BCSA: 亚苄基樟脑磺酸; PABA: 对氨基苯甲酸; OD-PABA: 对二甲氨基苯甲酸异辛酯; PBSA: 2-苯基苯并咪唑-5-磺酸; DHBB: 二乙氨基羟苯甲酰基苯甲酸己酯。

化合物和2种无机化合物^[37]. 美国食品和药物管理局批准使用了16种UVFs^[38,39]. 我国在《化妆品安全技术规范》(2015版)中明确规定了可使用的UVFs结构和含量^[40].

3 OUVFs的环境赋存

3.1 大气

OUVFs通常具有半挥发性有机物的特征, 可以直接挥发到大气环境中^[41]. 此外, 涂抹在皮肤上的OUVFs也可以随着人体活动(如出汗、摩擦等)逐渐挥发到大气环境中^[42].

研究者在基于PFAS的富集模型中估算了EHMC从海洋向大气传输通量可高达 $10000 \sim 10000000 \text{ pg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$. 据此估计, 沿海地区人群的呼吸吸入暴露量约为 $1 \sim 10 \text{ ng h}^{-1}$, 其高暴露水平比内陆城市环境高出三个数量级^[43].

在加拿大环境空气中, HMS是浓度最高的有机紫外线过滤剂, 气相浓度最高可以达到 960 pg m^{-3} , 其次是EHS和EHMC, 而且气相中HMS和EHS的浓度比颗粒相中的浓度要高接近300倍, 这取决于三种物质的Log K_{oa}以及饱和蒸汽压 P^0 等关键物理化学参数, 易于配分到大气中以气相形式存在. 并且这些OUVFs的浓度具有显著的季节性变化特性, 在夏季达到峰值^[44]. 在我国的研究中多地室内灰尘样本中均检测出多种OUVFs, 其中以东部地区的含量最高. 这表明东部地区可能与人口密度较高、化妆品和个人护理产品使用量大等因素有关, 导致OUVFs污染更为严重^[45-47]. 具体来看, OC是我国灰尘样本中检出浓度最高的紫外线吸收剂, 浓度可达 $55059.1 \text{ ng g}^{-1}$, 这与OC的使用量以及存在状态高度相关^[48]. 北京PM_{2.5}中OUVFs最多的成分是EHMC, 其次是EHS、HMS, 并且比加拿大颗粒物中检测出的浓度要高600~700倍, 这表明在我国气相中的OUVFs的浓度可能更高^[49].

3.2 水体

OUVFs通过多种途径进入水体环境, 主要包括直接释放和间接排放两种方式. 随着旅游业的快速发展, 越来越多的人参与游泳、冲浪、潜水等水上娱乐活动, 导致防晒霜和个人护理产品中的OUVFs直接从人体排放到自然水体中, 成为海洋污染的重要来源之

一^[50]. 在日常生活中, 淋浴、洗衣等活动也会使OUVFs通过生活废水排放至污水处理厂^[51]. 然而, 由于污水处理厂中的常规处理工艺对这些污染物的去除效率有限, 含有残留OUVFs的废水可能进一步排放至河流、湖泊甚至海洋生态系统中, 部分还可能通过水循环进入自来水系统^[52].

目前研究发现在世界各地的各种水体环境中(如海洋、湖泊、河流、沉积物以及污水处理厂的排放物中)均检测到了不同种类的OUVFs^[53-55]. 以地中海为例, 作为跨国海域, 地中海沿岸聚集了多个国家和地区, 其丰富的文化、历史和自然景观吸引着大量游客, 研究表明, 地中海沿岸岛屿的海水中检测到多种OUVFs, 其浓度可达 $\mu\text{g L}^{-1}$ 量级, 其中BP-3、AVO、HMS、OC、EHS和EHMC的检出频率较高^[56,57]. 此外, 美国、澳大利亚、捷克、法国、中国等国家的地表水和污水处理厂中也广泛检测到了OUVFs, 不同国家的主要检出化合物有所不同^[58,59]. 在西班牙、德国、中国和捷克的污水处理厂中, 二苯甲酮类化合物(如BP-3和BP-4)的检出率尤为显著, 并且由于BP-4的高亲水性, 在捷克共和国水体中检出其最高可达 13000 ng mL^{-1} ^[60]. 而在美国地表水中HMS和BP-3的检出率可达100%, 且HMS的峰值浓度可达BP-3的四倍^[61]. OUVFs在各种水体中的检测结果也具有季节性差异, 夏季浓度显著升高, 这可能是由于夏季紫外线辐射更强, 人们使用防晒产品数量相对增加, 同时户外活动和外出游玩的频率也显著提高所致^[62]. 尽管南极远离工业中心, 但在废水和邻近海域也检测到了BP-3、4-MBC、BP-1和EHMC的存在, 其中BP-3浓度最高^[63]. 全球范围内的研究表明, OUVFs在水体环境中的普遍存在不仅反映了人类活动的影响, 同时也提示了其潜在的环境风险和生态健康问题, 这为未来的水环境管理和污染防治提供了重要参考依据.

3.3 土壤

农业、建筑、包装等行业大量使用OUVFs, 这些化学物质可以通过废水排放、农业灌溉或水体径流等途径, 最终进入土壤. 威尼托地区是意大利土壤利用率最高的地区, 在威尼托地区8个保护区收集了28个表层土壤样品用于监测新污染物, 在受到污染河流洪水影响的泛滥平原土壤中检出EHMC、EHS、4-MBC的存在, 其中EHMC的浓度范围可达 $0.7 \sim 3.4 \text{ ng g}^{-1}$ ^[64].

此外, 垃圾填埋场处理的个人护理产品和塑料中的OUVFs也会渗透到土壤中, 对土壤质量和陆生动植物造成威胁. 在薄膜覆盖的农业土壤的研究中, 覆盖膜土壤的苯并三唑类比未覆盖膜土壤高出三个数量级, 值得注意的是, 被称作环保替代品的生物可降解地膜中的OUVFs是普通聚乙烯薄膜的448倍, 生物降解地膜会释放更多的OUVFs到土壤中^[65].

3.4 生物体

OUVFs通常具有较高的Log Kow, 表明它们具有高亲脂性, 这使得其易于穿透脂质层并进入生物体^[66]. 此外, 部分OUVFs分子结构稳定, 在体内容易积累, 半衰期长, 对生物体和人体造成威胁. 水生生物主要通过摄取受污染的水源和沉积物而吸收OUVFs, 而陆生动植物则可能主要通过根系吸收、气体交换等途径暴露于这些化学物质^[67]. 在这种背景下, 水体动植物、陆生动植物等自然生态系统中普遍检测到这些物质的存在^[68,69]. 根据在鱼类、贝类等低等生物的脂肪组织中OUVFs的浓度计算的生物富集浓度常超过1000~5000 L kg⁻¹, 表明其具有显著生物蓄积性^[70,71]. UV328由于其高生物积累性被正式列入《斯德哥尔摩公约》中持久性有机物名单^[72]. 并且在海豚等占据食物链高位的肉食性动物身上会存在富集更高的现象, 说明其可以通过海洋食物链进行生物放大, 并最终传递给人类^[73].

