

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20181221001

杨雅淇, 童一帆, 田胜艳. 三氯生在水生生态系统中的污染现状及其生物毒性效应[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(6): 47-56

Yang Y Q, Tong Y F, Tian S Y. Pollution status and toxic effect of triclosan in aquatic ecosystem [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(6): 47-56 (in Chinese)

三氯生在水生生态系统中的污染现状及其生物毒性效应

杨雅淇¹, 童一帆¹, 田胜艳^{1,2,3,*}

1. 天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457

2. 天津市海洋环境保护与修复技术工程中心, 天津 300457

3. 天津市海洋资源与化学重点实验室, 天津 300457

收稿日期: 2018-12-21

录用日期: 2019-03-14

摘要: 三氯生(triclosan, TCS)是一种合成型广谱类抗菌剂,广泛应用于人类的生产生活,使用中伴随生活污水进入环境并已广泛分布,其中水生生态系统是TCS的主要污染区域之一。通过汇总分析国内外不同类型水生生态系统中TCS的调查研究结果,发现TCS已经普遍存在于淡水和近海水生生态系统中,生活污水处理厂出水是河流中TCS的主要污染源,区域污染水平与人口密度和工业发展程度密切相关;水体中的浓度受降雨、河口区潮汐作用以及季节影响;TCS对水生生物存在显著毒性效应,其效应浓度因物种而异,与生物的发育阶段也有关系。

关键词: 三氯生(TCS);水生生态系统;毒性效应;污染现状

文章编号: 1673-5897(2019)6-047-10 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Pollution Status and Toxic Effect of Triclosan in Aquatic Ecosystem

Yang Yaqi¹, Tong Yifan¹, Tian Shengyan^{1,2,3,*}

1. College of Marine and Environmental Science, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China

2. Tianjin Marine Environmental Protection and Restoration Technology Engineering Center, Tianjin 300457, China

3. Tianjin Key Laboratory of Marine Resources and Chemistry, Tianjin 300457, China

Received 21 December 2018

accepted 14 March 2019

Abstract: As a kind of broad-spectrum synthetic antimicrobial agent, triclosan (TCS) was widely used in human activity. TCS could enter into environment through domestic sewage, and aquatic ecosystems was considered as the major contaminated area of TCS. The TCS investigation researches in diverse aquatic ecosystems globally were summarized. It is found that TCS has been ubiquitous in freshwater and coastal aquatic ecosystems and wastewater treatment plants were primary source of TCS pollution. The TCS pollution level was strongly related to population density and industrial development level. The concentration of TCS in water was influenced by rainfall, tide and season. Moreover, TCS was strongly toxic to aquatic organism while toxicity effect concentrations varied between different species and different development stages.

Keywords: triclosan (TCS); aquatic ecosystem; toxic effect; pollution status

基金项目: 天津科技大学大学生创新创业训练计划项目(201810057014)

作者简介: 杨雅淇(1997—), 女, 本科生, 研究方向为近海生态系统有机污染物环境行为及其生物毒性效应, E-mail: 945463337@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: tiansy@tust.edu.cn

三氯生(triclosan, TCS), 又名“三氯新”、“三氯沙”, 是一种羟二乙醚的三氯化衍生物, 化学名称为2,4,4'-三氯-2'-羟基二苯醚, 具有与多氯联苯、多溴联苯醚和二噁英等化合物相似的化学性质, 主要应用于个人护理用品(如牙膏、抗菌肥皂、洗洁精和化妆品等)和防腐产品中^[1-2]。因其具有亲脂性、持久性、生物累积性和生物毒性等特征, 对生态系统和人类健康存在潜在危害^[2]。

目前, 环境中 TCS 的存在主要是由于含 TCS 个人护理用品的大量使用^[3-5], 以及现有生活污水处理工艺不能将其完全去除^[6-8]。已发现 TCS 及其降解产物在不同环境介质中广泛分布, 诸如土壤、地表水、河口与近海沉积物等都有 TCS 检出^[9]。与药物活性化合物(pharmaceutically active compounds, PhACs)和内分泌干扰物(environmental endocrine disruptors, EDCs)相比, TCS 的毒性相对较低, 使得目前对 TCS 的使用管理并不规范。然而, 美国食品和药物管理局已于2016年9月颁布禁令, 禁止在洗手液和沐浴露中添加 TCS。加拿大在2017年12月13日对 TCS 的污染防治规划展开公众评议, 最终于2018年7月公布将 TCS 列入《加拿大环境保护法》的有毒物质清单。

水生生态系统是 TCS 进入环境的主要途径, 目前全球不同国家和地区不同类型的水环境中 TCS 普遍存在, 接纳污水处理厂排水的河流中 TCS 浓度甚至高达 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 级别。毒性研究发现 TCS 对某些水生生物存在显著毒性效应。本文归纳和分析了国内外不同类型水环境中 TCS 的污染状况, 阐述了 TCS 在水生生态系统中的污染现状与特点, 以及其对水生生物的毒性效应, 为 TCS 的市场投入/使用管控及治理措施的制定提供科学依据。

