

两种季铵盐阳离子表面活性剂对水生生物的毒性效应

李祥英, 杨法辉, 李秀环, 刘 峰, 慕 卫*

(山东农业大学植物保护学院, 山东省农药毒理与应用技术实验室, 山东 泰安 271018)

摘 要:为评价两种季铵盐阳离子表面活性剂对水生态的安全性,运用评价化学品对水生生物毒性的标准试验方法,测定了十二烷基二甲基苄基氯化铵(1227)和双八、十烷基季铵盐(C8-10)两种季铵盐阳离子表面活性剂对3种水生生物(斜生栅藻、大型溞和斑马鱼)的毒性。结果表明,在 $0.05\sim 0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的浓度范围内,1227、C8-10对斜生栅藻的毒性表现出明显的剂量-效应关系,随处理浓度的增大抑制效应增强, $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ C8-10对斜生栅藻具有杀灭作用;同时1227、C8-10与斜生栅藻还存在时间-效应关系,处理后抑制率随时间呈先升高后下降的趋势,72 h时抑制率最高。1227和C8-10对斜生栅藻96 h的 EC_{50} 分别为 0.109 、 $0.103\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,对大型溞的48 h LC_{50} 分别为 1.56×10^{-2} 、 $1.45\times 10^{-2}\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,对斑马鱼的96 h LC_{50} 分别为 2.36 、 $2.19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。C8-10对3种水生生物的毒性均高于1227,两种季铵盐阳离子表面活性剂对大型溞和斑马鱼的致死率(LC_{50})均随作用时间延长逐渐减小。

关键词:季铵盐阳离子表面活性剂;斜生栅藻;大型溞;斑马鱼;毒性

中图分类号:X503.225 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)04-0673-06

Toxicity of Two Quaternary Ammonium Cationic Surfactants to Aquatic Organisms

LI Xiang-ying, YANG Fa-hui, LI Xiu-huan, LIU Feng, MU Wei*

(College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Key Laboratory of Pesticide Toxicology & Application Technique of Shandong Province, Tai'an 271018, China)

Abstract: Quaternary ammonium cationic surfactants are one of the most widely used surfactants in the world and *Scenedesmus oblique*, *Daphnia magna* and *Brachydonio rerio* stand as three prime examples of aquatic-ecosystem. In order to evaluate the safety of two quaternary ammonium cationic surfactants on aquatic organisms, *S. oblique*, *D. magna* and *B. rerio* were exposed to assess the toxic effects of 1227 and C8-10, according to the commendatory standard test method named Experimental Guideline for Environmental Safety Evaluation of Chemical Pesticide. The results indicated that both 1227 and C8-10 with *S. oblique* showed obviously dose-response relationship at the concentration from $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The inhibition rate increased significantly with the increase of concentration and $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of C8-10 could kill the *S. oblique* cells. Meanwhile, there was a significant time-response relationship between the inhibition and the exposure time. The inhibition rate increased at first, then decreased and the highest inhibition rate happened at 72 h. The 96 h- EC_{50} values of 1227 and C8-10 to *S. oblique* were $0.109\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.103\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The 48 h- LC_{50} values of 1227 and C8-10 to *D. magna* were $1.56\times 10^{-2}\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $1.45\times 10^{-2}\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The 96 h- LC_{50} values of 1227 and C8-10 to *B. rerio* were $2.36\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $2.19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. All of the toxicity of C8-10 were higher than 1227. LC_{50} values of *D. magna* and *B. rerio* decreased gradually with the exposure time increasing.

