

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20210923002

乔星晔, 赵文, 尹东鹏. 蒙古裸腹溞在海洋生态毒理学中的应用研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(3): 411-421

Qiao X Y, Zhao W, Yin D P. Research progress of application of *Moina mongolica* in marine ecotoxicology [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, 17(3): 411-421 (in Chinese)

蒙古裸腹溞在海洋生态毒理学中的应用研究进展

乔星晔, 赵文*, 尹东鹏

大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁省水生生物学重点实验室, 大连 116023

收稿日期: 2021-09-23 录用日期: 2021-12-16

摘要: 本文综述了蒙古裸腹溞(*Moina mongolica*)作为受试生物在海洋生态毒理学中的应用现状, 并对其未来研究方向进行了展望。蒙古裸腹溞是一种典型的盐水枝角类, 具有适应盐度范围广、繁殖快、易于在海水中高密度培养等特点, 常被作为河口及海洋生态毒理学研究的受试生物, 颇具研究前景。目前, 海洋中重金属、持久性有机污染物、常用药物、石油及石油类化合物和赤潮藻类等对蒙古裸腹溞生态毒理效应研究已积累了一些资料。今后应对蒙古裸腹溞不同生殖状态的毒性效应、跨代胚胎毒性、分子组学、种质保护和建立近岸海洋环境监测标准等方面进行深入研究, 旨在为该溞在海洋生物监测和环境保护方面发挥更大的作用提供科学依据。

关键词: 环境污染; 蒙古裸腹溞; 海洋生态毒理学; 赤潮藻类

文章编号: 1673-5897(2022)3-411-11 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Research Progress of Application of *Moina mongolica* in Marine Ecotoxicology

Qiao Xingye, Zhao Wen*, Yin Dongpeng

Key Laboratory of Hydrobiology in Liaoning Province, College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China

Received 23 September 2021 accepted 16 December 2021

Abstract: This review outlined the application status of *Moina mongolica* as a test organism in marine ecotoxicology, and prospected its future research directions. *M. mongolica* is a typical salt water Cladocera, which has the characteristics of wide salinity range adaption, rapid reproduction and easy culture in high density in seawater. In addition, *M. mongolica* is often used as a test organism for estuarine and marine ecotoxicological research. At present, some data have been accumulated on the ecotoxicological effects of heavy metals, persistent organic pollutants, commonly used drugs, petroleum and petroleum compounds and red tide algae in the sea on *M. mongolica*. In the future, we should conduct in-depth research on the toxic effects for different reproductive states of *M. mongolica*, cross generational embryo toxicity, molecular omics, germplasm protection, and the establishment of nearshore marine environmental monitoring standards, so as to provide scientific basis for the *M. mongolica* to play a greater role in marine biological monitoring and environmental protection.

基金项目: 国家第三批粮仓项目(2020YFD0900202); 广东省重点领域研发计划项目(2020B0202010009)

第一作者: 乔星晔(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为生态毒理学和水产养殖生态学, E-mail: 1072788284@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: zhaowen_1963@163.com

Keywords: environmental pollutants; *Moina mongolica*; marine ecotoxicology; red tide algae

蒙古裸腹蚤(*Moina mongolica* Daday, 1901)隶属于节肢动物门(Arthropoda), 甲壳亚门(Crustacea), 鳃足纲(Branchiopoda), 枝角类(Cladocera), 异足目(Anomopoda), 裸腹蚤科(Moinidae), 裸腹蚤属(*Moina*)。蒙古裸腹蚤自从在蒙古被发现后, 在阿尔及利亚、埃及、土耳其、伊朗和西班牙等陆续有报道和描述。我国何志辉教授首次于1982年在山西晋南盐池采到, 后在晋南硝池和北门滩、宁夏银川市郊池沼、新疆柴窝堡湖和艾比湖、内蒙古黄旗海和扎格斯台淖尔等处陆续采到^[1]。

蒙古裸腹蚤做为盐水中特有的裸腹蚤, 在枝角类生物学研究中有其独特地位。在2~50的盐度范围内, 蒙古裸腹蚤可以通过孤雌生殖完成其生命周期。由于其具有适应盐度范围广、繁殖快、易于高密度培养等特点^[2], 因而被驯化于海水中, 广泛应用于海水鱼类(真鲷(*Pagrus major*)、许氏平鲉(*Sebastes schlegelii*)、花鲈(*Lateola brax japonica*)^[3]、红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)^[4])、甲壳动物(凡纳对虾(*Penaeus vannamei*)^[5]和中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)幼体^[6])以及濒危风信子鹿角珊瑚(*Acropora hyacinthus*)选育或保护中^[7]。又因其具有生活史短、取材方便、室内易培养和便于操作等优势, 常被作为以河口及海洋生态毒理学的受试生物, 使其成为研究重金属^[8]、紫外线辐射(UV)^[9]、持久性有机污染物^[10]、赤潮藻及其麻痹性贝毒^[11]、农药和水产药物^[12]、石油及石油类化合物^[13-14]、微波和电场^[15]、超高压工程电缆^[16]、海洋酸化^[17]和有机溶剂^[18]的重要受试生物之一。在过去的几十年里, 国内外学者对蒙古裸腹蚤在环境污染物胁迫下的实验研究大幅增加, 同时在食物链的富集毒害作用以及生理生化方面展开了一系列的研究^[1,3-8]。

本文综述了蒙古裸腹蚤作为生态毒理学海水介质中的重要受试生物的研究进展, 并对其应用情况进行了总结和展望, 以期对蒙古裸腹蚤在生态毒理学研究中的进一步应用提供参考并拓宽思路。

1 蒙古裸腹蚤的形态特征及生活史 (Morphology and life history of *Moina mongolica*)

蒙古裸腹蚤雌蚤体长为1.00~1.40 mm, 为长卵圆形, 侧扁, 雌蚤成体为淡黄色, 且可见红色的生殖腺, 壳瓣背缘近平直, 腹缘突出, 壳表面无毛发, 具有不规则的多角形网纹和致密的棘状突起, 壳瓣后背

角平滑突起。第一胸肢倒数第2节上无前刺, 成体头宽圆, 复眼小, 位于头部腹缘顶端(图1)。雄体体长为0.88~0.89 mm。体狭长, 为白色或透明, 壳瓣近长方形, 背缘平直, 腹缘弧曲, 壳面无发毛, 头狭长, 复眼较大位于头部顶端^[1]。

王岩等^[19]首次将蒙古裸腹蚤分为5个时期, 后经赵文等^[20]进一步观察将其分为卵裂期、多细胞期“T”形胚胎期、触角原基形成期、胸肢原基形成期、2复眼期、单复眼形成期和离开母体期等8个时期。其发育时间通常随温度的升高而缩短, 同时蒙古裸腹蚤的生长是非连续性的, 生长和蜕皮交替进行, 每蜕皮一次的同时就会生长一次, 只有在新壳未硬化时才能生长, 且生长时间较短^[1]。蒙古裸腹蚤有孤雌生殖和两性生殖的世代交替, 当外界条件良好时, 蒙古裸腹蚤进行孤雌生殖, 所产的卵为夏卵又称非需精卵; 在环境条件恶化时, 则进行两性生殖, 形成冬卵或需精卵, 冬卵需经过受精才能发育^[21]。