1 TCS 的理化性质 (Physical and chemical properties of TCS)

TCS 是一种人工合成的具有醚类和酚类功能基团的氯化芳香化合物, 化学分子式为 $\text{C}_{12}\text{H}_7\text{Cl}_3\text{O}_2$, 化学分子式结构如图1所示。CAS 编号为 3380-34-5, 熔点 $55\sim 57\text{ }^{\circ}\text{C}$, 沸点 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。

TCS 在室温条件下呈白色或灰白色粉末状, 略有芳香类或酚醛类气味。微溶于水(溶解度约为 $12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[1], 溶于稀碱溶液, 易溶于有机溶剂。TCS 具有优异的化学稳定性: 在 $280\sim 290\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时不会迅速分解, 在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热 14 h, 仅有 2% 的物质分解; 在长时间紫外光照射下, 仅有轻微分解。然而,

TCS 可通过甲基化、光解和氯化产生甲基三氯生、二噁英、氯酚和氯仿, 其中, 甲基三氯生比其母体化合物更易被生物体生物富集^[11]。TCS 的辛醇-水分配系数($\log K_{ow}$)为 4.76, 表明其具有良好的亲脂性, 易于被生物体吸收, 从而对生物体及生态系统存在风险。

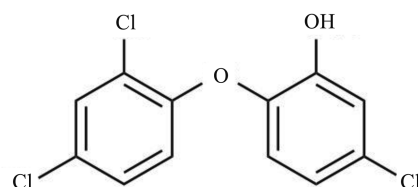


图1 三氯生(TCS)的化学分子式结构^[10]

Fig. 1 Chemical molecular formula structure of triclosan (TCS) ^[10]

2 水生生态系统中 TCS 的污染现状 (Pollution status of TCS in aquatic ecosystem)

过去几十年间, TCS 的产量急剧增加。1998 年美国 TCS 的生产量为 $450\sim 4\,500\text{ t}$ ^[12], 2006 年欧洲国家的生产量达 450 t。随着 TCS 产量的增加, 全球 TCS 的使用量高达 $600\sim 1\,000\text{ t}$ ^[13]。大量含 TCS 的个人护理品在使用过程中随生活污水进入污水处理厂, 然而当前的污水处理工艺并不能将其完全去除^[3,5]。瑞士污水处理厂现场检测报告显示, 在生活污水处理过程中, 79% 的 TCS 被生物降解, 15% 的 TCS 被污泥吸附, 其余 6% 的 TCS 则以 $42\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 的浓度存留在处理后的出水中被排放或回用^[3]。德国污水处理厂的调查也有类似发现, 即有 4%~10% 的 TCS 仍以溶解态存留在处理后的出水中^[14]。中国(深圳)污水处理厂对 TCS 的总去除率为 85.8%, 即大约 14% 的 TCS 存留在处理后的出水中^[14]。

污水处理过程中未被去除的 TCS 将随污水处理厂的出水排放以及污泥的资源化利用进入土壤、地表水环境继而进入河口、近海环境甚至地下水中。目前, 国内外不同国家和地区的河流、湖泊、河口及近海水生生态系统中 TCS 普遍, 其中临近污水处理厂出水口水域中 TCS 的浓度高达 $2\,300\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[14]。中国河流与河口表层水中 TCS 含量详情列于表1中。其他国家河流、湖泊与河口水体中 TCS 含量如表2所示。已有的调查研究均发现, 生活污水处理厂出水是自然水体中 TCS 的主要来源。河口、近海

表 1 中国河流与河口表层水中 TCS 的含量
Table 1 TCS contents in surface water from rivers and estuaries in China

调查时间 Investigation time	调查区域 Investigation area	含量/(ng·L ⁻¹) Concentration/(ng·L ⁻¹)			参考文献 Reference
		范围 Range	均值 Mean	中值 Median	
2005-09	香港火炭工业区河流 Fo Tan Industrial Park rivers in Hong Kong		26.0		[14]
2005-09	香港沙田区居民区河流 ShaTin residential area rivers in Hong Kong		37.6		
2005-12	香港维多利亚港湾 Hong Kong Victoria Harbour		99.3		
2005-06	香港大埔港湾 Hong Kong Tai Po Harbour		16.2		
2005-01	香港梧桐河 Hong Kong Nu Tung River	8.0 ~ 83.6	42.3		[15]
	香港林村河 Hong Kong Lam Tsuen River	1.2 ~ 133	38.6		
2007-12, 2008-09	广州珠江水系: Pearl River system, Guangzhou:				[13]
	流溪河 Liuxi River	<LOQ ~ 26.2	13.7	11.9	
	珠江(广州市段) Pearl River (Guangzhou Section)	6.5 ~ 31.1	16.8	16.2	
	石井河 Shijing River	90.2 ~ 478	242	238	
2008-05, 2008-11	黄河流域 Yellow River basin	<LOQ ~ 49.9	6.8	4.2	[16]
2008-07, 2008-11	辽河流域 Liaohe River basin	6.5 ~ 81.4	28.4	26.3	[16]
2007-12—2009-07	辽河流域 Liaohe River basin	2.40 ~ 404	27.4	18.0	[6]
2007-12—2009-07	海河(天津辖区) Haihe River (Tianjin District)	ND ~ 34.4	6.89	4.55	[6]
2007-12—2009-07	黄河(甘肃、河南省内) Yellow River (Gansu Province and Henan Province)	ND ~ 64.7	8.7	5.4	[6]
2007-12—2009-07	珠江流域 Pearl River basin	1.51 ~ 478	95.7	21.5	[6]
2007-12—2009-07	东江流域 Dongjiang River basin	<LOQ ~ 170	26.4	6.43	[6]
2011-03, 2011-08	山东济南小清河 Xiaoqing River in Jinan, Shandong Province	32 ~ 294	98.5	66	[17]
2011—2013	九龙河 Jiulong River	<LOQ ~ 64			[17]
2012—2013	九龙河入海口 Jiulong River estuary	2.56 ~ 27.2			
2012-07, 2012-12	东江流域: Dongjiang River basin:				[7]
	石马河 Shima River	ND ~ 82.3	38.0	31.7	
	淡水河 Danshui River	ND ~ 77.3	25.8	20.5	
	西枝江 Xizhi River	4 ~ 15.2	8.18	6.65	
	东江(惠州、东莞段) Dongjiang River (Huizhou, Dongguan District)	ND ~ 11.9	7.14	7.17	
2012-12, 2013-03, 2013-07	沙河 Shahe River	2.73 ~ 156	44.3	5.39	[18]