人体摄入OUVFs的方式主要有以下三种方式: (1) 皮肤吸收, 防晒霜中的OUVFs涂抹在皮肤表面, 通过与皮肤直接接触吸收进入体内^[74]. 此外, 用于防紫外线衣物、床品等纺织品的OUVFs也可以通过皮肤间接接触进入人体^[75]. 研究表明, 这些化学物质能够渗透皮肤屏障, 进入血液循环并进一步分布到身体的各个部位, 甚至在长期使用中可能积累在皮下组织或脂肪中^[76]. (2) 空气接触, 人体在呼吸过程中可能吸入含有OUVFs的空气或灰尘, 尤其是在封闭的室内环境中, 空气中的OUVFs浓度往往较高. 这种暴露途径对于长期在室内工作或生活的人群尤为显著^[77]. (3) 口腔摄入, OUVFs可通过饮用水、食物进入人体, 且容易在食物链传递的过程中逐渐积累, 最终在人体内达到一定浓度^[78]. 估算各人体暴露途径的每日摄入量, 结果显示人体暴露OUVFs的贡献依次为: 室内空气>防晒霜应用>饮用水>室内灰尘, 并且婴儿被识别为高

风险群体^[79]. 不同的暴露途径的综合作用使得OUVFs能够在人体内积累, 研究表明, 血液、尿液、胎盘、羊水等样本中均能检测到OUVFs的存在^[80]. 其中, 我国EHMC在所有样品中检出浓度最高, 在卵泡液中其浓度可以达到151.56 $\mu\text{g L}^{-1}$ ^[81,82]. 值得注意的是, 韩国人群尿液中的OUVFs检出浓度显著高于中国, 表明了韩国地区化妆品及防晒霜消费量, 直接导致了该地区人群内更高的化学品累积负担^[83]. 这些结果揭示了人类在多种途径下暴露于OUVFs的普遍性和长期暴露可能带来的潜在健康风险.

4 OUVFs的环境转化

OUVFs在环境中会受到光照、氧化剂(如臭氧O₃、自由基)以及消毒剂(如氯、溴)的作用而发生化学变化, 可能会产生毒性更大的物质, 对生态环境和人类健康造成重大影响^[84]. OUVFs在环境中的转化过程通常与其化学结构、环境条件(如光照、温度、pH值等)等因素密切相关^[85]. 目前的研究中, OUVFs的环境转化主要集中在水环境转化降解, 而在其他环境中的转化研究较为匮乏.

4.1 大气环境转化

根据Log Koa以及*P*⁰数值范围表明OUVFs大多具有典型半挥发性有机化合物的特征, 在大气环境中遵循气-粒分配的迁移规律, 在室内外环境中已被广泛检测到^[86]. 对于EHMC、EHS、HMS等挥发性相对较强的物质更容易存在于气相, 而对于OC等挥发性较差的物质则主要存在于颗粒相中. 与目前成熟的纯液相研究相比, 其在大气中气相均相氧化以及室内表面、气溶胶表面的非均相氧化研究仍存在明显的空白.

目前的研究中, 已经证明BP-3在模拟海洋喷雾气溶胶中的光解动力学显著快于纯液相, 其环境半衰期从数天缩短至不足10 min, 其原因主要是气溶胶的比表面积以及无机盐引发的盐析效应, 促使BP-3向颗粒表面富集; 同时, 气溶胶界面的不完全溶剂化及高黏度环境有效抑制了BP-3通过激发态分子内质子转移回到基态的能量耗散机制, 从而诱导其发生快速的光化学转化. 值得注意的是, 生成的转化产物表现出比母体更高的急性毒性^[17]. 除光解外, 在大气中存在O₃、·OH等强氧化剂也会参与大气环境转化, 其中O₃

极易吸附在气溶胶表面, 进攻不饱和双键发生Criegee反应^[87,88]; OH自由基则具有更强的氧化性, 进攻苯环或者高活性官能团, 发生摘氢或者加成反应^[89]。在模拟海洋气溶胶表面4-MBC、BP-4和PrPB的非均相·OH氧化实验中测得氧化速率常数为 $2.07 \times 10^{-12} \sim 4.52 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ molecule}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。实验表明具有强疏水性的4-MBC倾向于富集在颗粒表面, 由于·OH在疏水微环境中的碰撞频率及扩散受限, 其反应速率和活性吸收系数在三者中最低; 而含有磺酸基的阴离子表面活性特征的BP-4在空气-水界面部分富集, 同时在颗粒水相中也能很好地溶解和均匀分布, 促进了与·OH的有效接触。在化学转化机制方面, PrPB和4-MBC的氧化过程主要受官能团化驱动, 产物氧碳比(O/C)随氧化程度升高; 而BP-4由于C-S键断裂使磺酸基团流失其产物的O/C比呈下降趋势。研究估算这些成分在大气中的中值寿命约为41~89 h, 表明其具有较强的环境持久性和远距离跨区域传输潜力^[90]。

4.2 水相化学转化

4.2.1 水相光解反应

OUVFs能吸收紫外线并转化为热能或其他形式的能量, 在光照条件下可能发生光解, 光解通常会导致OUVFs失去其原有的功能, 可能产生毒性更高的降解产物^[91,92]。光解转化可以分为直接光解和间接光解。

直接光解指的是光照导致的键断裂、重排和环化反应。AVO结构中存在烯醇和酮互变异构的形式, 在中性pH溶液中光降解主要发生光异构化, 而在酸性条件(pH<3)下, 主要有光异构化和光降解两种存在过程, 生成4-甲氧基苯甲酸主要产物^[93]。环境样品中AVO的精确浓度是烯醇和酮形式浓度的总和, 未考虑这两种形式的测量可能导致浓度数据不准确^[94]。EHMC由于结构中存在不稳定双键, 暴露于阳光下, 会从反式异构体发生光异构化, 大幅降低光保护性, 并且光解形成4-甲氧苯甲醇、2-乙基己醇, 随后形成环二聚体, 其光解产物毒性较母体物质毒性增强^[95]。在水相光解反应中, EHMC、HMS等都表现出比BP-3更强的光降解率^[96]。

间接光氧化指的是由水体中·OH、¹O₂、³DOM*等光化学物质诱导产生^[97]。BP-3、BP-4等二苯甲酮类结构较为稳定, 直接光解反应发生缓慢, 其在淡水中的半衰期是2~3年, 在水中的转化主要依靠水中·OH的参与^[98,99]。苯并三唑类在过硫酸盐存在下的光转化发生

苯环的羟基化以及三唑环的氧化开环反应, 其转化率显著高于直接光解^[100]。

4.2.2 卤代反应

为保证游泳池的水环境, 人们会广泛使用消毒剂, 从而导致各种消毒副产品的产生^[101]。OUVFs会通过芳环侧链的氯化或者氯反应产生一系列的消毒副产品, 其中二苯甲酮类会通过亲电氯化, 酮转化为酯, 酯水解为酚类及苯甲酸衍生物, 苯甲酸衍生物脱羧并水解成酚, 进一步氯化形成氯仿这一系列反应形成消毒副产品^[102]。如果存在溴等其他卤素, 也会发生溴代反应, 溴代反应速率不如氯代反应, 但是毒性会比氯代产物更强^[103]。此外, BP-3、AVO、DHMB已被证明其副产品比母体物质具有更高的细胞毒性, 在肺细胞中诱导氧化应激, 破坏磷脂膜稳定性^[104]。