蒙古裸腹蚤与海水枝角类相比更易于培养且产幼数量大, 与褶皱臂尾轮虫相比, 其具有易观察的两性生殖方式、传代效应明显、具有对毒物的敏感性、极强的实用性和培养的简易性, 这些独具的众多优势特征促使蒙古裸腹蚤在生态毒理学研究中颇具研究前景^[8,17]。



图1 蒙古裸腹蚤形态结构

Fig. 1 Morphology of *Moina mongolica*

2 环境污染对蒙古裸腹蚤的毒性影响 (Toxicity of environmental pollutants on *Moina mongolica*)

2.1 重金属对蒙古裸腹蚤的影响

重金属作为水环境中常见的污染物之一,具有在水体中难降解、持久性强和可随食物链传递等特点^[22]。水体重金属污染主要包括 Pb、Cd、Cr、Hg、Cu 和 Li 等重金属^[23],这些重金属不但会危害水生生物,而且能够通过食物链传递对生态系统和人类健康造成严重危害^[24]。因此,采用蒙古裸腹蚤对水体重金属的毒性研究具有重要意义。

重金属对蒙古裸腹蚤毒性研究中,安育新和何志辉^[25]率先研究了 Hg、Cu、Cd 和 Cr 4 种重金属对蒙古裸腹蚤的存活、生长、生殖及内禀增长率的单一急性毒性和联合毒性作用,单一急性毒性试验结果显示,4 种重金属对蒙古裸腹蚤的毒性顺序为 Hg>Cu>Cd>Cr,联合急性毒性试验结果显示,2 种重金属混合后,除 Hg/Cu 组合对蒙古裸腹蚤后期生长和生殖无显著影响外,其余各组混合后对其生长和生殖的毒性均大幅度加强,特别是 Cd/Cr 组合,这一方面说明 Hg 和 Cu 之间存在毒性拮抗作用,另一方面说明除 Hg/Cu 组合外,其余各组存在毒性协同作用,这与半致死浓度的 Cu 存在时能保护杜邦钩虾 (*Gammarus duebeni*) 免受 Hg 的毒害的结果类似^[26]。Hg/Cd/Cr 3 种金属组合对蒙古裸腹蚤的生长和生殖影响均不显著,说明这 3 种金属之间同样存在拮抗作用,而 4 种金属混合后对蚤的生长影响十分显著,这说明这 4 种金属之间存在毒性协同作用,这同时也说明重金属之间的联合作用机制复杂。这项研究详细探究了 4 种重金属的拮抗和协同作用,为后续的其他重金属、跨代毒性研究和重金属预测模型的构建奠定了坚实的基础,对于后续重金属研究具有里程碑意义。

此后,Wang 等^[8]采用含重金属的海水蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 对蒙古裸腹蚤开展了毒性随食物链传递和跨代毒性影响研究,结果显示,饵料中的重金属会影响蒙古裸腹蚤亲代(P 代)的生长、生存和种群增长,其急性毒性顺序为 Hg>Cd>Pb,其中的 Pb 对蒙古裸腹蚤 P 代的平均寿命和每窝产卵量有着显著影响,此外,对 F1 代的平均寿命以及 F2 代的繁殖时间同样影响显著,Pb 存在跨代毒性效应。

石婷婷^[27]采用 Li 对包括蒙古裸腹蚤在内的 3 种蚤开展了急性慢性毒性研究,生存和繁殖结果

显示,西藏拟蚤对 Li 耐受性机制最强,蒙古裸腹蚤次之,大型蚤耐受性最低,产生这种原因可能是蒙古裸腹蚤和西藏拟蚤原产地为盐湖,盐湖内含多种重金属离子尤其是 Li,因此在缓慢的 Li 驯化进程中形成了较强的抗 Li 机制,并在此研究中采用 Li 对 3 种蚤的碱性磷酸酶(AKP)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽转移酶(GST)、过氧化氢(H₂O₂)、丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)和总抗氧化能力(T-AOC)共 7 种指标开展了研究,研究显示 3 种蚤中只有 MDA 在 24 h 与 48 h 时随浓度升高均呈现先升高后降低的趋势,而 GST 趋势刚好与 MDA 相反,其余指标 3 种蚤之间均存在着差异,原因可能是由于蚤属 (*Daphnia*)、裸腹蚤属 (*Moina*) 和拟蚤属 (*Daphniopsis*) 的种类差异造成的。

王璐^[28]研究了河口盐度变化下,毒性预测模型如毒代-毒效动力学(toxicokinetic-toxicodynamic, TK-TD)模型和生物配体模型(the biotic ligand model, BLM)对重金属对蒙古裸腹蚤的毒性预测,结果表明,单一 Cu 急性毒性试验中,盐度 10~30 范围内蒙古裸腹蚤对 Cu 的吸收速率随盐度的升高而降低,TK-TD 模型很好地地区分并量化盐度对 Cu 的双重作用,并合理预测了盐度变化下 Cu 的急性毒性,慢性毒性试验中,低盐度下高浓度的 Cu 可显著降低蒙古裸腹蚤的存活率,而中高盐度下,高浓度的 Cu 对生存率的影响较少,这可能与盐度 15~30 时,蒙古裸腹蚤对 Cu 的吸收速率随盐度的升高而降低有关;另一方面,根据 BLM 模型的预测,升高盐度会持续降低重金属的积累,而相较于 TK-TD 模型,BLM 模型不能很好地预测盐度变化下 Ni、Cu、Zn、Ag、Cd 和 Pb 6 种重金属的吸收速率和毒性,这一原因可能与 BLM 模型构建时以淡水水化因子为参数有关,而河口区域海水和淡水交汇,盐度变化下的离子组成也更加复杂。

海水受试生物蒙古裸腹蚤和褶皱臂尾轮虫对 Hg 的敏感性无差异,西藏拟蚤对 Hg 耐受性最强,大型蚤和褶皱臂尾轮虫对 Cd 的敏感性大于蒙古裸腹蚤,对 Li 的耐受性西藏拟蚤最强,蒙古裸腹蚤次之,大型蚤最弱(表 1)^[25,27-33],这些原因可能由于西藏拟蚤和蒙古裸腹蚤生存的水环境中多种重金属的含量较高,经长期的自然界驯化后,其具有较高的耐受性;低盐度(5~15)下的蒙古裸腹蚤对 Cu 毒性耐受先升高后下降,盐度持续升高后蒙古裸腹蚤的毒性耐受能力加强^[25,28],这一方面说明盐度变化下重金