注: <LOQ 表示低于检出限, ND 表示未检出。

Note: <LOQ means below limit of quantitation; ND means not detected.

表 2 其他国家河流、湖泊与河口水体和沉积物中 TCS 的含量

Table 2 TCS contents in water and sediment in rivers, lakes and estuaries from different countries

国家地区 Country and area	调查时间 Investigation time	水体中的含量/(ng·L ⁻¹)	沉积物中的含量/(ng·g ⁻¹ 干重)	参考文献 Reference
		范围(均值) Contents in water/(ng·L ⁻¹) Range (Mean)	范围(均值) Contents in sediment /(ng·g ⁻¹ dry weight) Range (Mean)	
美国 30 个州的 139 条河流 139 rivers in thirty states of USA	1999—2000	<LOQ ~ 2 300(140)		[4]
美国哈德逊河下游及河口 The Lower Hudson River and its estuary, USA	2006—2007	1 ~ 9(3)	2 ~ 37(20)	[19]
美国科罗拉多州 Fountain 溪 Fountain Creek in Colorado, USA	不详 Not clear	3.9 ~ 28.3	<LOQ ~ 0.4	[20]
美国切萨皮克湾和牙买加海湾河口 The Chesapeake Bay and Jamaica Bay estuary, USA	2005, 2006		<LOQ ~ 800	[10]
美国乔治亚州萨凡纳市的河流 Rivers in Savannah, Georgia, USA	2008	0.9 ~ 9.3(4.5)	2.2 ~ 16(8.3)	[21]
美国罗德岛州格林威治湾河口 Greenwich Bay estuary in Rhode Island, USA	2010	<LOQ ~ 7.4	<LOQ ~ 32	[22]
加拿大境内河流普查 Survey of rivers in Canada	2012—2018	5.0 ~ 874		[23]
瑞士湖泊和河流 Lakes and rivers in Swiss	1998—2001	<0.4 ~ 74		[24]
英国南威尔斯塔夫和埃利河 Taff and Ely River in South Wales, UK	2006—2007	<LOQ ~ 95.0		[25]
德国易北河河口及近海 Ebe River estuary and offshore in Germany	2004, 2005	0.001 ~ 6.87(0.82)		[26]
德国科布伦茨境内的莱茵河 Rhine River in Koblenz, Germany	2008	3.3		[27]
德国美因河的 2 条支流 Two tributaries of the Main River, Germany	2009	17 ~ 275		[27]
罗马尼亚索梅什河 Somes River, Romania	不详 Not clear	<LOQ ~ 64.3		[28]
西班牙埃布罗河 Ebro River, Spain	2007	<LOQ ~ 285		[29]
西班牙伊比利亚半岛 4 条河流 Four rivers in the Iberian Peninsula, Spain	2010—2011	<LOQ ~ 19.0	ND ~ 388	[30]
希腊北部 Aisonas 河 Aisonas River in Northern Greece	2008	<3 ~ 98(26.7)		[31]
日本 Tone 运河 Tone Canal in Japan	2006	ND ~ 134		[32]
韩国汉江及支流 Han River and its tributary, Korea	2008	1.0 ~ 82(36)		[33]
日本生活污水污染的河流 River polluted by sewage in Japan	2010	ND ~ 177		[34]
印度泰米尔纳德邦的 3 条河流 Three rivers in Tamil Nadu State, India	2009	2 ~ 5 160	(18.1)	[35]
印度泰米尔纳德邦的 3 条河流 Three rivers in Tamil Nadu State, India	2015, 2016	2.2 ~ 1 119(68.2)	ND ~ 26.3(3.13)	[36]
澳大利亚昆士兰 5 条河流 Five rivers in Queensland, Australia	2004, 2005	14 ~ 75		[8]
巴西容迪亚伊河 Jundiá River, Brazil	2012, 2013	4.54 ~ 61.3(18.0)	5.56 ~ 903(120)	[37]
巴西伊瓜苏支流 Iguassu tributary, Brazil	2014, 2015	0.11 ~ 10.3		[38]
巴西桑托斯 Santos Bay, Brazil	2015		(15.1)	[39]