5 OUVFs的毒性效应

随着环境暴露水平的不断累积, OUVFs的生物安全性广受关注。之前的研究主要集中在其对水生生物体的毒性, 近几年, 越来越多的研究开始关注其在人体暴露后的健康效应。表2中总结了近期研究OUVFs的主要毒性效应。

5.1 水生生态毒性

由于OUVFs在水体环境中的高检出率以及高浓度, 水生生物是污染的首要受害者^[117]。OUVFs会影响珊瑚的生长、发育和繁殖, 造成珊瑚白化、死亡、DNA损伤和代谢异常^[118,119]。BP-3和EHMC已被证实是导致珊瑚白化的主要物质, 即使在较低浓度, BP-3也能诱导珊瑚共生藻发生病毒性感染脱落, 造成珊瑚死亡^[21,106]。2018年夏威夷签署了一项法案, 由于BP-3和EHMC对珊瑚以及其他海洋生物的负面影响, 禁止销售含有BP-3和EHMC的防晒霜; OUVFs具有内分泌干扰作用, 长期暴露于实际环境浓度的BP-3会导致海洋无脊椎动物性发育迟缓, 生育能力下降^[1108,111]; OUVFs还具有甲状腺、神经发育以及肾脏功能毒性, AVO、BP-3、OC、EHMC会降低胚胎幼体斑马鱼的甲状腺激素水平, 诱导活动减退和焦虑行为以及神经发生相关的基因改变, 增加蛋白尿水平, 下调肾小球的功能基因, 其中BP-3毒性最强^[109]; OUVFs还能诱导

表 2 OUVFs主要毒性效应总结表
Table 2 Summary of the main toxic effects of OUVFs

关键OUVFs种类	受试生物/细胞模型	受试浓度	主要毒性终点	参考文献
BP-3	珊瑚	570 ng L ⁻¹ –228 mg L ⁻¹	作为光毒物引发珊瑚白化, DNA损伤及形态畸形, 并作为内分泌干扰物导致幼虫异常骨化	[105]
EHMC, OC	珊瑚+	0.1–1500 µg L ⁻¹	引发珊瑚白化, 水螅体收缩及高死亡率; 混合物能显著增加生物富集(达10倍)并加剧毒性	[106]
BP-3	羊角月牙藻	1.14–11.4 mg L ⁻¹	抑制光合电子传递, 引发ROS过量积累并导致细胞膜过氧化, 显著抑制光合作用与呼吸作用	[107]
BP-2	胚胎斑马鱼	0.1, 1, 10 µM	激活esr2受体抑制lmx1ba表达, 引发神经发育毒性及多巴胺水平下降	[108]
AVO, BP-3, OC, EHMC	胚胎斑马鱼	BP-3: 0.04, 0.14, 0.44, 1.40; AVO, OC, EHMC: 1, 3, 10, 30 µM	降低甲状腺激素水平, 并引发神经发育毒性(行为异常)及肾脏毒性(蛋白尿)	[109]
BP-2	成年斑马鱼	0.1, 5.0, 10.0 mg L ⁻¹	诱导CYP3A表达及受体(PXR/ERα)结合潜力	[110]
BP-3	甲履螺	1, 10, 100 µg L ⁻¹	代谢为BP-1和BP-8, 导致性发育延迟, 繁殖力下降, 壳体受损及胚胎/幼体发育异常	[111]
BP-3, 4-MBC	淡水扁虫	62.5–1920 µg L ⁻¹	抑制乙酰胆碱酯酶(AChE)活性引发神经毒性, 导致头部再生延迟或运动能力下降及氧化应激反应	[112]
BP-8, BP-3, BP-1	人原代子宫内膜基质细胞(hESCs)	10 nM	通过ERα/PR/FOXO1通路干扰子宫内膜蜕膜化, 引发细胞周期停滞与凋亡	[113]
UV-328, UV-329, UV-P	人间充质干细胞(hMSCs)	0.1, 1, 10 µM	与PPARγ受体结合, 干扰PPAR信号通路, 抑制成脂分化并促进成骨分化	[114]
BP-3, DHHB, AVO及其氯化副产物	人肺上皮细胞(A549)	16.67–167 µM	氯化副产物毒性增强, 引发潜在氧化应激(GST增加)并在UVA下破坏膜稳定性	[104]
UV-P, UV-328, UV-329	人肝微粒体及小鼠	1 µM	经细胞色素P450代谢, 生成具强抗雌激素活性及潜在遗传毒性(DNA加合物)的产物	[16]
BP-3, UV-328, BEMT	人胚胎干细胞(hESC)	10 nm	干扰中枢与外周神经系统发育平衡, 影响WNT信号通路及多巴胺能神经元分化	[115]
BP-3	人表皮三维模型	0.01%, 0.032%, 0.1% (w/w)	经皮肤代谢生成葡萄糖醛酸结合物, 在全光谱日光照射下引发光毒性, 导致细胞活力显著降低	[116]

氧化应激, 抑制微藻光合和呼吸作用, 破坏藻类细胞能量的转化再利用, 抑制生长发育^[107].

5.2 人体毒性

体外细胞实验证明, OUVFs具有多种细胞毒性^[115]. 环境相关低浓度的二苯甲酮类(1~10 nM)暴露于人子宫内膜基质细胞能够诱导雌激素受体与孕激素受体发生异常核易位和蛋白互作, 激活FOXO1信号通路, 显著干扰细胞退膜化进程^[113]. 肉桂酸酯类能通过氢键和疏水作用与Bax/Bcl-2凋亡蛋白以及氧化应激酶直接结合, 破坏线粒体电位, 诱导人肝癌细胞内活性氧水平显著升高, 导致过氧化氢酶和超氧化物歧化酶等氧化酶活性受损^[120]. 苯并三唑类在非细胞毒性剂量

下, 阻断正常脂质代谢信号传导, 显著抑制人骨髓间充质干细胞向脂肪细胞分化, 同时异常促进成骨细胞分化^[114].