属的毒性变化机制复杂,另一方面也加深了在河口地区监测重金属变化的困难程度。

对于重金属对蒙古裸腹蚤的毒性研究而言,单一毒性、联合毒性、食物链传递以及跨代毒性效应等方面的研究均有报道,已经初步深入探究了多种重金属对蒙古裸腹蚤的单一和联合急慢性毒性。未来应进一步加强盐度变化对多种重金属的毒性影响,并进一步构建河口及海水重金属毒性预测模型和水

质标准。

2.2 持久性有机污染物对蒙古裸腹蚤的影响

持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs)是指长期存在于环境中,具有高生物蓄积性、高致癌和难降解等特性的有机污染物,能够在食物链中逐级放大,在危害环境的同时也对人类健康产生影响。持久性有机污染物邻苯二甲酸酯(PAEs)是一种常见的塑料增塑剂,由于具有增加柔韧性、降低

表 1 重金属对蒙古裸腹蚤的毒性影响

Table 1 The acute toxicity of heavy metals on *Moina mongolica*

物种 Species	重金属 Heavy metal	试验时间/h Test time/h	半数致死浓度	盐度 Salinity	参考文献 Reference
			(LC ₅₀)/(mg·L ⁻¹)		
			Median lethal concentration (LC ₅₀)/(mg·L ⁻¹)		
蒙古裸腹蚤 <i>Moina mongolica</i>	Hg	24	0.005	31.7	[25]
		48	0.003	31.7	
	Cu	24	0.103	31.7	
		48	0.089	31.7	
	Cd	24	6.520	31.7	
		48	3.890	31.7	
	Cr	24	6.620	31.7	[28]
		48	4.240	31.7	
	Cu	48	0.096	5	
		48	0.153	10	
	Li	48	0.061	15	
		24	40.660	30	
48	32.250	30			
大型蚤 <i>Daphnia magna</i>	Hg	48	0.005	0	[30]
	Cd	48	0.065	0	
	Cr	48	0.022	0	
	Li	24	17.25	0	[27]
		48	9.706	0	
蚤状蚤 <i>Daphnia pulex</i>	Hg	48	0.003	0	[30]
	Cd	48	0.145	0	
	Cr	48	0.048	0	
	Cu	72	0.070	0	
西藏拟蚤 <i>Daphniopsis tibetana</i>	Li	24	386.34	15	[31]
		48	325.42	15	
	Hg	24	0.468	16	[32]
		48	0.124	16	
	Cd	24	0.012	16	
		48	0.006	16	
褶皱臂尾轮虫 <i>Brachionus plicatilis</i>	Hg	24	0.005	30	[33]
	Cd	24	2.070	30	
	Pb	24	2.830	30	

聚合物黏度等特点,被广泛应用于建筑材料塑料制品和化学材料中^[34],邻苯二甲酸二丁酯(DBP)是PAEs中对水生生物产生毒性的主要物质,由于其化学性质不稳定,因而导致DBP很容易逸出塑料并转移到外界,从而对土壤、水域和大气等环境造成污染^[35-36],同时DBP具有内分泌干扰作用,可通过城市污水和工业废水等方式进入水域生态系统,对食物链中各营养级的生物产生危害。此外,另一种持久性有机污染物壬基酚聚氧乙烯醚(nonylphenol ethoxylates, NPEOs)是全球第二大商用非离子表面活性剂^[37],被广泛应用于食品、纺织、造纸、医药和化妆品等行业中^[38],其中具有内分泌干扰作用的壬基酚(NP)主要来源于NPEOs的降解^[37]。目前,以DBP和NP为代表的持久性有机污染物所引起的环境问题已经受到了国内外的广泛关注。

崔竞丹等^[10]研究了DBP对蒙古裸腹蚤的急性毒性和5个世代的跨代毒性效应,研究显示在急性毒性试验24 h和48 h内,试验组中蒙古裸腹蚤,随着DBP浓度升高,蚤死亡率逐渐增加,蒙古裸腹蚤死亡率与DBP浓度存在紧密的线性关系,而慢性毒性研究发现试验组P代的平均寿命、生殖量受到显著影响,对F1代和F2代影响不显著,但从F3代起,蒙古裸腹蚤的平均寿命、生殖量及种群增长受到显著抑制,此现象说明F3出现了跨代影响,跨代影响的出现可解释为生物在环境激素的干扰下产生了遗传变异,对大型蚤毒性研究中同样发现了相同结果^[39-40]。

低浓度污染物产生的有害影响可能没有及时出现,而是遗传给了后续世代,由于毒性的积累或生物耐受性的降低,使距离较远世代生物出现生长、发育和繁殖能力的降低,这种毒性效应的传递主要表现在生长生殖和平均寿命方面,产生此种差异的原因可能与枝角类的生物特性有关,大型蚤在低浓度的邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)影响下,F3代同样出现了此种跨代影响^[41]。

Shao等^[42]采用NP对蒙古裸腹蚤开展了慢性毒性及跨代效应研究,研究了NP对蒙古裸腹蚤3个世代的生殖及种群增长的影响,慢性试验结果显示,NP对蒙古裸腹蚤的亲代和子代的存活、生长和繁殖均有显著的抑制效应,在无毒的恢复世代中,F3仍受到毒性作用,且F1代存在毒性放大现象,相关学者研究恢复试验中铈对大型蚤存活率的影响时有类似的发现^[43],产生此现象的原因可能是由于NP对亲代产生了DNA损伤,遗传给子代,或由于在胚胎

发育期,亲代将卵暴露在孵育囊中而使其受到NP的影响,从而F1代表现出明显的毒性作用,因此出现毒性放大的作用^[43-44]。

迄今,2种具有代表性的持久性有机污染物DBP和NP的跨代毒性研究结果显示,2种持久性有机污染物会对亲代及子代的生长生殖和寿命产生严重影响。未来将进一步对DBP和NP对蒙古裸腹蚤的胚胎毒性以及毒性胁迫后的亲代和子代行为开展研究。此外,以蒙古裸腹蚤为受试生物,进行持久性有机污染物毒性研究时,应进行慢性毒性试验,并积极拓展持久性有机污染物的种类,探究亲代及其后代的蚤体毒性残留,并且由于部分持久性有机污染物具有内分泌干扰作用,探究蒙古裸腹蚤经污染物胁迫后是否存在生殖转换(雌雄形态结构转换)同样具有一定意义。

2.3 赤潮藻类对蒙古裸腹蚤的影响

自20世纪70年代起,全球赤潮问题不断加剧,赤潮是指海洋生态系统中一些微型藻、原生动物和细菌在水中过度繁殖所引起的水体变色现象^[45],海洋中的赤潮可通过多种途径对海洋生态系统和人类健康产生危害,例如产生毒素、危害海洋生物、破坏水体生态环境和影响水体理化性质等^[46]。目前以蒙古裸腹蚤为受试生物开展研究的主要有亚历山大藻(*Alexandrium* spp.)、凯伦藻(*Karenia* spp.)和赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*)等有害赤潮种类。