环境的潮汐运动会影响 TCS 在水环境中的扩散、分布。Ying 和 Kookana^[8]对澳大利亚 Queensland 地区污水处理厂出水排放口及周边水体的调查研究发现,排放口处 TCS 浓度为 $21 \sim 75 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,上游河流中 TCS 的浓度为 $20 \sim 50 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,下游河口水体中 TCS 的浓度为 $25 \sim 45 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,潮汐运动促使排入近海环境的污水处理厂出水与周围水体混合,因此,排放口上下游水体中 TCS 浓度水平没有显著差异,其来源均为污水处理厂出水排放。Bester^[40]在对德国 Rhine-Ruhr 地区的污水处理厂调查中也有类似发现,即出水排放口处 TCS 浓度约为 $20 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,上游河流中 TCS 的浓度低于 $1 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,下游河口处 TCS 的浓度低于 $2 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,出水排放口上下游浓度无显著差异。除了水流混合作用外,自然水环境中 TCS 也将发生降解转化,导致污水处理厂出水在河流入口处 TCS 的浓度高于周围水体中的浓度。Pintado 等^[41]对西班牙 Cadiz 地区污水处理厂出水与周围水体的调查研究发现,污水处理厂出水口处浓度为 $87 \sim 103 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,显著高于下游水体中 TCS 的浓度 ($71.5 \sim 72.5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)。此外,温度也会影响 TCS 在水环境中的降解速率。Ying 和 Kookana^[8]在不同季节对污水处理厂出水排放口及周边水体进行调查研究发现,夏季水体中 TCS 的浓度整体低于冬季水体中的浓度;Lv 等^[42]对中国福建九龙江的调查也发现,TCS 在夏季的降解速率较高,夏季光照会增强 TCS 的光降解速率,而且夏季的温度也利于微生物对 TCS 进行生物降解。此外,夏季为多雨季节,降水对自然水体中的 TCS 产生明显稀释作用。

除了污水处理厂的出水排放,生活和生产污水不经处理的非正规直接排放也是水环境中 TCS 的来源之一。人口密度高的城市和工业较为发达地区水环境中 TCS 浓度普遍高于偏远地区。Lindstrom 等^[24]对瑞士 Glatt 河的调查研究发现,受工厂、居民排污影响的河流中 TCS 的浓度为 $11 \sim 74 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。Zhao 等^[13]对我国广州市区石井河的调查发现,TCS 的浓度高达 $90.2 \sim 478 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,这主要是由于石井河位于广州市白云区人口密集区域,当地居民的生活污水直接排放至该河道,从而造成河水中 TCS 浓度较高。Wang 等^[16]对中国黄河流域兰州段的研究中也有类似发现,与其他调查河段(如开封市、潼关县等)相比,黄河流域兰州段 TCS 浓度约为 $49 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,高于其他河段水体中 TCS 的浓度。兰州作为甘肃省省会同时也是一座工业型城市,其中炼油厂、

石化工厂和橡胶厂等工业废水的不正规排放也是当地水体中 TCS 的来源之一。Lv 等^[42]对中国福建省九龙江流域的调查同样发现,靠近龙岩市市区的水体中 TCS 浓度约为 $27.25 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,远高于其他调查站位的浓度。然而,与居民和工业污水的不正规排放相比较,生活污水处理厂出水排放仍是水环境中 TCS 的主要来源。

由于 TCS 为疏水性化合物,其在水生生态系统中主要蓄积在沉积物中。目前,TCS 也已普遍存在于不同类型水生生态系统的沉积物中。中国河流与河口沉积物中 TCS 的含量如表 3 所示;其他国家河流与河口沉积物中 TCS 的含量如表 2 所示。对国内外水生生态系统沉积物中 TCS 的浓度水平比较发现,TCS 浓度主要与该地区的工业发达水平密切相关。Aguera 等^[45]调查 Barcelona 近海流域发现,沉积物中 TCS 的浓度高达 $130.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,这与流域周边兴建的大量工厂有一定关系。Wang 等^[16]对黄河流域兰州段的调查发现,沉积物中 TCS 的浓度约为 $14.0 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,而其他无排污口的河流段,如黄河流域郑州段、黄河流域开封段等均未有 TCS 被检出。类似现象在海河流域的调查也有发现,滦河流域承德段沉积物中 TCS 浓度为 $516.88 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,而其他无明显排污的河流,如大清河流域天津段和永定河流域天津段,TCS 浓度分别为 67.85 和 $67.55 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,远低于滦河流域承德段^[46],其主要原因可能是滦河流域调查段存在工业或生活污水未经处理直接排放的现象,使得该地区沉积物中 TCS 浓度较高。沉积物中的 TCS 还可能通过物理扰动、生物扰动以及疏浚工程等进入水体,成为二次污染源。