流行病学调查显示, OUVFs在普通人群尿液中的检出率已超过95%, 这种普遍暴露与多种健康问题存在显著相关性^[121]. 孕妇血清高浓度二苯甲酮类暴露会引起母体甲状腺激素水平降低及糖代谢紊乱, 造成新生儿体重降低及头围减小^[122,123]. 孕妇产前暴露UV-326可能与六岁时认知和神经行为发展的障碍有关^[124]. 学龄前儿童暴露高浓度BP-3、4-MAP、OD-PABA与男孩青春期发育延缓相关, 而BP-2与女孩青春期提前相关^[125]. 青少年尿液中BP-3、BP-1浓度升高与肥胖风险增加显著相关, 而这种相关性在男性中

尤为显著^[126]。除生殖和发育毒性外, 尿液中BP-3浓度与骨关节炎的发病率呈显著正相关^[127]。

OUVFs在进入生物体(如鱼类、植物或人类等)后, 可能会通过生物代谢过程发生转化。OUVFs在生物体中主要经历细胞色素P450酶系作用下的羟基化和去烷基化的I相代谢以及葡萄糖酸酶或硫酸酯化结合的II相代谢, 以增加水溶性更好地排出体外^[110]。BP-3在人类或动物体内经历I相转化, 代谢成BP-1、BP-4和BP-8, BP-3代谢物比母体化合物毒性更大, 其中BP-1被怀疑是内分泌干扰物, 被列为立即替代(SIN)名单^[128]。BP-3、BP-8皮肤模型暴露经II相转化形成葡萄糖羧酸结合产物后, 经过全谱光照会产生活性氧增加其毒性^[116]。皮肤暴露于EHS防晒霜后的尿液样本中, 检测出其本体物质以及代谢产物5OH-EHS、5cx-EPS、4OH-EHS和5oxo-EHS, 其中5OH-EHS在尿液中浓度可以达到213 $\mu\text{g L}^{-1}$ 肌酐, 表明游离EHS进入人体内极不稳定^[129,130]。

6 新型紫外线吸收剂

鉴于目前传统OUVFs的环境及人体健康风险, 新型OUVFs的设计成为研究热点。目前研究主要聚焦于自然界中广泛存在的生物大分子黑色素和植物提取物木质素等, 通过将天然生物合成策略和化学修饰技术结合设计绿色高效的紫外线吸收剂^[131]。黑色素是一种生物合成产生的内源性生物大分子, 主要存在于动物组织中, 通过吸收紫外线和中和活性氧来抵御光损伤, 研究者通过合成黑色素类似物来模拟天然黑色素功能^[132]。如通过直接酶促聚合酪氨酸-低聚乙二醇(OEG)结合物, 合成了一系列具有可调光学性能的黑色素聚合物。基于该材料制备的复合薄膜在保持高可见光透过率的同时, 展现出卓越的紫外屏蔽和抗老化性能, 能显著提高阿维菌素等四种光敏感农药在紫外照射下的残留率和生物活性, 为设计具有定制光谱特性的生物启发聚合物提供了新思路^[133]。木质素是一种从木质纤维素中提取的可持续可降解的生物聚合物, 已成为替代石油基聚合物的环保领先材料, 通过发色团的电子跃迁吸收紫外线, 并利用抗氧化活性猝灭自由基, 展现出卓越的紫外屏蔽与氧化应激缓解能力^[134]。例如, 一种基于天然植物提取物协同自组装的策略, 通过木质素丰富的苯环结构与单宁酸的酚羟基之间 π - π

堆积和氢键作用, 开发了一系列粒径均匀的木质素-单宁复合纳米球, 该材料在大幅提升紫外屏蔽效率(>95%)的同时克服了生物质材料颜色深、透明度低的缺点, 制备出的透明PVA-LT复合薄膜显著提高了多种光敏感农药的残留率, 为农业光保护提供了可持续且碳中性的生物质涂层方案^[135]。

在环境行为方面, 天然生物质基紫外线吸收剂相比传统有机类化合物表现出显著的生态优势。传统OUVFs由于具有较高的亲脂性和环境持久性, 易在水体、沉积物及土壤介质中发生迁移与累积。相反, 黑色素和木质素及其衍生物等天然大分子本质上属于可生物降解材料。在自然环境中, 它们可通过环境微生物代谢及光化学氧化等途径逐步降解并最终矿化, 这极大地降低了其在食物链中富集和持久性累积的风险^[136,137]。基于黑色素和木质素的纳米防护剂在农业领域应用中, 不仅表现出优异的光稳定性, 更重要的是其降解产物不会对土壤和水环境造成二次污染^[133,135]。

毒理学研究表明, 与易导致珊瑚白化和内分泌干扰毒性的传统OUVFs不同, 黑色素和木质素及其衍生物等天然大分子具有卓越的生物相容性和低的细胞毒性^[138,139]。由于其化学骨架源自天然植物或生物体, 这类材料对水生生态系统及土壤微生态的毒性均远低于传统合成化学品^[140]。

7 总结与展望

OUVFs广泛应用于日常生活中, 不仅可以用于个人防护, 也能提高材料的耐用性, 但OUVFs大规模直接或间接排放到环境中, 严重威胁生态环境和人体健康。本文主要从分类、理化性质、应用、赋存、转化及毒性效应等方面对有机紫外线吸收剂的研究进行了系统性的梳理。

OUVFs大多具有较强的疏水性, 能够在环境以及生物体内富集。研究表明紫外线吸收剂广泛存在于水体、沉积物、土壤、生物体以及大气室内灰尘、颗粒物和气相环境中。目前对于水环境的检测已经较为深入, 然而, 关于室外空气中OUVFs的研究相对较少。现有数据的不足限制了对OUVFs在环境中分布特征及来源的全面了解。

在转化层面, 现有的研究已经解析了水相直接光解以及间接光解的光化学反应以及消毒环境中的卤代

反应. 但是, 仅依靠水相中转化数据来推演全球归趋, 将严重低估其在环境中的二次转化潜力. 目前对于大气气相氧化以及颗粒相非均相氧化过程只有BP-3气溶胶表面光解反应以及4-MBC、BP-4 和 PrPB在海洋气溶胶表面的非均相·OH氧化的研究. 然而紫外线吸收剂种类繁多, 并且, 由于全球公共卫生的干预, 在办公场所、公共交通以及医院频繁实施喷雾消毒, 大量释放的含氯消毒剂在光照下发生光解, 释放出高活性的氯自由基, 可能会加速紫外线吸收剂的转化过程, 生成毒性更强的消毒副产品存在在空气中而进入人体危害生命健康.

毒性效应方面, 目前多种OUVFs已经表现出了一定的生态毒性和潜在的健康风险. 但是, 对于OUVFs的毒性研究多集中于母体物质, 而其二次转化产物的毒理学研究相对较少. 少量已有研究表明其二次转化产物可能具有毒性增强的特征. 因此, OUVFs的转化产物毒性效应不可忽视, 需进一步研究来评估其环境和健康风险.

鉴于传统OUVFs的环境持久性及内分泌干扰等毒性, 未来新型紫外线吸收剂的设计合成应遵循绿色安全理念. 基于环境行为与毒理效应, 本文对新型OUVFs的分子设计与合成提出以下三点建议: (1) 通过大分子化或聚合化显著增大分子体积, 利用空间位阻效应减少透皮吸收及系统性毒性风险; (2) 在分子骨架中引入环境可降解基团(如易水解的酯键等), 打破材料的环境持久性, 降低生物富集潜力; (3) 优先以自然界广泛存在的生物质(如黑色素及木质素等)为母体, 利用仿生修饰技术提升其生态相容性, 减少生物的潜在毒性.

尽管现有研究已证实以黑色素及木质素为代表的

新型材料在低毒性和生物可降解性方面具有显著优势, 但其在真实复杂环境介质中的长期归趋、降解动力学及其多介质分配机制仍有待深入阐明. 值得强调的是, 针对传统小分子OUVFs建立的基于Log Kow的生物富集预测模型及透皮吸收毒性评价体系, 难以直接套用于新型大分子/纳米紫外线吸收剂. 这是由于大分子及纳米胶体的环境行为不是由亲脂性主导, 而是更多受团聚、沉降等颗粒动力学过程控制; 同时, 物理尺寸的壁垒也使其基本不存在透皮吸收的可能. 因此, 未来的研究不仅需要进一步优化天然大分子材料的紫外线吸收效率与光化学稳定性, 更迫切需要建立专属于新型高分子/纳米紫外线吸收剂的标准化环境暴露模型与毒理学评估体系.