有毒赤潮藻类一直是生态毒理学研究的焦点,我国学者研究了有毒赤潮藻类塔玛亚历山大藻(*Alexandrium tamarense*)对蒙古裸腹蚤的毒性影响^[47],研究发现塔玛亚历山大藻经蒙古裸腹蚤摄食后,对其消化、行为和死亡率均产生很大影响,为了验证塔玛亚历山大藻是否产生了麻痹性贝类毒素(PSP),以及毒素随塔玛亚历山大藻至枝角类再到美国红鱼(*Sciaenops ocellatus*)的海洋食物链中动态传递与代谢的可能^[48],进一步开展了试验,结果显示,塔玛亚历山大藻为550~4 900 ind.·mL⁻¹时,蒙古裸腹蚤蚤体成功检测到PSP毒素,而含PSP毒素蒙古裸腹蚤被美国红鱼鱼苗摄食后既有毒素积累又有毒素转化的情况,这可能与美国红鱼消化蚤体时毒素化学成分转化有关。

有害亚历山大藻种类繁多,陈桃英等^[49]通过11株亚历山大藻对蒙古裸腹蚤进行96 h毒性试验,研究发现链状亚历山大藻(*Alexandrium catenella*)(AC-1)和亚历山大藻属(*Alexandrium* spp.)(AS-1)对蒙古裸

腹蚤具有极强的毒害作用,其中 AC-1 对 1~3 龄的蒙古裸腹蚤毒害效应最强,其次是塔玛亚历山大藻,余下亚历山大藻类对蒙古裸腹蚤的毒性较小,多株亚历山大藻能导致蒙古裸腹蚤 Na^+K^+ -ATP 酶活力先升高后下降,而且这 11 株亚历山大藻不能满足蒙古裸腹蚤的营养需求,导致其 RNA/DNA 比值和蛋白质含量降低。此外,该学者还以蒙古裸腹蚤为受试生物对其中的微小亚历山大藻膝沟藻毒素(gonyautoxin, GTX_{1,4} 和 GTX_{2,3})进行探究,建立了藻毒素液相色谱-质谱技术联用快速检测技术,该技术可应用于我国水产品贝类中海洋生物毒素的检测分析工作^[50]。

赤潮藻类中既有含毒藻类又有无毒藻类,钱军等^[51]为了探究无毒藻类与有毒藻类对蒙古裸腹蚤的毒性作用,采用了具有代表性的裸甲藻(*Gymnodinium aerucyinosum*)(赤潮藻类但无毒素)、塔玛亚历山大藻(赤潮藻类且有毒素)、绿色巴夫藻(*Pavlova viridis*)(非赤潮藻类且无毒素)开展了赤潮藻类对蒙古裸腹蚤的存活率和生殖率的影响研究,结果表明,对蒙古裸腹蚤的存活率和生殖率影响由大到小依次是裸甲藻>塔玛亚历山大藻>绿色巴夫藻,值得注意的是裸甲藻虽不产生毒素,但裸甲藻由于适口性差以及易于黏附蚤体等缺点^[52],造成了比含有毒素的塔玛亚历山大藻对蒙古裸腹蚤生存和生殖更大的影响。

米氏凯伦藻和赤潮异弯藻也是我国沿海海域形成有害赤潮的优势种之一,广泛分布于河口及沿岸水域,对许多养殖鱼类均有致死作用,同时也对我国水产养殖业造成了严重的经济损失^[53-54]。张勇等^[55]研究了米氏凯伦藻对蒙古裸腹蚤的毒性,研究发现米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)对蒙古裸腹蚤具有较强的毒性作用,可抑制蒙古裸腹蚤的摄食并导致死亡,原因是米氏凯伦藻是一种典型的鱼毒性赤潮藻,可产生溶血性毒素,多不饱和脂肪酸、活性氧和细胞毒素等次生代谢物^[56]。而另一种赤潮藻类赤潮异弯藻不仅对蒙古裸腹蚤的存活有显著影响,并使蚤体变小,产幼期变长、生殖率降低、平均存活时间变短、种群增长明显受抑制^[57],这可能与赤潮异弯藻产生的未知的毒素有关。

我国学者采用蒙古裸腹蚤作为受试生物,对多种赤潮藻类及其产生的毒素进行了相对全面的探究,为揭示有害赤潮藻类的毒性作用机制和监测检测机制进行了一系列的探索。目前,大多数的研究主要集中于单一赤潮藻类对水生生物的研究,在实际海洋生态环境中,赤潮的出现都是伴随着多种赤

潮藻类的爆发,单一赤潮藻类的藻毒素会随着蒙古裸腹蚤摄入,其化学成分变化,多种赤潮藻的毒素是否会发生相互作用,这样复杂的毒性作用机制又是怎样?因此,应进一步开展赤潮藻类及其所产毒素对蒙古裸腹蚤联合毒性效应研究。

2.4 常用药物对蒙古裸腹蚤的影响

随着人类生活水平的提高,农业生产过程中产生了大量的有害化学物质通过生态循环等方式进入水环境,同时对水环境造成严重的污染^[58]。现今被用于农业生产中的大部分农药都属于有机农药,其中主要包括有机磷农药、有机氯农药和氨基甲酸酯类农药^[59]。

敌百虫是一种有机磷酯类化合物,由于其具有高效、低毒及低残留的特点,是鱼类产业上较为重要的杀虫剂。虽然敌百虫的毒性低,但由于人类广泛应用甚至到滥用的地步,致使敌百虫的负面效应越来越明显^[60]。久效磷是一种有机磷杀虫剂,广泛应用于水稻、玉米、甘蔗、棉花、大豆、花生和蔬菜等农作物中,因其易溶于水,在土壤中吸附量减少,导致其流入地下水中,并对生态环境构成严重污染^[61]。

谢钦铭和李向阳^[62]研究发现敌百虫对蒙古裸腹蚤的毒性高于久效磷。同时按照农药对水蚤的安全性评价等级划分标准^[63],敌百虫对蒙古裸腹蚤的实验室毒性属于高毒等级,久效磷对蒙古裸腹蚤的实验室毒性属于低毒等级,相关学者以多刺裸腹蚤为试验生物研究了敌百虫和久效磷对枝角类的毒性效应,同样证实了久效磷具有较强的毒性效应^[60]。

此外,王广军等^[64]研究了孔雀石绿、硫酸铜、甲醛和高锰酸钾 4 种常见药物对蒙古裸腹蚤的毒性效应,研究发现蒙古裸腹蚤对这 4 种药物的敏感性为硫酸铜>孔雀绿>高锰酸钾>甲醛。

目前,国内外学者对常用药物对水蚤的安全性评价等级和毒性等级的划分只能比较毒物与生物之间的相对毒性,但难以反映毒物进入水环境后对水生生物的实际危害程度,即实际毒性结果与理论毒性结果有待进一步核准。

2.5 石油类化合物及钻井液对蒙古裸腹蚤的影响

随着石油行业的不断发展,越来越多的石油污染物通过海洋运输等方式对海洋中的生物造成了严重的影响,其中石油类化合物已成为危害水域环境的最为严重的污染物之一^[65],对其开展研究具有重要意义。