Keywords: quaternary ammonium cationic surfactant; *Scenedesmus oblique*; *Daphnia magna*; *Brachydonio rerio*; toxicity

季铵盐类阳离子表面活性剂是目前用量最大,应用最广的一类表面活性剂,迄今已有近80 a的开发使用历史,涵盖卫生、造纸、纺织、涂料、道路建设等诸

多领域^[1-2]。在工农业中此类阳离子表面活性剂主要用于杀菌、灭藻,农业操作器械、运输工具、工装的表面消毒等^[3]。仇春华、张珩、洪爱华等的研究证明,多种季铵盐类表面活性剂在控制工业循环冷却水中的藻类、海洋中的球形棕囊藻、塔玛亚历山大藻和海洋原甲藻等赤潮生物中,表现出良好的灭杀效果^[4-6]。李银涛、曾鹰等曾报道季铵盐类阳离子表面活性剂对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、枯草杆菌、痢疾杆菌、伤寒杆

收稿日期:2011-11-05

基金项目:公益性行业(农业)科研专项资助(200903033)

作者简介:李祥英(1987—),女,山东蒙阴人,硕士研究生,主要从事农药残留与环境毒理学方面的研究。

E-mail:lxky521@163.com

* 通讯作者:慕 卫 E-mail:muwei@sdau.edu.cn

菌、嗜水气单胞菌和柱状屈柄杆菌等许多病原细菌有较高的抑制和杀灭活性^[7-9]。陈召亮、Nel 和 Moore 等的研究发现,季铵盐类阳离子表面活性剂对番茄灰霉病菌、核盘菌、香蕉枯萎病菌和镰孢菌等植物病原真菌表现出较高的抑菌活性^[10-15]。

季铵盐阳离子表面活性剂的开发和使用总体呈上升趋势。尽管阳离子表面活性剂对哺乳动物较为安全,但其可能引起的环境毒性问题也应引起人们重视。曹西华、吴萍等通过毒性试验发现十六烷基三甲基溴化铵(HDTMA)、双烷基聚氧乙烯基三季铵盐(DPQAC)、三烷基聚氧乙烯基三季铵盐(TPQAC)和 C12 烷基多糖苷季铵盐(C12AGQAC)对日本对虾仔虾和黑褐新糠虾能产生较高的急性毒性,证明季铵盐类阳离子表面活性剂对水生生物存在潜在的安全威胁^[9]。

1227 属于第一代烷基二甲基卤化铵类杀菌剂,2006 年作为杀菌剂登记用于苹果炭疽病的防治,C8-10 属于第三代双烷基二甲基卤化铵类杀菌剂,主要是与第一代杀菌剂混合使用,以增加其活性和延缓抗性的产生,正在蔬菜病害防治上进行登记试验。斜生栅藻、大型溞和斑马鱼是水生生态系统食物链中 3 个营养级的代表生物,将其用于评价两种药剂的毒性效应,有助于评估其对水生系统可能造成的危害,为生态风险安全评价提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

斜生栅藻(*Scenedesmus oblique*),购于中国科学院水生生物研究所淡水藻种库,采用水生 4 号培养基实验室内转接扩大培养;大型溞(*Daphnia magna*)引种于中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所,为 62 D.M 纯品系生物株,参照大型溞测试标准方法进行饲养,经实验室驯化培养后使其保持在孤雌生殖状态,选择出生 6~24 h,活泼、健康、大小尽量一致的幼溞用于试验;斑马鱼(*Brachydonio rerio*),购于当地水族馆,体长(2.00±0.1)cm,实验室条件下驯养 7 d 以上,死亡率保持在 5%以下,挑选体长均匀一致、健康活泼的个体用于试验。

80% 十二烷基二甲基苄基氯化铵(dodecyl dimethyl benzyl ammonium chloride,简称 1227,m/m)、70% 双八、十烷基季铵盐(double-stranded quaternary ammonium salt,简称 C8-10,m/m),均由中国日用化工研究院提供。

1.2 藻类生长抑制试验

参考 OECD 藻类受抑制测试标准方法^[16],并依据文献[17]进行适当修改。根据预备试验结果,设置两种季铵盐阳离子表面活性剂的浓度为 0.05、0.1、0.2、0.5 mg·L⁻¹ 以及 1 个对照组。每个浓度设 4 组平行,结果取 4 组均值。在 250 mL 容量瓶中加入 50 mL 浓度为 2×10⁴ cells·mL⁻¹ 的藻液和 50 mL 两倍试验浓度药液,并摇匀。于光照培养箱内静置培养,每日定时摇动 5 次,试验水温(24.0±1.0)℃,光照昼夜比为 16 h:8 h,光强 4 800 lx。用 T6 型分光光度计在 650 nm 处测定藻液的吸收值(A)以表示斜生栅藻的生长量,分别于第 0、24、74、96、120、168、216、264 h 测定斜生栅藻的生长情况。