基于以上分析, 未来的研究重点将在以下几个方面进行突破: (1) 通过采集室内外环境中气相和颗粒相物质, 通过靶向及非靶向技术检测其中的OUVFs的分布以及定量其浓度, 明确其造成的环境风险. (2) 系统开展OUVFs在大气环境等多介质中的转化研究^[141], 考虑气候变化下高温热浪等极端环境下的氧化过程, 利用体相及界面分析技术并结合在线以及离线质谱手段检测气相及颗粒相产物^[142]; 通过量子化学计算, 采用密度泛函理论(DFT)结合动力学建模(如MCM 机制)从分子水平定量预测不同官能团对氧化剂的响应顺序及反应速率常数; 并结合化学传输等大模型, 精准预测其氧化产物在全球尺度的时空分布特征. (3) 强化其转化产物的毒性效应研究, 识别产物中的关键毒性组分, 为OUVFs的安全管理和风险防控, 提供扎实的理论基础. (4) 设计合成绿色安全的新型紫外线吸收剂并实现规模化制备, 并建立一套毒性评价体系全面评估其潜在的生态与健康效应.

参考文献

- 1 World Health Organization. Radiation: Ultraviolet (UV) radiation. 2016-03-09, <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-ultraviolet-%28uv%29>
- 2 Islami F, Sauer AG, Miller KD, Fedewa SA, Minihan AK, Geller AC, Lichtenfeld JL, Jemal A. *Intl J Cancer*, 2020, 147: 1385–1390
- 3 Bernard JJ, Gallo RL, Krutmann J. *Nat Rev Immunol*, 2019, 19: 688–701
- 4 Voelker R. *JAMA*, 2021, 326: 1667
- 5 Do ATN, Ha Y, Kang HJ, Kim JM, Kwon JH. *J Hazard Mater*, 2022, 430: 128487
- 6 Ling T, Fang Y, Zong L, Tang Z, Fan K, Chen D, Jin P, Guan M. *Environ Health*, 2025, 3: 1438–1455
- 7 Těšínská P, Škarohlíd R, Kroužek J, McGachy L. *Environ Pollution*, 2024, 363: 125134
- 8 O'Meara S, Booth AM, Barley MH, Topping D, McFiggans G. *Phys Chem Chem Phys*, 2014, 16: 19453–19469

- 9 Íñiguez E, Pires da Silva R, Montesdeoca-Esponda S, Dimou E, Alves F, Kaufmann M, Dinis A, Cordeiro N. *Environ Res*, 2025, 287: 123153
- 10 Ramos S, Homem V, Alves A, Santos L. *Environ Int*, 2016, 86: 24–44
- 11 Ramos S, Homem V, Alves A, Santos L. *Sci Total Environ*, 2015, 526: 278–311
- 12 Frederiksen H, Krause M, Jørgensen N, Rehfeld A, Skakkebæk NE, Andersson AM. *J Expo Sci Environ Epidemiol*, 2021, 31: 345–355
- 13 Liu Y, Gao L, Qiao L, Huang D, Lyu B, Li J, Wu Y, Zheng M. *Environ Sci Technol*, 2022, 56: 15930–15940
- 14 Scherer M, Scherer G, Riedel K, Koch HM, Wrobel SA, Murawski A, Lemke N, Weber T, Pluym N, Kolossa-Gehring M. *Int J Hyg Environ Health*, 2025, 266: 114565
- 15 Silvia Díaz-Cruz M, Llorca M, Barceló D, Barceló D. *TrAC Trends Anal Chem*, 2008, 27: 873–887
- 16 Cheng S, Su L, Han Y, Jin L, Ma J, Kong C, Zhang S, Huang J, Liu C, Paneth P, Ji L. *Environ Int*, 2025, 205: 109887
- 17 Cooper A, Shenkirya A, Chin H, Morris M, Mehndiratta L, Roundtree K, Tafuri T, Slade JH. *ACS EST Air*, 2024, 1: 1430–1441
- 18 Wang Y, Jin Q, Lin H, Xu X, Leung KMY, Kannan K, He Y. *J Hazard Mater*, 2024, 480: 135894
- 19 Chatzigianni M, Pavlou P, Siamidi A, Vlachou M, Varvaresou A, Papageorgiou S. *Ecotoxicology*, 2022, 31: 1331–1345
- 20 Hodge AA, Hopkins FE, Saha M, Jha AN. *Mar Pollution Bull*, 2025, 213: 117627
- 21 Carstensen L, Zippel R, Fiskal R, Börnick H, Schmalz V, Schubert S, Schaffer M, Jungmann D, Stolte S. *J Hazard Mater*, 2023, 456: 131617
- 22 Shetty N, Schalka S, Lim HW, Mohammad TF. *Photochem Photobiol Sci*, 2023, 22: 2463–2471
- 23 Gu J, Yuan T, Ni N, Ma Y, Shen Z, Yu X, Shi R, Tian Y, Zhou W, Zhang J. *Environ Res*, 2019, 168: 48–53
- 24 Jaskulak M, Cinkusz M, Franchuk K, Zorena K. *Curr Envir Health Rpt*, 2025, 12: 28
- 25 Kimbrough DR. *J Chem Educ*, 1997, 74: 51
- 26 Gadgil VR, Darak A, Patil SJ, Chopada A, Kulkarni RA, Patil SM, Gupta NA, Mehta TN, Joshi SV. *J Ind Chem Soc*, 2023, 100: 100858
- 27 Ebert RU, Kühne R, Schürmann G. *Environ Sci Technol*, 2022, 57: 976–984
- 28 Stec M, Astel AM. *Water*, 2023, 15: 2403
- 29 Lestido-Cardama A, Petrarca M, Monteiro C, Ferreira R, Marmelo I, Maulvault AL, Anacleto P, Marques A, Fernandes JO, Cunha SC. *J Hazard Mater*, 2023, 444: 130387
- 30 Xu Z, Zhao H, Wang J, Li X, Li Z, Zhang X, Ou Y. *J Environ Chem Eng*, 2025, 13: 115741
- 31 Liu X. *Indoor Built Environ*, 2022, 31: 291–298
- 32 Chaiyabutr C, Sukakul T, Kumpangsin T, Bunyavaree M, Charoenpipatsin N, Wongdama S, Boonchai W. *Contact Dermatitis*, 2021, 85: 58–68
- 33 Fivenson D, Sabzevari N, Qiblawi S, Blitz J, Norton BB, Norton SA. *Int J Womens Dermatol*, 2021, 7: 45–69
- 34 Zhao Y, Bai L, Wang X, Huo M, Gao W, Jiang L, Jin J, Wang Y, Cao D. *Environ Sci Technol*, 2024, 58: 17419–17428
- 35 Morrison GC, Bekö G, Weschler CJ, Schripp T, Salthammer T, Hill J, Andersson AM, Toftum J, Clausen G, Frederiksen H. *Environ Sci Technol*, 2017, 51: 11371–11379
- 36 Carve M, Allinson G, Nugegoda D, Shimeta J. *Sci Total Environ*, 2021, 773: 145628
- 37 List of UV Filters allowed in cosmetic products, 2024-06-18, <https://globalcosing.chemradar.com/pedia/ehkgs3v5dv5s>
- 38 U.S. Food and Drug Administration. Over-the-Counter Monograph M020: Sunscreen Drug Products for Over-the-Counter Human Use, 2021-11-24. Available from https://www.accessdata.fda.gov/drugsatfda_docs/omuf/monographs/OTCMonograph_M020-SunscreenDrugProductsfor-OTCHumanUse09242021.pdf
- 39 Pantelic MN, Wong N, Kwa M, Lim HW. *J Am Acad Dermatol*, 2023, 88: 632–646
- 40 State Food and Drug Administration. Safety and Technical Standards for Cosmetics, China, 2015. Available from <https://www.nmpa.gov.cn/directory/web/nmpa/images/MjAxNcTqtldoyNjI6xbmruOa4vbz+LnBkZg==.pdf> (in Chinese) [国家食品药品监督管理总局, 化学品安全技术规范, 中国, 2015. <https://www.nmpa.gov.cn/directory/web/nmpa/images/MjAxNcTqtldoyNjI6xbmruOa4vbz+LnBkZg==.pdf>]
- 41 Sonne C, Xia C, Dadvand P, Targino AC, Lam SS. *J Building Eng*, 2022, 62: 105344
- 42 Binks BP, Brown J, Fletcher PDI, Johnson AJ, Marinopoulos I, Crowther JM, Thompson MA. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8: 13270–13281
- 43 Cooper A, Cancelada L, Torres RR, Belcher K, Small M, Belda-Ferre P, Morris C, Mitts B, Dinasquet J, Knight R, Slade JH, Prather KA. *Sci Adv*, 2025, 11: eads9476
- 44 Pegoraro CN, Harner T, Su K, Ahrens L. *Environ Sci Technol*, 2020, 54: 12881–12889
- 45 An D, Xing X, Tang Z, Li Y, Sun J. *Environ Res*, 2022, 204: 112130