路鸿燕和何志辉^[14]针对我国大庆油田的原油及

其成品油对蒙古裸腹蚤的毒性进行研究,研究发现随着油类质量浓度的升高,蒙古裸腹蚤的产前发育期延长,每胎平均产幼量降低,产幼间隔延长,且产出幼体一般不能正常生长。王珊等^[13,66]为探究石油烃污染,研究了0#柴油对蒙古裸腹蚤的生长、繁殖及发育的影响,研究表明,蒙古裸腹蚤的存活率、首次产幼时间和幼数量均随0#柴油浓度的升高而降低,同时还研究了润滑油对蒙古裸腹蚤的毒性效应,润滑油对蒙古裸腹蚤的毒性较弱。

随着海洋石油的开发,越来越多的钻井液等废弃物被排到海中,对海洋生态系统造成影响。尹翠玲等^[67]为探究钻井液生物毒性检验标准《海洋石油勘探开发污染物生物毒性》(GB/T 18420.2—2009)中的4种指示生物的耐受性差异和实际监测时受试生物选择开展了研究,结果显示,泥浆钻井液对蒙古裸腹蚤、卤虫(*Artemia* sp.)和裸项栉虎鱼(*Ctenogobius gymnauchen*)的 LC_{50} 无显著差异,蒙古裸腹蚤完全可以胜任泥浆钻井液的毒性监测。

目前,对蒙古裸腹蚤而言不同种类的石油烃及钻井液的毒性大小为:钻井液(泥浆)>航空煤油>蒸发汽油>润滑油>直馏柴油>大庆原油,毒性的差异与石油烃的种类有关^[13,67]。随着我国近远海养殖、海上工程建设和海洋石油开发,作为石油类化合物及钻井液的监测重要受试生物蒙古裸腹蚤未来的应用前景广阔。

3 总结与展望(Conclusions and perspectives)

目前,以蒙古裸腹蚤作为受试生物,环境胁迫中除重金属、持久性有机污染物、赤潮藻类、农药以及石油和石油类化合物等方面的研究外,相关学者还在紫外线(UV-B)辐射^[9]、微波和电场^[15]和城市污水处理^[68]等方面进行了研究。这些研究表明,蒙古裸腹蚤生态毒理学研究获得较大发展,并取得了一些重要成果,蒙古裸腹蚤已经成为海洋环境监测体系中毒物及其代谢产物风险评估的有用工具^[4,7]。

无论是河口及海洋监测中的单一还是联合的急性毒性试验、跨代毒性效应、食物链传递和多种生态毒理学受试生物比较,蒙古裸腹蚤都能出色胜任,这预示着蒙古裸腹蚤在未来河口及海洋环境监测中有广阔的应用前景,随着我国海上工程建设、愈发重视的近岸海域环境监测和日本可能排放的核废水污染,这些都将是未来蒙古裸腹蚤应用的落脚点和基石。

蒙古裸腹蚤可以作为海洋生态毒性和毒理学研

究的模式生物,在已有的蒙古裸腹蚤生态毒理学研究和应用基础上,未来还需要做如下几方面的工作。

3.1 全力保护我国蒙古裸腹蚤种质资源

目前,我国开展生态毒理学研究的蒙古裸腹蚤均是山西晋南品系,近期本实验室的研究发现长期驯化型(山西晋南品系)和野生型(乌兹别克斯坦品系)在基因层面有着显著差异(数据未发表),因此以驯化多年的蒙古裸腹蚤作为受试生物结果可能会有一定误差,而迄今,山西晋南盐池周围化工厂林立,随之而来的生活污染以及工业污染已经使盐池生境产生剧烈变化,本团队多次深入晋南采集蒙古裸腹蚤野生型无功而返,所以进一步保护我国优质的水产饵料和海洋监测生物蒙古裸腹蚤已迫在眉睫,加强盐湖区域监管和环境污染控制也势在必行。

3.2 蒙古裸腹蚤不同生殖状态的毒性效应及其跨代胚胎毒性研究

目前,试验所用蒙古裸腹蚤均为孤雌生殖雌蚤(即非混交雌体),并未将雄蚤或混交雌蚤作为受试生物,以不同生殖状态的蒙古裸腹蚤作为受试生物,有利于进一步揭示污染物对蚤体生殖的影响。此外,还需从表观观察和分子手段对蒙古裸腹蚤生殖毒性机制进行研究。蒙古裸腹蚤的胚胎发育过程虽已探明,但目前环境污染物对蒙古裸腹蚤的毒性研究中未见胚胎方面研究,污染物对蒙古裸腹蚤亲代和子代的跨代胚胎毒性大小尚不明晰,因此,进一步开展这方面研究具有重要意义。

3.3 拓展蒙古裸腹蚤分子组学研究

环境污染物对蒙古裸腹蚤的生态毒理学研究已日趋深入,但关于环境污染物对蒙古裸腹蚤的毒性作用机理还不明确,而通过基因表达的分析能够更深入地掌握毒性效应的分子机制,因此,应充分利用生物化学和分子生物学等技术手段,对蒙古裸腹蚤毒理动力学即吸收、消化、体内存储、隔离和排出与生态毒理基因组学、蛋白质组学、代谢组学和表观基因组学^[69]进行研究。

3.4 建立河口及海洋环境监测标准

大型蚤作为国内外以淡水为介质的生态毒理学模式生物,而褶皱臂尾轮虫已成为国际公认的以海水为介质的重要生态毒理学受试生物^[35,70],同时大型蚤和褶皱臂尾轮虫均已确立毒性试验标准^[70-71],而蒙古裸腹蚤的毒性监测标准较少,仅有《海洋石油勘探开发污染物生物毒性》(GB/T 18420.2—2009),该标准污染物主要为海洋石油勘探开发作

中使用或生成并排入海洋中的钻井液、基液、钻屑和生产水,近岸海域尤其其中河口地区污染物随盐度变化更加复杂,因此监测相对困难,所以有必要对近岸海域尤其是河口地区进行多污染物对蒙古裸腹蚤的影响研究,在拓展研究广度和深度后进一步构建河口及海洋环境监测标准,支持我国海洋环境监测体系构建。

综上所述,由于蒙古裸腹蚤已驯化适应海水环境,易于培养,世代周期短,对有机毒物敏感,可以作为海水生态毒理学研究的模式生物,因此进一步拓展蒙古裸腹蚤在毒理学研究中的广度和深度具有重要意义。

通讯作者简介:赵文(1963—),男,博士,教授,主要研究方向为水域生态学和生态毒理学。

参考文献(References):