1.3 大型溞急性毒性试验

参照 OECD 大型溞受抑制测试标准方法进行^[18]。根据预备试验结果,设置两种季铵盐阳离子表面活性剂的浓度为 0.2×10⁻²、0.4×10⁻²、0.8×10⁻²、1.6×10⁻²、3.2×10⁻²、4.8×10⁻²、6.4×10⁻² mg·L⁻¹ 以及 1 个对照组,每个浓度设 3 组平行,结果取 3 组均值。在 50 mL 烧杯内加入 30 mL 不同浓度的溶液和 10 只溞龄在 6~24 h 的幼溞。试验水温为(20±1)℃,自然光照条件下,静置培养。分别于 24、48、72、96 h 观察记录大型溞的中毒及死亡状况。

1.4 斑马鱼急性毒性试验

参照 OECD 斑马鱼受抑制测试标准方法^[19]进行。根据预备实验结果,试验设置浓度分别为 2.1、2.3、2.5、2.7、2.9、3.1、3.3 mg·L⁻¹ 以及 1 个对照组,每次试验设 3 组平行,结果取 3 组均值。在每一试验浓度组和对照试验组容器内随机放入 10 尾斑马鱼,试验水温为(23±1)℃,自然光照,半静态培养。分别于 24、48、72、96 h 观察记录斑马鱼的中毒及死亡情况。

1.5 数据处理

采用 Excel 2003 软件对数据进行统计,计算各试验均值及标准偏差。采用机率单位法,利用 SPSS16.0 统计软件进行半数致死浓度(LC₅₀)或半数抑制浓度(EC₅₀)及 95%置信限的计算。

2 结果与分析

2.1 两种季铵盐阳离子表面活性剂对斜生栅藻的毒性

2.1.1 斜生栅藻细胞密度与吸光度的线性关系

在不同浓度药液作用下,藻细胞密度 y 与在 650 nm 下测定的吸光度值 x 之间的线性回归方程为:

$$y=765.89x-2.7056(R^2=0.9999)$$

表明在试验体系下斜生栅藻藻细胞密度与藻液的吸光度值之间存在较好的相关性。

2.1.2 两种季铵盐阳离子表面活性剂对斜生栅藻生长的抑制效应

由图 1 可见，随两种季铵盐阳离子表面活性剂浓度的升高，其对斜生栅藻生长的抑制作用逐渐增强，呈现出良好的剂量-效应关系。经 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ C8-10 处理后，斜生栅藻不再生长，表明该处理对其有杀灭作用，而相同浓度 1227 的处理在第 7 d 时又开始重新生长，表明该处理对斜生栅藻只是暂时抑制，当 1227 降解浓度降低时则恢复生长。对斜生栅藻的生长抑制率，两者均呈先升高后降低的趋势，在第 3 d 时抑制率最高，这与张珩等^[20]的研究结果一致，并且低浓度 C8-10 处理从第 7 d 开始表现出轻微促进生长的现象。

由表 1 可以看出，两种季铵盐阳离子表面活性剂的作用浓度与斜生栅藻的生长抑制间存在较好的线性相关性。其 96 h EC_{50} 分别为 0.109 、 $0.103\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，根据国家环境保护总局《化学农药环境安全评价试验准则》^[21]的毒性分级，1227 和 C8-10 对斜生栅藻的急性

表 1 1227 和 C8-10 暴露下对斜生栅藻不同时间的 EC_{50}
Table 1 EC_{50} of 1227 and C8-10 to *S. oblique* at different exposure time

1227			C8-10		
作用时间/ h	$\text{EC}_{50}/$ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	95%置信限	作用时间/ h	$\text{EC}_{50}/$ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	95%置信限
24	0.223	0.171~0.294	24	0.116	0.094~0.142
72	0.090	0.070~0.116	72	0.068	0.054~0.085
96	0.109	0.104~0.114	96	0.103	0.091~0.117
120	0.126	0.108~0.145	120	0.114	0.096~0.134
168	0.189	0.136~0.262	168	0.188	0.157~0.225
216	0.309	0.216~0.444	216	—	—
264	0.448	0.359~0.560	264	—	—