3 TCS 对水生生物的毒性效应 (Toxic effects of TCS on aquatic organisms)

随着 TCS 在水环境中被频繁检出,其对水生生物的潜在危害也越来越受关注。关于 TCS 对不同种类水生生物的急性和慢性毒性效应已有一些研究报道。有研究者根据已有毒性数据,利用物种敏感分布曲线得出对 5% 物种产生毒性效应的浓度,由此推导出 TCS 的水质基准进行风险评估。然而,不同实验室进行毒性研究中选择的受试物种、暴露时间和毒性指标等方面的差异,导致不同文献报道间毒性结果的不一致,即使用同样的推导方法,因选择毒性数据不同,推导出的风险基准值存在差异^[52]。本文仅选择代表性水生动物的常规生态毒理指标

表 3 中国河流与河口沉积物中 TCS 的含量
Table 3 TCS contents in sediments of rivers and estuaries in China

调查时间 Investigation time	调查区域 Investigation area	含量/(ng·g ⁻¹ 干重) Concentration/(ng·g ⁻¹ dry weight)			参考文献 Reference
		范围 Range	均值 Mean	中值 Median	
	广州珠江水系; Pearl River system in Guangzhou:				
2007-12, 2008-09	流溪河 Liuxi River	<LOQ ~ 116	56.5	50.5	[13]
	珠江(广州段) Pearl River (Guangzhou Section)	12.2 ~ 196	72.6	58.8	
	石井河 Shijing River	345 ~ 1 329	739	693	
2008-05,2008-11	黄河流域 Yellow River basin	<LOQ ~ 14			[16]
2008-07,2008-11	辽河流域 Liaohe River basin	<LOQ ~ 33.9	5.11	1.65	[43]
2007-12—2009-07	辽河流域 Liaohe River basin	ND ~ 40.0	5.46	2.40	
2007-12—2009-07	海河(天津辖区) Haihe River (Tianjin District)	<LOQ ~ 13.8	2.31	—	
2007-12—2009-07	黄河(甘肃、河南省内) Yellow River (Gansu Province and Henan Province)	ND ~ 13.3	1.37	—	[6]
2007-12—2009-07	珠江流域 Pearl River basin	<LOQ ~ 1 329	248	86.0	
2007-12—2009-07	东江流域 Dongjiang River basin	<LOQ ~ 656	47.5	7.99	
2011-03, 2011-08	小清河 Xiaoqing River	85 ~ 2 512	409	187	[17]
	东江流域; Dongjiang River basin:				
2012-07, 2012-12	石马河 Shima River	5.54 ~ 403	82.7	38.2	[7]
	淡水河 Danshui River	1.65 ~ 55.8	18.2	8.43	
	西枝江 Xizhi River	1.43 ~ 9.25	4.78	4.66	
	东江(惠州、东莞段) Dongjiang River (Huizhou, Dongguan District)	0.8 ~ 9.57	5.62	6.33	
2012-12, 2013-03, 2013-07	广东沙河 Shahe River in Guangdong	1.52 ~ 155	23.8	4.2	[18]
2015-08	广东北江及支流 Beijiang River and its tributary	ND ~ 64.9	7.01	1.63	[44]

研究结果进行分析,毒性效应如表 4 所示。目前,关于 TCS 对水生生物的急性毒性效应研究主要包括对鱼类的致死效应和生长发育抑制效应、对浮游藻类的生长抑制效应等。受试生物种类不同,TCS 的毒性效应差异也较大,如 TCS 对黑头呆鱼成鱼的 96 h 半数致死浓度(96 h-LC₅₀)为 260 μg·L⁻¹^[11],对日本青鲮鱼成鱼的 96 h-LC₅₀ 为 1 700 μg·L⁻¹^[48],对斑马鱼成鱼的 96 h-LC₅₀ 为 340 μg·L⁻¹^[49]。而且,对于同种鱼类而言,不同生长阶段的鱼类对 TCS 的敏感程度也不相同。Kim 等^[47]与 Nassef 等^[48]研究发现,TCS 对日本青鲮鱼仔鱼和成鱼的 96 h-LC₅₀ 分别为 600 和 1 700 μg·L⁻¹,造成此差异的原因可能是在

仔鱼刚从以自身卵黄为营养的胚胎期发育成从外界获取营养的仔鱼期,其身体发育仍处在不稳定状态,从而对 TCS 更为敏感。Oliveira 等^[49]研究发现,TCS 对斑马鱼胚胎和成鱼的 96 h-LC₅₀ 分别为 420 和 340 μg·L⁻¹,二者 LC₅₀ 值的差异可能是由于胚胎以自身卵黄为营养,而成鱼从外界环境摄食,因此,成鱼对 TCS 的暴露更多。相比于鱼类,藻类对 TCS 更加敏感,低浓度暴露下便会产生藻类生长抑制效应。TCS 对水华鱼腥藻和舟形藻的 96 h-EC₅₀ 分别为 0.97 和 19.1 μg·L⁻¹^[50],远低于对鱼类的 LC₅₀ 效应浓度。