- [1] 赵文,何志辉,殷守仁. 盐枝角类的生物学及海水培养利用[M]. 北京: 科学出版社, 2008 :19, 28-30
- [2] He Z H, Qin J G, Wang Y, et al. Biology of *Moina mongolica* (Moinidae, Cladocera) and perspective as live food for marine fish larvae: Review [J]. *Hydrobiologia*, 2001, 457(1): 25-37
- [3] 何志辉,姜宏,姜志强,等. 蒙古裸腹蚤作为海水鱼苗活饵料的试验[J]. 大连水产学院学报, 1997(4): 1-7
He Z H, Jiang H, Jiang Z Q, et al. Use *Moina mongolica* as live food for marine fish larvae [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 1997(4): 1-7 (in Chinese)
- [4] 桂远明,祝国芹,何志辉. 蒙古裸腹蚤的培养及在红鳍东方鲀育苗中的应用[J]. 水产科学, 2001, 20(5): 22-24
Gui Y M, Zhu G Q, He Z H. Mass productive culture of *Moina mongolica* and its use as live food for the fish larva of *Fuga rubripes* [J]. *Fisheries Science*, 2001, 20(5): 22-24 (in Chinese)
- [5] 王家伟,戴习林,谢剑,等. 不同饵料搭配对凡纳滨对虾幼体与仔虾的影响[J]. 湖南农业科学, 2011(15): 157-161
Wang J W, Dai X L, Xie J, et al. Effects of different diet combinations on larval and post-larval of *Litopenaeus vannamei* [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2011 (15): 157-161 (in Chinese)
- [6] 金春华,沈竑. 不同食物条件下蒙古裸腹蚤脂类和脂肪酸组成及对河蟹幼体脂肪酸组成的影响[J]. 宁波大学学报: 理工版, 2005, 18(1): 44-48
Jin C H, Shen H. Effect of *Moina mongolica* with different lipid source diets on the fatty acid composition of *Eriocheir sinensis* larvae [J]. *Journal of Ningbo University: Natural Science & Engineering Edition*, 2005, 18(1): 44-48 (in Chinese)
- [7] 朱潜. 风信子鹿角珊瑚胚胎发育与石珊瑚水族饲养的研究[D]. 海口: 海南大学, 2015: 12-15
Zhu Q. Embryonic development of *Acropora hyacinthus* and corals were cultivated under indoor condition [D]. Haikou: Hainan University, 2015: 12-15 (in Chinese)
- [8] Wang M R, Zhao W, Jia X Y, et al. Eco-toxicology effect on *Moina mongolica* Daday exposed to Cd²⁺, Pb²⁺, and Hg²⁺ by the food chain [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25 (16): 16024-16036
- [9] 徐立蒲,赵文,徐宪仲,等. 紫外线辐照对蒙古裸腹蚤生长、发育和生殖的影响[J]. 农业生物技术学报, 2007, 15(5): 789-792
Xu L P, Zhao W, Xu X Z, et al. Effect of ultraviolet radiation on growth, development and reproduction of *Moina mongolica* Daday [J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2007, 15(5): 789-792 (in Chinese)
- [10] 崔竞丹,魏杰,赵文. 邻苯二甲酸二丁酯(DBP)对蒙古裸腹蚤的毒性及其跨代影响[J]. 环境科学学报, 2020, 40(9): 3473-3480
Cui J D, Wei J, Zhao W. Study on toxicity effect and transgenerational impact of dibutyl phthalate (DBP) to *Moina mongolica* Daday, 1901 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(9): 3473-3480 (in Chinese)
- [11] 江天久,雷芳,徐轶肖. 枝角类为媒介的麻痹性贝类毒素传递与代谢研究[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(2): 121-124
Jiang T J, Lei F, Xu Y X. Study on transfer and metabolism of paralytic shellfish poison in cladoceran *Moina mongolica* [J]. *Marine Environmental Science*, 2009, 28 (2): 121-124 (in Chinese)
- [12] 杜丽君,马丹丹,井维鑫,等. 敌百虫对多刺裸腹蚤生长和繁殖能力的影响[J]. 水生生物学报, 2014, 38(4): 786-790
Du L J, Ma D D, Jing W X, et al. Effects of trichlorfon on growth and reproduction of the freshwater cladoceran *Moina macrocopa* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, 38(4): 786-790 (in Chinese)
- [13] 王珊,郭凯,郑凯静,等. 润滑油对蒙古裸腹蚤的急性慢性毒性效应[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(4): 545-550
Wang S, Guo K, Zheng K J, et al. Acute and chronic toxicity of lubricating oil to water fleas *Moina mongolica* [J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(4): 545-550 (in Chinese)
- [14] 路鸿燕,何志辉. 大庆原油及成品油对蒙古裸腹蚤的