毒性均为高毒，且 C8-10 的毒性高于 1227。

镜检经两种季铵盐阳离子表面活性剂处理 96 h 的斜生栅藻细胞，发现与对照相比游离的细胞数量增加，细胞明显交错排列，部分细胞的颜色变浅，内含物增加，色素体受损。

2.2 两种季铵盐阳离子表面活性剂对大型溞的急性毒性

由图 2 可知，随着大型溞在两种季铵盐阳离子表

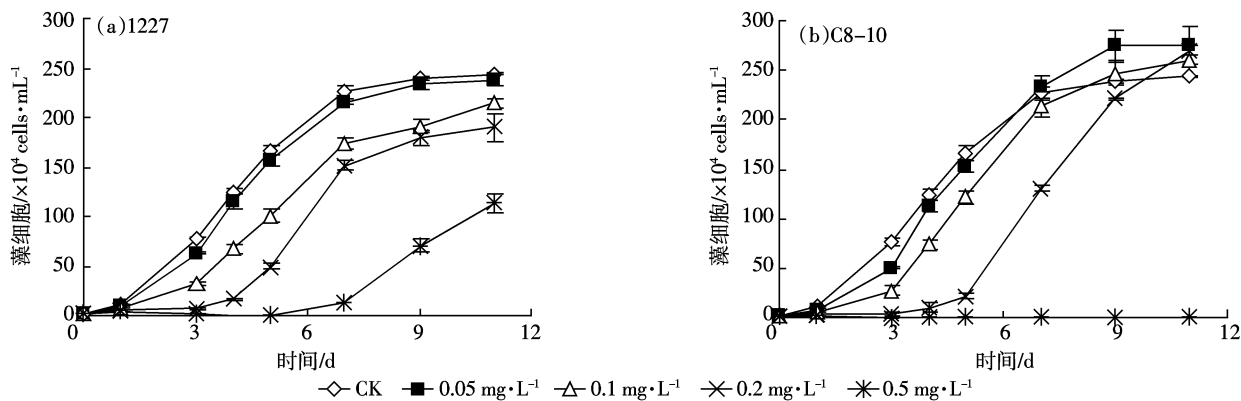


图 1 1227(a)和 C8-10(b)暴露下斜生栅藻的生长曲线
Figure 1 The growth curve of *S. oblique* with the exposure of 1227 and C8-10

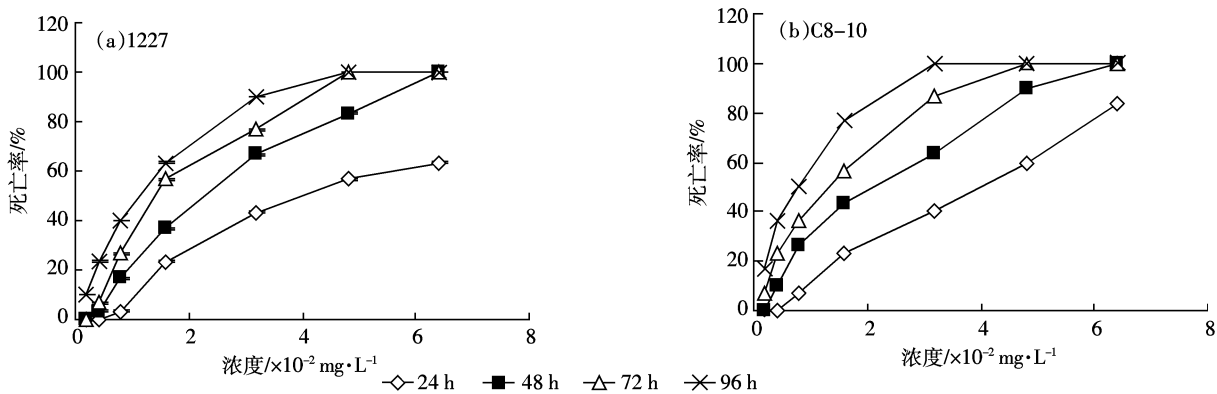


图 2 1227(a)和 C8-10(b)暴露下大型溞不同时间的死亡率
Figure 2 The death rate of *D. magna* with the different exposure time of 1227 and C8-10