- 46 Ao J, Yuan T, Ma Y, Gao L, Ni N, Li D. *Chemosphere*, 2017, 184: 575–583
- 47 Xing X, Han X, He L, Cheng J, Zhong F, Sun J, Tang Z. *Process Saf Environ Protection*, 2020, 135: 228–235
- 48 Ao J, Yuan T, Gu J, Ma Y, Shen Z, Tian Y, Shi R, Zhou W, Zhang J. *Sci Total Environ*, 2018, 640–641: 1157–1164
- 49 Deng Y, Yang Q, Gao L, Xu C, Liu Y, Xu M, Zhao B, Zheng M. *Atmos Environ*, 2025, 351: 121210
- 50 Mozas-Blanco S, Rodríguez-Gil JL, Kalman J, Quintana G, Díaz-Cruz MS, Rico A, López-Heras I, Martínez-Morcillo S, Motas M, Lertxundi U, Orive G, Santos O, Valcárcel Y. *Mar Pollution Bull*, 2023, 196: 115644
- 51 Kupper T, Plagellat C, Brändli RC, de Alencastro LF, Grandjean D, Tarradellas J. *Water Res*, 2006, 40: 2603–2612
- 52 Wu M, Li J, Xu G, Ma L, Li J, Li J, Tang L. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2018, 152: 98–103
- 53 Cadena-Aizaga MI, Montesdeoca-Esponda S, Sosa-Ferrera Z, Santana-Rodríguez JJ. *Environ Pollution*, 2022, 300: 118843
- 54 Cunha SC, Ferreira R, Marmelo I, Vieira LR, Anacleto P, Maulvault A, Marques A, Guilhermino L, Fernandes JO. *Sci Total Environ*, 2022, 838: 155814
- 55 Mitchelmore CL, He K, Gonsior M, Hain E, Heyes A, Clark C, Younger R, Schmitt-Kopplin P, Feerick A, Conway A, Blaney L. *Sci Total Environ*, 2019, 670: 398–410
- 56 Agawin NSR, García-Márquez MG, Espada DR, Freemantle L, Pintado Herrera MG, Tovar-Sánchez A. *Sci Total Environ*, 2024, 948: 174784
- 57 Fenni F, Sunyer-Caldú A, Ben Mansour H, Díaz-Cruz MS. *Environ Pollution*, 2022, 309: 119749
- 58 Labille J, Slomberg D, Catalano R, Robert S, Apers-Tremelo ML, Boudenne JL, Manasfi T, Radakovitch O. *Sci Total Environ*, 2020, 706: 136010
- 59 O'Malley E, McLachlan MS, O'Brien JW, Verhagen R, Mueller JF. *Sci Total Environ*, 2021, 754: 142373
- 60 Amankwah BK, Šauer P, Grabicová K, von der Ohe PC, Aykol NS, Kocour Kroupová H. *J Hazard Mater*, 2024, 471: 134338
- 61 Hain E, He K, Batista-Andrade JA, Feerick A, Tarnowski M, Timm A, Blaney L. *J Hazard Mater*, 2023, 460: 132405
- 62 Ekpeghere KI, Kim UJ, O SH, Kim HY, Oh JE. *Sci Total Environ*, 2016, 542: 121–128
- 63 Balakrishna K, Praveenkumarreddy Y, Nishitha DS, Gopal CM, Shenoy JK, Bhat K, Khare N, Dhargar K, Kumar M. *Environ Res*, 2023, 222: 115327
- 64 Vecchiato M, Bonato T, Barbante C, Gambaro A, Piazza R. *Sci Total Environ*, 2021, 796: 149003
- 65 Li B, Liu Q, Yao Z, Ma Z, Li C. *Environ Pollution*, 2023, 318: 120935
- 66 Langford KH, Reid MJ, Fjeld E, Øxnevad S, Thomas KV. *Environ Int*, 2015, 80: 1–7
- 67 Downs CA, Bishop E, Díaz-Cruz MS, Haghshenas SA, Stien D, Rodrigues AMS, Woodley CM, Sunyer-Caldú A, Doust SN, Espero W, Ward G, Farhangmehr A, Tabatabaee Samimi SM, Risk MJ, Lebaron P, DiNardo JC. *Chemosphere*, 2022, 291: 132880
- 68 Petalas C, Provencher JF, Eng ML, de Solla SR, Lu Z, Elliott KH, Lavoie RA. *J Hazard Mater*, 2025, 495: 139092
- 69 Provencher JF, Malaisé F, Mallory ML, Braune BM, Pirie-Dominix L, Lu Z. *Environ Sci Technol*, 2022, 56: 14562–14573
- 70 Washington (DC): Pubilc Release Webinar, 2022, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/36479751>
- 71 Lozano C, Givens J, Stien D, Matallana-Surget S, Lebaron P. Bioaccumulation and toxicological effects of UV-filters on marine species. In: Tovar-Sánchez A, Sánchez-Quiles D, Blasco J, (eds). *Sunscreens in Coastal Ecosystems*. Cham: Springer International Publishing, 2020. 85–130
- 72 Wu H, Li L, Li Z, Liu J, Zhang Z, Qiao P, Zhu C, Xu Y, Tian X, Ren X, Li W, Li J. *Environ Pollution*, 2025, 373: 126164
- 73 González-Bareiro E, Montesdeoca-Esponda S, De la Fuente J, Sosa-Ferrera Z, Arbelo M, Fernández A, Santana-Rodríguez JJ. *Sci Total Environ*, 2023, 895: 165041
- 74 Matta MK, Florian J, Zusterzeel R, Pilli NR, Patel V, Volpe DA, Yang Y, Oh L, Bashaw E, Zineh I, Sanabria C, Kemp S, Godfrey A, Adah S, Coelho S, Wang J, Furlong LA, Ganley C, Michele T, Strauss DG. *JAMA*, 2020, 323: 256–267
- 75 Hiller J, Klotz K, Meyer S, Uter W, Hof K, Greiner A, Göen T, Drexler H. *Environ Int*, 2019, 132: 105068
- 76 Janjua NR, Mogensen B, Andersson AM, Petersen JH, Henriksen M, Skakkebæk NE, Wulf HC. *J Invest Dermatol*, 2004, 123: 57–61
- 77 Du B, He Y, Liang B, Li J, Luo D, Chen H, Liu LY, Guo Y, Zeng L. *Environ Sci Technol*, 2022, 56: 4210–4220
- 78 Li N, Ho W, Wu RSS, Tsang EPK, Ying GG, Deng WJ. *Environ Int*, 2019, 133: 105246
- 79 Yang F, Yuan T, Ao J, Gao L, Shen Z, Zhou J, Wang B, Pan X. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2024, 283: 116800
- 80 Yang W, Feng J, Liang W, Nie M, Tan J, Fan R. *J Chromatogr B*, 2024, 1237: 124090
- 81 Manová E, von Goetz N, Hungerbuehler K. *Environ Int*, 2015, 74: 249–257