- 毒性[J]. 大连水产学院学报, 2000, 15(3): 169-174
- Lu H Y, He Z H. Toxicity of crude oil and refined oils from Daqing to *Moina mongolica* Daday [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2000, 15(3): 169-174 (in Chinese)
- [15] 赵文, 徐宪仲, 金栋, 等. 微波和电场对蒙古裸腹蚤存活、生长和生殖的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2087-2091
- Zhao W, Xu X Z, Jin D, et al. Effects of microwave irradiation and electrostatic field on the survival, growth and reproduction of *Moina mongolica* Daday [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9): 2087-2091 (in Chinese)
- [16] 韦桂秋, 蔡伟叙, 郑琰晶, 等. 超高压工程电缆绝缘油对海洋生物的生态毒性效应[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(6): 253-263
- Wei G Q, Cai W X, Zheng Y J, et al. Toxicity of insulating oil to marine organisms [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2015, 10(6): 253-263 (in Chinese)
- [17] Wang Z S, Wang Y S, Yan C Z. Simulating ocean acidification and CO₂ leakages from carbon capture and storage to assess the effects of pH reduction on cladoceran *Moina mongolica* Daday and its progeny [J]. Chemosphere, 2016, 155: 621-629
- [18] 魏海峰, 刘长发, 刘恒明. 4种有机溶剂对蒙古裸腹蚤急性性和慢性毒性研究[J]. 现代生物医学进展, 2007, 7(10): 1481-1483, 1493
- Wei H F, Liu C F, Liu H M. Studies on the toxicity of 4 organic solvents to the *Moina mongolica* [J]. Progress in Modern Biomedicine, 2007, 7(10): 1481-1483, 1493 (in Chinese)
- [19] 王岩, 何志辉, 蔡云. 温度和盐度对蒙古裸腹蚤发育的影响[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(1): 8-14
- Wang Y, He Z H, Cai Y. Effects of temperature and salinity on development of *Moina mongolica* Daday (Cladocera: Moinidae) [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2000, 31(1): 8-14 (in Chinese)
- [20] 赵文, 张焕, 徐宪仲, 等. 蒙古裸腹蚤胚胎发育及两种裸腹蚤滋养盘的形态观察[J]. 大连水产学院学报, 2006, 21(3): 196-202
- Zhao W, Zhang H, Xu X Z, et al. The embryonic development of parthenogenetic *Moina mongolica* Daday and morphology of the nutritive organs in two species *Moina* [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2006, 21(3): 196-202 (in Chinese)
- [21] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志 节肢动物门 甲壳纲 淡水枝角类[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 23-25
- [22] 傅海霞, 刘怡, 董志英, 等. 抗生素与重金属复合污染
- 的生态毒理效应研究进展[J]. 环境工程, 2016, 34(4): 60-63, 104
- Fu H X, Liu Y, Dong Z Y, et al. Progress in research on ecological toxicity of combined pollution of antibiotics and heavy metals [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(4): 60-63, 104 (in Chinese)
- [23] 杨瑞香. 水体重金属污染来源及治理技术研究进展[J]. 资源节约与环保, 2016(4): 66
- [24] 李大命, 杨家新. Cd²⁺对萼花臂尾轮虫的毒性研究[J]. 水利渔业, 2008, 29(2): 105-107
- [25] 安育新, 何志辉. 海水中四种重金属对蒙古裸腹蚤的毒性[J]. 水产学报, 1991, 15(4): 273-282
- An Y X, He Z H. Toxicity of four heavy metals in marine water to *Moina mongolica* [J]. Journal of Fisheries of China, 1991, 15(4): 273-282 (in Chinese)
- [26] Moulder S M. Combined effect of the chlorides of mercury and copper in sea water on the euryhaline amphipod *Gammarus duebeni* [J]. Marine Biology, 1980, 59(4): 193-200
- [27] 石婷婷. Li⁺对西藏拟蚤、大型蚤、蒙古裸腹蚤的毒性及其抗氧化效应影响的研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2017: 10-18, 23-27
- Shi T T. Effect of Li⁺ pseudo toxicity and antioxidant *Daphnia magna* and *Moina mongolica* and *Daphniopsis tibetana* [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2017: 10-18, 23-27 (in Chinese)
- [28] 王璐. 运用毒代-毒效动力学模型研究盐度对蒙古裸腹蚤重金属生物积累和毒性的影响[D]. 厦门: 厦门大学, 2019: 17-21
- Wang L. Effects of salinity on metal bioaccumulation and toxicity in *Moina mongolica* simulated using the toxicokinetic-toxicodynamic model [D]. Xiamen: Xiamen University, 2019: 17-21 (in Chinese)
- [29] Biesinger K E, Christensen G M. Effects of various metals on survival, growth, reproduction, and metabolism of *Daphnia magna* [J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1972, 29(12): 1691-1700
- [30] Canton J H, Adema D M M. Reproducibility of short-term and reproduction toxicity experiments with *Daphnia magna* and comparison of the sensitivity of *Daphnia magna* with *Daphnia pulex* and *Daphnia cucullata* in short-term experiments [J]. Hydrobiologia, 1978, 59(2): 135-140
- [31] Zhao W, Huo Y Z, Zhang T M, et al. Effects of lithium on the survival, growth, and reproduction of *Daphniopsis tibetana* Sars (Crustacea: Cladocera) [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2017, 35(4): 754-762
- [32] 郭君秀, 唐珏, 赵文, 等. 重金属 Hg²⁺、Cd²⁺对西藏拟蚤的急性毒性研究[J]. 生物学杂志, 2012, 29(3): 14-16

- Guo J X, Tang J, Zhao W, et al. Study on the acute toxic effects of Hg^{2+} and Cd^{2+} on *Daphniopsis tibetana* Sars [J]. Journal of Biology, 2012, 29(3): 14-16 (in Chinese)
- [33] 刘群, 辛荣. 3种金属离子对褶皱臂尾轮虫的急性毒性试验[J]. 养殖与饲料, 2017(5): 14-15
- [34] Net S, Sempéré R, Delmont A, et al. Occurrence, fate, behavior and ecotoxicological state of phthalates in different environmental matrices [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(7): 4019-4035
- [35] Zhang Z M, Zhang H H, Zou Y W, et al. Distribution and ecotoxicological state of phthalate esters in the sea-surface microlayer, seawater and sediment of the Bohai Sea and the Yellow Sea [J]. Environmental Pollution, 2018, 240: 235-247
- [36] Lin L, Dong L, Meng X Y, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters in water and surface sediment from the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Environmental Sciences (China), 2018, 69: 271-280
- [37] Peng X Z, Yu Y Y, Tang C M, et al. Occurrence of steroid estrogens, endocrine-disrupting phenols, and acid pharmaceutical residues in urban riverine water of the Pearl River Delta, South China [J]. The Science of the Total Environment, 2008, 397(1-3): 158-166
- [38] 吴伟, 吴滢, 瞿建宏. 壬基酚聚氧乙烯醚降解前后的激素效应和诱变活性[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5): 470-474
- Wu W, Wu Y, Qu J H. Estrogenic activities and mutation effects of nonylphenol ethoxylates before and after biodegradation [J]. China Environmental Science, 2003, 23(5): 470-474 (in Chinese)
- [39] Vandegehuchte M B, Lemièrre F, Vanhaecke L, et al. Direct and transgenerational impact on *Daphnia magna* of chemicals with a known effect on DNA methylation [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Toxicology & Pharmacology, 2010, 151(3): 278-285
- [40] Baker T R, Peterson R E, Heideman W. Using zebrafish as a model system for studying the transgenerational effects of dioxin [J]. Toxicological Sciences, 2014, 138(2): 403-411
- [41] 魏杰, 申晨晨, 赵文, 等. 邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)对大型溞的生殖毒性及跨代效应[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(1): 1-6
- Wei J, Shen C C, Zhao W, et al. Reproductive toxicity and transgenerational effects of di(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP) on water fleas *Daphnia magna* [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2019, 34(1): 1-6 (in Chinese)
- [42] Shao Y D, Zhao W, Wei J, et al. Growth and reproduction effects and transgenerational effects of nonylphenol in *Moina mongolica* Daday (Crustacea: Cladocera) [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(23): 29221-29230
- [43] Abe T, Saito H, Niikura Y, et al. Embryonic development assay with *Daphnia magna*: Application to toxicity of chlorophenols [J]. Water Science and Technology, 2000, 42(7-8): 297-304
- [44] Michiyori K, Toru N, Yuko T. Hypoxic induction of hemoglobin synthesis in *Daphnia magna* [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 1990, 97(4): 513-517
- [45] 周名江, 朱明远. “我国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治”研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(7): 673-679, 764
- Zhou M J, Zhu M Y. Progress of the project “Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms in China” [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(7): 673-679, 764 (in Chinese)
- [46] 于仁成, 吕颂辉, 齐雨藻, 等. 中国近海有害藻华研究现状与展望[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(4): 768-788
- Yu R C, Lv S H, Qi Y Z, et al. Progress and perspectives of harmful algal bloom studies in China [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(4): 768-788 (in Chinese)
- [47] 江天久, 徐轶肖. 蒙古裸腹溞对有毒赤潮生物塔玛亚历山大藻的摄食研究[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(1): 14-16
- Jiang T J, Xu Y X. Study on the grazing of *Moina mongolica* (Cladocera) on the toxic dinoflagellate, *Alexandrium tamarense* [J]. Marine Environmental Science, 2006, 25(1): 14-16 (in Chinese)
- [48] 徐轶肖, 江天久. 塔玛亚历山大藻经蒙古裸腹溞至美国红鱼鱼苗的麻痹性贝类毒素传递与代谢研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(8): 1331-1336
- Xu Y X, Jiang T J. Transfer and metabolism of paralytic shellfish poisoning from *Alexandrium tamarense* to *Moina mongolica* and to *Sciaenops ocellatus* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(8): 1331-1336 (in Chinese)
- [49] 陈桃英, 颜天, 周名江. 有害亚历山大藻对蒙古裸腹溞的毒性效应[J]. 毒理学杂志, 2005, 19(S1): 313
- [50] 陈桃英, 柳俊秀, 李水军, 等. 膝沟藻毒素液质联用快速检测及其在海洋生物体内的累积[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(1): 88-93
- Chen T Y, Liu J X, Li S J, et al. Gonyautoxin: HPLC-MS detection and accumulation in marine organisms [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40(1): 88-93 (in Chinese)
- [51] 钱军, 李洪武, 杨子兰, 等. 不同藻类对蒙古裸腹溞存