面活性剂溶液中暴露时间的延长,大型蚤的死亡率逐渐增加,其剂量-效应曲线呈现 S 型。

由表 2 可以看出,随作用时间延长,两种季铵盐阳离子表面活性剂对大型蚤的 LC_{50} 逐渐减小,1227 由 $3.86 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 减小到 $0.665 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,C8-10 由 $3.42 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 减小到 $0.496 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。其 48 h LC_{50} 分别为 $1.56 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.44 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,根据国家环境保护总局《化学农药环境安全评价试验准则》^[21]的毒性分级,1227 和 C8-10 对大型蚤的急性毒性均为剧毒,且 C8-10 的毒性高于 1227。

表 2 1227 和 C8-10 暴露下对大型蚤不同时间的 LC_{50}

Table 2 LC_{50} of 1227 and C8-10 to *D. magna* at different

exposure time

1227			C8-10		
暴露时间/ h	$LC_{50}/\times 10^{-2}$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	95% 置信限	暴露时间/ h	$LC_{50}/\times 10^{-2}$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	95% 置信限
24	3.86	2.50~5.97	24	3.42	2.27~5.15
48	1.56	0.975~2.51	48	1.44	0.864~2.38
72	1.13	0.782~1.63	72	0.708	0.385~1.30
96	0.665	0.362~1.22	96	0.496	0.290~0.850

试验中观察到,经 1227 和 C8-10 处理的大型蚤中毒后游动速度明显减慢,触角后束,基本观察不到摆动,体色发白,不再透明,死后沉于杯底,个别大型蚤出现内脏皱缩的现象。

2.3 两种季铵盐阳离子表面活性剂对斑马鱼的急性毒性

斑马鱼在不同时间的死亡率曲线(图 3)是剂量-效应关系中最常见的 S 型曲线,且比大型蚤的更为典型。由表 3 可以看出,随时间延长,两种表面活性剂对斑马鱼的 LC_{50} 呈减小趋势,1227 由 $2.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 减小

表 3 1227 和 C8-10 暴露下对斑马鱼不同时间的 LC_{50}

Table 3 LC_{50} of 1227 and C8-10 to *B. rerio* at different

exposure time

1227			C8-10		
作用时间/ h	$LC_{50}/$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	95%置信限	作用时间/ h	$LC_{50}/$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	95%置信限
24	2.73	2.59~2.88	24	2.54	2.37~2.71
48	2.62	2.51~2.73	48	2.39	2.34~2.55
72	2.56	2.46~2.66	72	2.24	2.04~2.46
96	2.36	2.21~2.52	96	2.19	2.20~2.41

到 $2.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,C8-10 由 $2.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 减小到 $2.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其 96 h LC_{50} 分别为 2.36 、 $2.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,根据国家环境保护总局《化学农药环境安全评价试验准则》^[21]的毒性分级,1227 和 C8-10 对斑马鱼的急性毒性均为中毒,C8-10 毒性高于 1227。

经 1227 和 C8-10 作用的斑马鱼在开始时游动加快,无方向感,高浓度处理更为强烈,经长时间处理后,无论浓度高低均出现游动迟缓,丧失平衡的现象。相对于大型蚤,斑马鱼的体型更大,对药物的耐受能力更强,所以大型蚤对 1227 和 C8-10 的毒性表现为剧毒,而对斑马鱼表现为中毒。

3 讨论

季铵盐阳离子表面活性剂的分子结构主要分为阳离子基团和阴离子两部分,阳离子基团多由 4 个有机根与氮原子结合而成,是产生活性的有效部分^[3]。在水中季铵盐带正电荷,而多数生物细胞带负电荷,带正电荷的季铵盐被带负电荷的生物细胞吸附,并逐步渗入细胞浆的类脂层和蛋白质中,改变胞膜通透性,使细胞内容物外渗,同时凝固蛋白,使酶和结构蛋白变性,破坏细胞的代谢,导致细胞死亡,这也是引起水