TCS 暴露还会导致鱼类出现异常生长发育和行

表 4 TCS 对水生生物的毒性效应
Table 4 Toxic effects of TCS on aquatic organisms

受试生物 Test organism	发育阶段 Development phase	毒性指标 Toxicity index	效应浓度/(μg·L ⁻¹) Effective concentration/(μg·L ⁻¹)	参考文献 Reference
黑头呆鱼 (<i>Pimephales promelas</i>)	成鱼 Adult fish	96 h-LC ₅₀	260	[11]
日本青鲮鱼 (<i>Oryzias latipes</i>)	仔鱼 Fry	96 h-LC ₅₀	600	[47]
	成鱼 Adult fish	96 h-LC ₅₀	1 700	[48]
斑马鱼 (<i>Barchydanio rerio</i> var)	胚胎 Embryo	96 h-LC ₅₀	420	[49]
	成鱼 Adult fish	96 h-LC ₅₀	340	[49]
水华鱼腥藻 (<i>Anabaena aquae</i>)		生长抑制 Growth inhibition	0.97	[50]
舟形藻(<i>Navicula</i>)		生长抑制 Growth inhibition	19.1	[50]
青鲮鱼 (<i>Oryzias latipes</i>)	成鱼 Adult fish	游动速度改变 Swimming velocity change	170	[51]
虹鳉鱼 (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	仔鱼 Fry	脊柱弯曲、活动减少 Scoliosis, reduced activity	71.3	[11]
斑马鱼 (<i>Barchydanio rerio</i> var)	胚胎 Embryo	孵化延迟 Incubation delay	500	[49]
	仔鱼 Fry	脊柱变形、活动减少 Spinal deformation, reduced activity	700	[49]
	成鱼 Adult fish	平衡失调、鳃盖运动异常 Maladjustment of branchial movement	500	[49]

注: LC₅₀ 为半数致死浓度。
Note: LC₅₀ is 50% lethal concentration.

为反应,如生长发育抑制效应和运动抑制效应等,并对鱼类造成一定程度的组织损伤。受试生物所处生长阶段不同,受 TCS 影响的反应也不同。TCS 对鱼类胚胎的影响主要表现为孵化速率降低、畸形发育以及组织损伤。Oliveira 等^[49]研究发现,暴露于 TCS 溶液中的斑马鱼胚胎,孵化速率显著降低,且仔鱼出现眼睛和身体的色素沉积。TCS 对仔鱼的影响主要表现为运动抑制及一定程度的组织损伤。De-lorenzo 等^[11]研究发现,TCS 暴露下虹鳟鱼仔鱼出现运动显著减少的现象。Oliveira 等^[49]也发现,斑马鱼仔鱼在 TCS 暴露下表现出类似现象。此外,上述 2 项研究中 2 种仔鱼在 TCS 暴露下均出现了脊柱弯曲的现象。研究者猜测可能是由于 TCS 抑制了与骨骼发育系统相关的 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ -ATP 酶活性,使得仔鱼脊柱出现损伤,从而影响了其运动情况。TCS 对成鱼的慢性毒性也出现运动抑制效应。Oliveira 等^[49]发现,斑马鱼成鱼在 TCS 暴露下其游动速率发生改变;Nassef 等^[51]对青鳉鱼成鱼进行的 TCS 暴露研究也发现,成鱼游动速度会发生改变。

4 结语 (Summary)

TCS 已经在全球范围的水生生态系统普遍存在,并有学者推测,在经济发展水平较低的地区,因缺乏完善的生活污水处理系统,水环境中 TCS 含量可能更高,但这些地区的研究报道相对缺乏。虽然已有丰富的针对水生生物的毒性研究数据,但是尚缺乏专门针对底栖动物的毒性研究数据,因此不能对沉积物中 TCS 的生态风险进行准确评估。

通讯作者简介:田胜艳(1974—),女,博士,正高级实验师,主要研究方向为近海生态系统有机污染物环境行为及其生物毒性效应。

参考文献 (References):