- 82 Tian Y, Sun J, Fang Y, Li C, Wang C, Xin Z, Wang S, Yang X. *Environ Int*, 2025, 201: 109573
- 83 Park NY, Lee A, Park S, Gim M, Moon HB, Choi K, Park J, Kim S, Kho Y. *Sci Total Environ*, 2025, 998: 180258
- 84 Sun J, Rene ER, Tao D, Lu Y, Jin Q, Lam JCH, Leung KMY, He Y. *J Hazard Mater*, 2024, 463: 132822
- 85 Santos AJM, Miranda MS, Esteves da Silva JCG. *Water Res*, 2012, 46: 3167–3176
- 86 Li B, Yao Z, Zhao F, Meng B, Ma Z, Li C. *J Hazard Mater*, 2024, 474: 134801
- 87 Jenkin ME, Valorso R, Aumont B, Newland MJ, Rickard AR. *Atmos Chem Phys*, 2020, 20: 12921–12937
- 88 Zeng M, Wilson KR. *Environ Sci Technol*, 2024, 58: 11587–11595
- 89 Kruse SM, Slade JH. *J Phys Chem A*, 2023, 127: 4724–4733
- 90 Ma X, Li K, Chen X, Du L. *Environ Sci Technol*, 2026, 60: 6378–6389
- 91 Law JCF, Huang Y, Chow CH, Lam TK, Leung KSY. *Environ Pollution*, 2021, 286: 117551
- 92 Zhang S, Chen J, Qiao X, Ge L, Cai X, Na G. *Environ Sci Technol*, 2010, 44: 7484–7490
- 93 Németh Z, Pirger Z, Fodor I, Óvári M, Komáromy A. *J PhotoChem PhotoBiol A-Chem*, 2023, 439: 114621
- 94 Berenbeim JA, Wong NGK, Cockett MCR, Berden G, Oomens J, Rijs AM, Dessent CEH. *J Phys Chem A*, 2020, 124: 2919–2930
- 95 Lorigo M, Quintaneiro C, Breitenfeld L, Cairrao E. *Chemosphere*, 2024, 358: 142218
- 96 Celeiro M, Facorro R, Dagnac T, Vilar VJP, Llompарт M. *J Chromatogr A*, 2019, 1596: 8–19
- 97 Li Y, Qiao X, Zhou C, Zhang Y, Fu Z, Chen J. *Chemosphere*, 2016, 153: 494–499
- 98 Guo Y, Lin Q, Xu B, Qi F. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, 23: 7962–7974
- 99 Semones MC, Sharpless CM, MacKay AA, Chin YP. *Appl GeoChem*, 2017, 83: 150–157
- 100 Lai SC, Lin HHH, Yang JS, Hsieh MC, Lin AYC. *J Environ Chem Eng*, 2023, 11: 109189
- 101 Richardson S, Li X, Mitch W, Zhang X, Yang X, Chen B, Pan Y, Wang W, Yang M, Dong H, Li J. *Environ Sci Technol*, 2025, 59: 6353–6354
- 102 Duirk SE, Bridenstine DR, Leslie DC. *Water Res*, 2013, 47: 579–587
- 103 Ding S, Chu W, Krasner SW, Yu Y, Fang C, Xu B, Gao N. *Water Res*, 2018, 142: 490–500
- 104 Ichikawa M, Shimokawa N, Makuta M, Song Y, Yao J, Dolenc D, Kononenko V, Drobne D, Bohinc K, Malev O, Trebše P. *Sci Total Environ*, 2025, 1002: 180516
- 105 Downs CA, Kramarsky-Winter E, Segal R, Fauth J, Knutson S, Bronstein O, Ciner FR, Jeger R, Lichtenfeld Y, Woodley CM, Pennington P, Cadenas K, Kushmaro A, Loya Y. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2016, 70: 265–288
- 106 He T, Tsui MMP, Tan CJ, Ma CY, Yiu SKF, Wang LH, Chen TH, Fan TY, Lam PKS, Murphy MB. *Environ Pollution*, 2019, 245: 462–471
- 107 Li Y, Zhao T, Qin M, Che X, Zhang A. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2024, 278: 116441
- 108 Qi Z, Zhai Y, Han Y, Li K, Wang T, Li P, Li J, Zhou X, Zhao X, Song W. *Environ Sci Technol*, 2024, 58: 21433–21449
- 109 Reum Kwon B, Jo AR, Lee I, Lee G, Joo Park Y, Pyo Lee J, Park NY, Kho Y, Kim S, Ji K, Choi K. *Environ Int*, 2024, 192: 109030
- 110 Casiano-Muñiz IM, Ortiz-Román MI, Carmona-Negrón JA, Román-Velázquez FR. *Aquat Toxicol*, 2024, 273: 106973
- 111 Xi L, Ng CF, Wong HC, Wong CKC, Wu RSS, Tsang YF, Thiagarajan V, Chiu JMY. *J Hazard Mater*, 2025, 498: 139846
- 112 Rolo P, Pestana JLT, Campos D. *Environ Toxicol Pharmacol*, 2026, 121: 104899
- 113 Zhan T, Shen L, Zhang Y, Wan F, Qiu Y, Jin Q, Wu Y, Huang Y, Zhuang S. *Environ Sci Technol*, 2025, 59: 6464–6476
- 114 Zhang Y, Zhao H, Feng Q, Guo R, Zhong L, Liang S. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2025, 290: 117765
- 115 Li S, Zhang S, Li H, Yin N, Yang R, Zhang Y, Koziol MJ, Faiola F. *J Hazard Mater*, 2025, 499: 140149
- 116 Song Z, Lu Y, Shi JL, Xu Y, Mitch WA. *Environ Sci Technol*, 2025, 59: 16324–16331
- 117 Díaz-Cruz MS, Barceló D. *TrAC Trends Anal Chem*, 2009, 28: 708–717
- 118 Mitchelmore CL, Burns EE, Conway A, Heyes A, Davies IA. *Environ Toxicol Chem*, 2021, 40: 967–988
- 119 Pei J, Hu J, Zhang R, Liu N, Yu W, Yan A, Han M, Liu H, Huang X, Yu K. *Sci Total Environ*, 2023, 868: 161611
- 120 Tian L, Guo M, Chen H, Wu Y. *Environ Int*, 2023, 171: 107658
- 121 De Luca HP, Boudon S, Odermatt A, Schenk L, Hopf NB. *Regulatory Toxicol Pharmacol*, 2025, 163: 105916
- 122 Fu J, Yao Y, Huang Z, Huang J, Zhang D, Li X, Xu J, Xiao Q, Lu S. *Environ Int*, 2024, 189: 108797
- 123 Song S, He Y, Huang Y, Huang X, Guo Y, Zhu H, Kannan K, Zhang T. *Sci Total Environ*, 2020, 726: 138503
- 124 Ying T, Chen Y, Su H, Liang H, Wang Z, Liu Y, Liu J, Miao M, He G. *Environ Pollution*, 2026, 390: 127560
- 125 Zhou Y, Wang P, Li J, Zhao Y, Huang Y, Sze-Yin Leung K, Shi H, Zhang Y. *Chemosphere*, 2023, 320: 138073