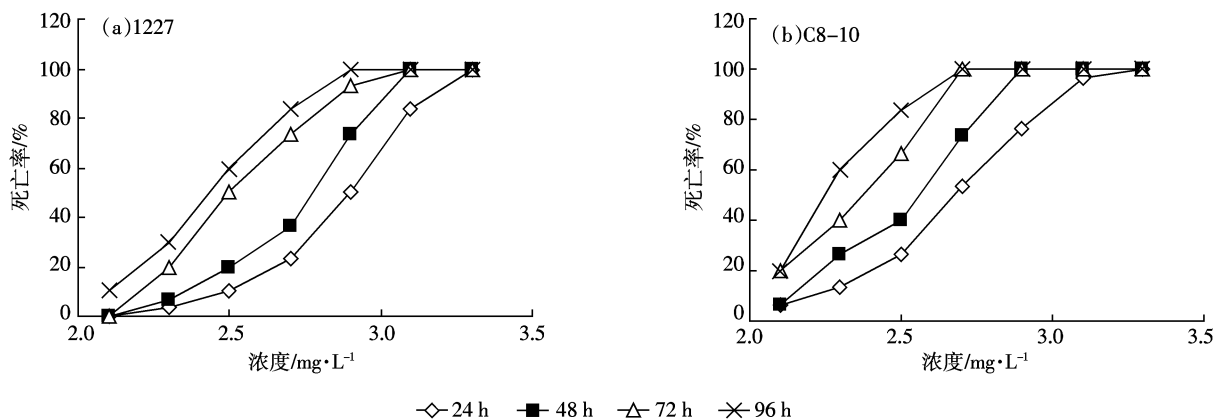


图 3 1227(a)和 C8-10(b)暴露下斑马鱼不同时间死亡率

Figure 3 The death rate of *B. rerio* with different exposure time of 1227 and C8-10

生生物中毒的主要机制。

斜生栅藻、大型溞和斑马鱼分属于水生系统中的初级生产者、初级消费者和次级消费者,其中大型溞对两种季铵盐阳离子表面活性剂最敏感,而大型溞作为联系初级生产者和次级消费者的初级消费者,其对毒物的高敏感性极易导致水生食物链物质和能量传递的中断。有人曾报道初级消费者在淡水生态系统中有着重要的作用,是生物操纵的关键因子之一,其捕食作用能够控制可食性自养生物的生物量,从而影响初级生产力,对水质的净化具有重要作用^[22],所以两种季铵盐阳离子表面活性剂对水生系统有着至关重要的影响。

本研究结果还表明 C8-10 对 3 种水生生物的毒性要高于 1227,笔者认为这主要是其结构差异造成的。C8-10 是具有两个短链烷基的双链季铵盐,相对于具有一个烷基的单链季铵盐 1227 来说,具有更好的胶束形成和更强的表面张力降低能力,从而增强其渗透力,表现出更高的毒性^[23]。对双烷基二甲基卤化铵的活性,已有大量研究证明其在各领域的应用潜能广阔^[24],在个别领域活性要高于单烷基二甲基卤化铵,如杨威等报道双辛基二甲基溴化铵对 SRB 表现出良好的杀菌活性,且活性高于 1227^[25],加之 1227 在工业中已被作为杀菌灭藻剂应用多年,抗性逐步显现,所以越来越多的关注可能会投向双链季铵盐,相应地其对环境生物的安全性还需要进行更广泛的评价。此外,两种季铵盐阳离子表面活性剂对水生生物是否存在长期毒性效应及产生毒性的详细机制也有待进一步深入研究。

4 结论

试验表明,两种季铵盐阳离子表面活性剂 1227 和 C8-10 对斜生栅藻的急性毒性为高毒,并随作用时间的延长表现出抑制率先升高后降低的总趋势;对大型溞和斑马鱼的急性毒性分别为剧毒和中毒,不同时间的 LC₅₀ 随作用时间的延长而逐渐减小。综合评价 1227 和 C8-10 对斜生栅藻、大型溞和斑马鱼的毒性效应结果,认为出 C8-10 对水生生物的毒性略高于 1227。