- [1] Reiss R, Mackay N, Habig C, et al. An ecological risk assessment for triclosan in lotic systems following discharge from wastewater treatment plants in the United States [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2002, 21(11): 2483-2492
- [2] 徐海丽, 林毅, 孙倩, 等. 三氯生的生态效应及其在环境中的迁移转化[J]. *生态毒理学报*, 2012, 7(3): 225-233
Xu H L, Lin Y, Sun Q, et al. Ecological effects of triclosan and its migration and transformation in the environment [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(3): 225-233 (in Chinese)
- [3] Singer H, Muller S, Tixier C, et al. Triclosan: Occurrence and fate of a widely used biocide in the aquatic environment: Field measurements in wastewater treatment plants, surface waters, and lake sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(23): 4998-5004
- [4] Kolpin D W, Furlong E T, Meyer M T, et al. Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in US streams, 1999-2000: A national reconnaissance [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(6): 1202-1211
- [5] Kookana R S, Ying G G, Waller N J. Triclosan: Its occurrence, fate and effects in the Australian environment [J]. *Water Science and Technology*, 2011, 63(4): 598-604
- [6] Zhao J L, Zhang Q Q, Chen F, et al. Evaluation of triclosan and triclocarban at river basin scale using monitoring and modeling tools: Implications for controlling of urban domestic sewage discharge [J]. *Water Research*, 2013, 47(1): 395-405
- [7] Chen Z F, Ying G G, Liu Y S, et al. Triclosan as a surrogate for household biocides: An investigation into biocides in aquatic environments of a highly urbanized region [J]. *Water Research*, 2014, 58: 269-279
- [8] Ying G G, Kookana R S. Triclosan in wastewaters and biosolids from Australian wastewater treatment plants [J]. *Environment International*, 2007, 33(2): 199-205
- [9] von der Ohe P C, Schmitt-Jansen M, Slobodnik J, et al. Triclosan—The forgotten priority substance [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19(2): 585-591
- [10] Miller T R, Heidler J, Chillrud S N, et al. Fate of triclosan and evidence for reductive dechlorination of triclocarban in estuarine sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(12): 4570-4576
- [11] Delorenzo M E, Keller J M, Arthur C D, et al. Toxicity of the antimicrobial compound triclosan and formation of the metabolite methyl-triclosan in estuarine systems [J]. *Environmental Toxicology*, 2008, 23(2): 224-232
- [12] Fang J L, Stingley R L, Beland F A, et al. Occurrence, efficacy, metabolism, and toxicity of triclosan [J]. *Environmental Science and Health, Part C, Environmental Carcinogenesis and Ecotoxicology Reviews*, 2010, 28(3): 147-171
- [13] Zhao J L, Ying G G, Liu Y S, et al. Occurrence and risks of triclosan and triclocarban in the Pearl River system, South China: From source to the receiving environment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 179(1-3): 215-222
- [14] Wu J L, Lama N P, Dieter R M, et al. Triclosan determi-

- nation in water related to wastewater treatment [J]. *Talanta*, 2007, 72(5): 1650-1654
- [15] Chau W C, Wu J L, Cai Z. Investigation of levels and fate of triclosan in environmental waters from the analysis of gas chromatography coupled with ion trap mass spectrometry [J]. *Chemosphere*, 2008, 73(1): S13-S17
- [16] Wang L, Ying G G, Chen F, et al. Monitoring of selected estrogenic compounds and estrogenic activity in surface water and sediment of the Yellow River in China using combined chemical and biological tools [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 165: 241-249
- [17] Wang X K, Jiang X J, Wang Y N, et al. Occurrence, distribution, and multi-phase partitioning of triclocarban and triclosan in an urban river receiving wastewater treatment plants effluent in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(11): 7065-7074
- [18] Zhang N S, Liu Y S, Van den Brink P J, et al. Ecological risks of home and personal care products in the riverine environment of a rural region in South China without domestic wastewater treatment facilities [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 122: 417-425
- [19] Wilson B, Chen R F, Cantwell M, et al. The partitioning of triclosan between aqueous and particulate bound phases in the Hudson River estuary [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 59(4-7): 207-212
- [20] Gautam P, Carsella J S, Kinney C A. Presence and transport of the antimicrobials triclocarban and triclosan in a wastewater-dominated stream and freshwater environment [J]. *Water Research*, 2014, 48: 247-256
- [21] Kumar K S, Priya S M, Peck A M, et al. Mass loadings of triclosan and triclocarban from four wastewater treatment plants to three rivers and landfill in Savannah, Georgia, USA [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, 58(2): 275-285
- [22] Katz D R, Cantwell M G, Sullivan J C, et al. Factors regulating the accumulation and spatial distribution of the emerging contaminant triclosan in the sediments of an urbanized estuary: Greenwich Bay, Rhode Island, USA [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 443: 123-133
- [23] Lalonde B, Garron C, Dove A, et al. Investigation of spatial distributions and temporal trends of triclosan in Canadian surface waters [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, 76(2): 231-245
- [24] Lindstrom A, Buerge I J, Poiger T, et al. Occurrence and environmental behavior of the bactericide triclosan and its methyl derivative in surface waters and in wastewater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36 (11): 2322-2329
- [25] Kasprzyk H B, Dinsdale R M, Guwy A J. The occurrence of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs in surface water in South Wales, UK [J]. *Water Research*, 2008, 42(13): 3498-3518
- [26] Xie Z, Ebinghaus R, Floer G, et al. Occurrence and distribution of triclosan in the German Bight (North Sea) [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156(3): 1190-1195
- [27] Wick A, Fink G, Ternes T A. Comparison of electrospray ionization and atmospheric pressure chemical ionization for multi-residue analysis of biocides, UV-filters and benzothiazoles in aqueous matrices and activated sludge by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2010, 1217 (14): 2088-2103
- [28] Moldovan Z. Occurrences of pharmaceutical and personal care products as micropollutants in rivers from Romania [J]. *Chemosphere*, 2006, 64(11): 1808-1817
- [29] Kantiani L, Farre M, Asperger D, et al. Triclosan and methyl-triclosan monitoring study in the northeast of Spain using a magnetic particle enzyme immunoassay and confirmatory analysis by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 361(1-2): 1-9
- [30] Gorga M, Insa S, Petrovic M, et al. Occurrence and spatial distribution of EDCs and related compounds in waters and sediments of Iberian rivers [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 503: 69-86
- [31] Stasinakis A S, Mermigka S, Samaras V G, et al. Occurrence of endocrine disruptors and selected pharmaceuticals in Aisonas River (Greece) and environmental risk assessment using hazard indexes [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19(5): 1574-1583
- [32] Nishi I, Kawakami T, Onodera S. Monitoring of triclosan in the surface water of the Tone Canal, Japan [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, 80(2): 163-166
- [33] Yoon Y, Ryu J, Oh J, et al. Occurrence of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals, and personal care products in the Han River (Seoul, South Korea) [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(3): 636-643
- [34] Kimura K, Kameda Y, Yamamoto H, et al. Occurrence of preservatives and antimicrobials in Japanese rivers [J]. *Chemosphere*, 2014, 107: 393-399
- [35] Ramaswamy B R, Shanmugam G, Velu G, et al. GC-MS analysis and ecotoxicological risk assessment of triclosan, carbamazepine and parabens in Indian rivers [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(2-3): 1586-1593
- [36] Venkatesan A K, Pycke B F G, Barber L B, et al. Occurrence of triclosan, triclocarban, and its lesser chlorinated