- 活和生殖的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7): 477-480
- [52] Liu S, Wang W X. Feeding and reproductive responses of marine copepods in South China Sea to toxic and nontoxic phytoplankton [J]. Marine Biology, 2002, 140(3): 595-603
- [53] Kempton J, Keppler C J, Lewitus A, et al. A novel *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae) bloom extending from a South Carolina Bay to offshore waters [J]. Harmful Algae, 2008, 7(2): 235-240
- [54] Liu J Q, Lewitus A J, Brown P, et al. Growth-promoting effects of a bacterium on raphidophytes and other phytoplankton [J]. Harmful Algae, 2008, 7(1): 1-10
- [55] 张勇, 杨维东, 李宏业, 等. 米氏凯伦藻对蒙古裸腹蚤的毒性及致毒途径分析[J]. 生态毒理学报, 2011, 6(1): 94-98
- Zhang Y, Yang W D, Li H Y, et al. Toxicity analysis of *Karenia mikimotoi* to *Moina mongolica* [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2011, 6(1): 94-98 (in Chinese)
- [56] 张勇, 杨维东, 刘洁生. 鱼毒性赤潮藻类的次生代谢物[J]. 植物生理学通讯, 2008, 44(6): 1197-1201
- Zhang Y, Yang W D, Liu J S. Secondary metabolin of ichthyotoxic red tide algae [J]. Plant Physiology Communications, 2008, 44(6): 1197-1201 (in Chinese)
- [57] 陈桃英, 聂思宇, 杨欣, 等. 赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*)对蒙古裸腹蚤(*Moina mongolica*)和日本新糠虾(*Neomysis japonica*)的毒性影响[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(2): 186-191
- Chen T Y, Nie S Y, Yang X, et al. The toxic effect of *Heterosigma akashiwo* on *Moina mongolica* and *Neomysis japonica* [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(2): 186-191 (in Chinese)
- [58] Giesy J P, Solomon K R, Coats J R, et al. Chlorpyrifos: Ecological risk assessment in North American aquatic environments [J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 1999, 160: 1-129
- [59] Karami-Mohajeri S, Abdollahi M. Toxic influence of organophosphate, carbamate, and organochlorine pesticides on cellular metabolism of lipids, proteins, and carbohydrates: A systematic review [J]. Human & Experimental Toxicology, 2011, 30(9): 1119-1140
- [60] 柳毅. 敌百虫对枝角类的急性毒性研究[J]. 黑龙江环境通报, 2012, 36(3): 49-51
- Liu Y. Maifan stone loading titanium dioxide photocatalytic [J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2012, 36(3): 49-51 (in Chinese)
- [61] Singh S, Kumar V, Kanwar R, et al. Toxicity and detoxification of monocrotophos from ecosystem using different approaches: A review [J]. Chemosphere, 2021, 275: 130051
- [62] 谢钦铭, 李向阳. 敌百虫和久效磷农药对蒙古裸腹蚤的急性毒性研究[J]. 水产科学, 2007, 26(3): 164-166
- Xie Q M, Li X Y. Acute toxicities of two organophosphorous pesticides to water fleas *Moina mongolica* [J]. Fisheries Science, 2007, 26(3): 164-166 (in Chinese)
- [63] 蔡道基, 汪竞立, 杨佩芝, 等. 化学农药对生态环境安全评价研究—IX. 农药对鱼类的毒性与评价的初步研究[J]. 农村生态环境, 1987(2): 7-11
- [64] 王广军, 黄建华, 任保振. 四种常用药物对蒙古裸腹蚤的毒性研究[J]. 海洋湖沼通报, 2002(1): 75-78
- Wang G J, Huang J H, Ren B Z. Studies on the toxicity of four drugs to the *Moina mongolica* [J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 2002(1): 75-78 (in Chinese)
- [65] 韦兴平. 国家海洋局发布《2000 年中国海洋环境质量公报》[J]. 海洋环境科学, 2001, 20(2): 75
- [66] 王珊, 郑凯静, 郭凯, 等. 0#柴油对蒙古裸腹蚤的毒性研究[J]. 大连海洋大学学报, 2015, 30(5): 494-497
- Wang S, Zheng K J, Guo K, et al. Toxicity of 0# diesel oil to water fleas *Moina mongolica* [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2015, 30(5): 494-497 (in Chinese)
- [67] 尹翠玲, 张秋丰, 赵文, 等. 钻井液对四种水生生物的急性毒性研究[J]. 水产科学, 2015, 34(1): 53-57
- Yin C L, Zhang Q F, Zhao W, et al. Acute toxicity of drilling fluids to four species of aquatic organisms [J]. Fisheries Science, 2015, 34(1): 53-57 (in Chinese)
- [68] 吕向立, 吴鹏, 朱艾嘉, 等. 城市污水厂污泥倾倒对海洋生物的毒性研究[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(3): 636-643
- Lv X L, Wu P, Zhu A J, et al. Toxicity of municipal sewage sludge to marine organisms [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, 12(3): 636-643 (in Chinese)
- [69] Kim H J, Koedrich P, Seo Y R. Ecotoxicogenomic approaches for understanding molecular mechanisms of environmental chemical toxicity using aquatic invertebrate, *Daphnia* model organism [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16(6): 12261-12287
- [70] 沙婧婧, 戴媛媛, 潘玉龙, 等. 轮虫在生态毒理学中的研究进展[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(3): 56-70
- Sha J J, Dai Y Y, Pan Y L, et al. Research progress in using rotifers in ecotoxicological studies [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(3): 56-70 (in Chinese)
- [71] 中华人民共和国国家环境保护总局. 水质 物质对蚤类(大型蚤)急性毒性测定方法: GB/T 13266—1991[S]. 北京: 中华人民共和国国家环境保护总局, 1991 ◆