参考文献:

- [1] 常青春. 季铵盐型阳离子表面活性剂的发展及应用 [J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2003, 21(4):503-506.
CHANG Qing-chun. The development and application of quaternary ammonium salt cationic surfactant[J]. *Journal of Jiamusi University* (Natural Science Edition), 2003, 21(4):503-506.
- [2] 薛文青, 薛广波. 季铵盐类阳离子表面活性消毒剂研究进展[J]. 中华医院感染杂志, 2002, 12(8):634-636.
XUE Wen-qing, XUE Guang-bo. Development of quaternary ammonium salt cationic surfactant in disinfection and antiseptic field[J]. *China Journal of Nosocomiol*, 2002, 12(8):634-636.
- [3] 张文福. 表面活性剂在消毒领域的应用[J]. 日用化学工业, 2004, 34(2):108.
ZHANG Wen-fu. Application of surfactant in disinfection and antiseptic field[J]. *Daily Chemical Industry*, 2004, 34(2):108.
- [4] 仇春华, 韩宝华. 季铵盐控制工业循环冷却水中的藻类生长[J]. 工业水处理, 1992, 4:23-25.
QIU Chun-hua, HAN Bao-hua. Control of algae on industrial cooling water[J]. *Industrial Water Treatment*, 1992, 4:23-25.
- [5] 洪爱华, 尹平河, 赵玲, 等. 新洁而灭对海洋原甲藻赤潮生物的灭杀与抑制[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(2):64-67.
HONG Ai-hua, YIN Ping-he, ZHAO Ling, et al. Studies on bromogeramine for removing and controlling prorocentrum micans red tide [J]. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(2):64-67.
- [6] 曹西华, 俞志明. 季铵盐类化合物灭杀赤潮藻的实验研究[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(2):201-207.
CAO Xi-hua, YU Zhi-ming. Arternary ammonium compounds extingishing heterosigma akasiwo[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2003, 34(2):201-207.
- [7] 曾鹰, 许美丽, 艾桃山, 等. 双烷基季铵溴盐的合成及其对水产病原菌抑菌作用[J]. 广州化工, 2006, 34(4):50-52.
ZENG Ying, XU Mei-li, AI Tao-shan, et al. Synthesis of dialkyl quaternary ammonium bromides and their inhibiting effect to aquatic pathogenic bacteria[J]. *Guangzhou Chemicals*, 2006, 34(4):50-52.
- [8] 李银涛, 蒋晓慧, 陈志, 等. 单吡啶季铵盐表面活性剂的合成及杀菌性能[J]. 化学研究与应用, 2005, 17(3):411-413.
LI Yin-tao, JIANG Xiao-hui, CHEN Zhi, et al. Synthesis and study of bactericidal ability of PS[J]. *Chemical Research and Application*, 2005, 17(3):411-413.
- [9] 彭明军, 张天宝, 黄晓波, 等. 一种复方季铵盐消毒液消毒效果与毒性评价[J]. 公共卫生与预防医学, 2005, 16(6):15-17.
PENG Ming-jun, ZHANG Tian-bao, HUANG Xiao-bo, et al. Efficacy and toxicity of a complex quaternary ammonium salt[J]. *Journal of Pub Health and Prev Medicine*, 2005, 16(6):15-17.
- [10] Nelb, Steinbergc, Labuschagnen, et al. Evaluation of fungicides and sterilants for potential application in the management of fusarium wilt of banana[J]. *Crop Protection*, 2007, 26(4):697-705.
- [11] Moore N Y, Pegg K G, Bentley S, et al. Fusarium wilt of banana: Global problems and perspectives [J]. *Banana Fusarium Wilt Management: Towards Sustainable Cultivation*, 2001:11-30.
- [12] 于婷, 尚玉珂, 石怀兴, 等. 几种季铵盐阳离子表面活性剂对核盘菌的抗菌活性[J]. 农药学报, 2008, 10(1):99-104.
YU Ting, SHANG Yu-ke, SHI Huai-xing, et al. Antifungal activity of cationic surfactants quaternary ammonium salt on *Sclerotinia sclerotiorum*[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2008, 10(1):99-104.
- [13] 陈召亮, 朱炳煜, 刘峰, 等. 两种季铵盐阳离子表面活性剂对番茄