- congeners in Minnesota freshwater sediments collected near wastewater treatment plants [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 229: 29-35
- [37] Ribeirde Sousa D N, Mozeto A A, Carneiro R L, et al. Spatio-temporal evaluation of emerging contaminants and their partitioning along a Brazilian watershed [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25 (5): 4607-4620
- [38] Mizukawa A, Reichert G, Filipe T C, et al. Occurrence and risk assessment of personal care products in subtropical urban rivers [J]. *Environmental Engineering Science*, 2018, 35(11): 1263-1272
- [39] Pusceddu F H, Choueri R B, Pereira C D S, et al. Environmental risk assessment of triclosan and ibuprofen in marine sediments using individual and sub-individual endpoints [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 232: 274-283
- [40] Bester K. Fate of triclosan and triclosan-methyl in sewage treatment plants and surface waters [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2005, 49(1): 9-17
- [41] Pintado H M G, González M E, Lara M P A. Atmospheric pressure gas chromatography-time-of-flight-mass spectrometry (APGC-ToF-MS) for the determination of regulated and emerging contaminants in aqueous samples after stir bar sorptive extraction (SBSE) [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2014, 851: 1-13
- [42] Lv M, Sun Q, Xu H, et al. Occurrence and fate of triclosan and triclocarban in a subtropical river and its estuary [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 88(1-2): 383-388
- [43] Wang L, Ying G G, Zhao J L, et al. Assessing estrogenic activity in surface water and sediment of the Liao River system in northeast China using combined chemical and biological tools [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159 (1): 148-156
- [44] Chen Z F, Wen H B, Dai X, et al. Contamination and risk profiles of triclosan and triclocarban in sediments from a less urbanized region in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 357: 376-383
- [45] Aguera A, Fernandez-Alba A R, Piedra L, et al. Evaluation of triclosan and biphenylol in marine sediments and urban wastewaters by pressurized liquid extraction and solid phase extraction followed by gas chromatography mass spectrometry and liquid chromatography mass spectrometry [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2003, 480(2): 193-205
- [46] 杨林. 海河流域底泥中残留药物与个人护理品的检测及生态风险分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011: 1-57
- Yang L. Pharmaceutical and personal care products residues in Haihe River sediments testing and ecological risk analysis [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2011: 1-57 (in Chinese)
- [47] Kim J W, Ishibashi H, Yamauchi R, et al. Acute toxicity of pharmaceutical and personal care products on freshwater crustacean (*Thamnocephalus platyurus*) and fish (*Oryzias latipes*) [J]. *Journal of Toxicological Sciences*, 2009, 34(2): 227-232
- [48] Nassef M, Matsumoto S, Seki M, et al. Pharmaceuticals and personal care products toxicity to Japanese medaka fish (*Oryzias latipes*) [J]. *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University*, 2009, 54(2): 407-411
- [49] Oliveira R, Domingues I, Grisolia C K, et al. Effects of triclosan on zebrafish early-life stages and adults [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2009, 16(6): 679-688
- [50] US EPA. ECOTOX Database [EB/OL]. [2019-03-13]. <http://cfpub.epa.gov/ecotox.htm>.
- [51] Nassef M, Kim S G, Seki M, et al. In ovo nanoinjection of triclosan, diclofenac and carbamazepine affects embryonic development of medaka fish (*Oryzias latipes*) [J]. *Chemosphere*, 2010, 79(9): 966-973
- [52] Hill K L, Breton R L, Manning G E, et al. Deriving a water quality guideline for protection of aquatic communities exposed to triclosan in the Canadian environment [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2018, 14(4): 437-441 ◆