- 126 Peinado FM, Pérez-Cantero A, Olivas-Martínez A, Espín-Moreno L, de Haro T, Boada LD, Rodríguez-Carrillo A, Govarts E, Pedraza-Díaz S, Esteban-López M, Blaha L, Blahova L, Janasik B, Wasowicz W, Lignell S, Rambaud L, Riou M, Fillol C, Denys S, Murawski A, Brantsæter AL, Sakhi AK, Iszatt N, Schoeters G, Kolossa-Gehring M, Fernández MF, Mustieles V. *Environ Res*, 2025, 280: 121912
- 127 Li Y, Zhu J, Fan J, Cai S, Fan C, Zhong Y, Sun L. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2020, 192: 110293
- 128 Hass Ulla, Christiansen Sofie, Petersen Marta Axelstad, Boberg Julie, Andersson Anna-Maria, Skakkebæk Niels Erik, Bay Katrine, Holbeck Henrik, Lund Kinnberg Karin, Bjerregaard Poul. Evaluation of 22 SIN List 2.0 Substances According to the Danish Proposal on Criteria for Endocrine Disrupters. *DTU Food*, 2012
- 129 Hiller J, Klotz K, Meyer S, Uter W, Hof K, Greiner A, Göen T, Drexler H. *Arch Toxicol*, 2019, 93: 2565–2574
- 130 Kuhlmann L, Hiller J, Göen T. *Talanta*, 2024, 276: 126223
- 131 Dai K, Cao S, Yuan J, Wang Z, Li H, Yuan C, Yan X, Xing R. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2025, 17: 30402–30422
- 132 Wang C, Zhang R, Zhang J, Zhang X, Zhang H, Cao H, Yang Z, Li Y. *Sci China Chem*, 2024, 67: 3098–3110
- 133 Zou Z, Zhang T, Luo B, Wang J, Zhang R, Zhang X, Yang Z, Li Y. *Mater Horiz*, 2026, 13: 1289–1301
- 134 Wu Y, Wu X, Zhang A, Ouyang X, Lou H, Yang D, Qian Y, Qiu X. *Adv Funct Mater*, 2023, 33: 2303889
- 135 Ma Y, Remón J, Luo L, Ding W, Jiang Z, Shi B. *Nano Today*, 2025, 60: 102550
- 136 Khan P, Ali S, Jan R, Kim KM. *Nanomaterials*, 2024, 14: 1541
- 137 Xing Q, Buono P, Ruch D, Dubois P, Wu L, Wang WJ. *ACS Sustain Chem Eng*, 2019, 7: 4147–4157
- 138 Espinoza-Acosta JL, Figueroa-Espinoza EG, Rosa-Alcaraz MÁD. *BioResources*, 2022, 17: 3674–3701
- 139 Oh JJ, Kim JY, Son SH, Jung WJ, Kim DH, Seo JW, Kim GH. *RSC Adv*, 2021, 11: 19682–19689
- 140 Kim TH, Park SH, Lee S, Bharadwaj AVSLS, Lee YS, Yoo CG, Kim TH. *Energies*, 2023, 16: 2231
- 141 Xiang W, Wang W, Du L, Zhao B, Liu X, Zhang X, Yao L, Ge M. *Chem Res Chin Univ*, 2023, 39: 326–341
- 142 Lei T, Ge M, Wang W. *Anal Chem*, 2025, 97: 9554–9568

Environmental behavior and toxicological effects of organic ultraviolet filters

Huiling Zhang^{1,2}, Ting Lei¹, Maofa Ge^{1,2}, Weigang Wang^{1,2*}

¹ Laboratory for Structural Chemistry of Unstable and Stable Species, Beijing National Laboratory for Molecular Sciences, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

*Corresponding author (email: wangwg@iccas.ac.cn)

Abstract: Organic ultraviolet filters (OUVFs), a class of functional chemicals widely used in personal care products and industrial materials, have gained significant attention due to their ubiquitous presence in the environment and potential endocrine-disrupting effects. Previous reviews have primarily focused on the environmental behavior and toxicity endpoints of OUVFs within individual environmental media, particularly in aquatic systems. Therefore, this paper adopts a multi-compartment perspective to review the key physicochemical properties and application scenarios of OUVFs, examining their distribution across the atmosphere, water bodies, soil, and living organisms. This review summarizes published research on the environmental behavior of OUVFs, highlighting the importance of terrestrial and atmospheric transformation processes. Furthermore, we analyze the associated ecological and health risks, revealing not only endocrine-disrupting effects on aquatic biota but also significant potential hazards to human health. Notably, certain transformation products exhibit higher toxicity than their parent compounds. By integrating the multimedia environmental behavior and toxicological effects of OUVFs, this paper provides a comprehensive framework for understanding their environmental and health risks. Finally, we evaluate the environmental behavior and toxicological effects of novel natural macromolecular OUVFs and outline future directions for OUVF molecular synthesis and toxicity assessment.

Keywords: organic ultraviolet filters, environmental behavior, toxicity, transformation

doi: [10.1360/SSC-2026-0029](https://doi.org/10.1360/SSC-2026-0029)