- 灰霉病菌的生物活性[J]. 植物保护学报, 2007, 34(5):539-544.
- CHEN Zhao-liang, ZHU Bing-yu, LIU Feng, et al. Antifungal activity of two quaternary ammonium cationic surfactants against *Botrytis cinerea*[J]. *Acta Phytophylacica Sinica*, 2007, 34(5):539-544.
- [14] 李祥英, 赵丽静, 陈召亮, 等. 两种季铵盐阳离子表面活性剂对番茄灰霉病菌的毒理效应[J]. 植物保护学报, 2011, 38(3):265-270.
- LI Xiang-ying, ZHAO Li-jing, CHEN Zhao-liang, et al. The toxicological effects of quaternary ammonium cationic surfactant to *Botrytis cinerea*[J]. *Acta Phytophylacica Sinica*, 2011, 38(3):265-270.
- [15] 杨晓楠, 韩 君, 赵丽静, 等. 季铵盐阳离子表面活性剂对三种灰葡萄孢菌的敏感性测定[J]. 农药研究与应用, 2010, 14(5):24-26.
- YANG Xiao-nan, HAN Jun, ZHAO Li-jing, et al. Sensitivity of *Botrytis cinerea* strain to quaternary ammonium cationic surfactants[J]. *Agrochemicals Research & Application*, 2010, 14(5):24-26.
- [16] OECD 201. Freshwater alga and cyanobacteria, growth inhibition test [S]. 2006.
- [17] 牧 辉, 彭新晶, 戴 宁, 等. 离子液体 [C8mim]PF₆ 对水生生物的毒性作用[J]. 中国环境科学, 2009, 29(11):1196-1201.
- MU Hui, PENG Xin-jing, DAI Ning, et al. Toxicity of [C8mim]PF₆ to aquatic organisms[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(11):1196-1201.
- [18] OECD 202. Daphnia SP, Acute immobilisation test[S]. 2004.
- [19] OECD 203. Fish, acute toxicity test[S]. 1992.
- [20] 张 珩, 刘洁生, 杨维东, 等. 双季铵盐对两种赤潮藻的去除研究[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(4):68-71.
- ZHANG Heng, LIU Jie-sheng, YANG Wei-dong, et al. Studies on bi-quaternary ammonium salt algacide for removing red tide[J]. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(4):68-71.
- [21] 中华人民共和国国家环境保护总局. 化学农药环境安全评价试验准则[S]. 2004.
- [22] 张丽彬, 王金鑫, 王启山, 等. 浮游动物在生物操纵法除藻中的作用研究[J]. 生态环境, 2007, 16(6):1648-1653.
- ZHANG Li-bin, WANG Ji-xin, WANG Qi-shan, et al. Effect of zooplankton on removing algae in bio-manipulation [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6):1648-1653.
- [23] 赵旭娜, 张高勇, 丁进亚, 等. 季铵盐类阳离子表面活性剂的生物效应[J]. 中国消毒学杂志, 2006, 23(1):68-70.
- ZHAO Xu-na, ZHANG Gao-yong, DING Jin-ya, et al. Biological activity of cationic surfactants quaternary ammonium salt[J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2006, 23(1):68-70.
- [24] 宋伟伟, 张 静, 杜 敏. 双季铵盐类缓蚀剂的研究进展[J]. 化工进展, 2011, 30(4):842-847.
- SONG Wei-wei, ZHANG Jing, DU Min. Research progress of bisquaternary ammonium compound inhibitors [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2011, 30(4):842-847.
- [25] 杨 威, 王 鹏, 胡万里, 等. 双烷基季铵盐的制备与杀菌性能研究[J]. 工业水处理, 2000, 20(6):13-16.
- YANG Wei, WANG Peng, HU Wan-li, et al. Preparation of double alkyl quaternary ammonium salts and studies of their bactericidal performance[J]. *Industrial Water Treatment*, 2000, 20(6):13-16.