

淡水螯虾生理生态学与环境毒理学研究进展

鲁耀鹏^{1,2}, 王冬梅¹, 张秀霞¹, 李军涛¹, 郑佩华^{1,2}, 冼健安^{1*}

¹中国热带农业科学院热带生物技术研究所, 海南 海口 571101; ²华南师范大学生命科学学院, 广东省水产健康安全养殖重点实验室, 广东 广州 510631

摘要: 综述了我国 2 种主养的淡水螯虾(克氏原螯虾和红螯螯虾)在生理生态学与环境毒理学方面的研究进展。总结了淡水螯虾的环境条件(盐度、温度和 pH)适应范围、毒性污染物(氨氮、亚硝酸盐、重金属和农药等)的半致死浓度和安全浓度, 以及环境胁迫和毒性污染物暴露对淡水螯虾生长、组织结构、生理代谢和免疫功能等的影响, 为淡水螯虾养殖的水环境监测与调控提供参考依据。

关键词: 淡水螯虾; 环境胁迫; 环境污染物

Research progress in physiological ecology and environmental toxicology of freshwater crayfish

LU Yaopeng^{1,2}, WANG Dongmei¹, ZHANG Xiuxia¹, LI Juntao¹, ZHENG Peihua^{1,2}, XIAN Jian'an^{1*}

¹Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; ²Guangdong Provincial Key Laboratory for Healthy and Safe Aquaculture, College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631, China

Abstract: Research progress in physiological ecology and environmental toxicology of two cultured freshwater crayfish (*Procambarus clarkii* and *Cherax quadricarinatus*) was reviewed. The suitable range of environmental conditions (salinity, temperature and pH) and the medial lethal concentrations (LC₅₀) and safety concentrations of toxic contaminants (ammonia, nitrite, heavy metals and pesticides) for freshwater crayfish, and the effects of environmental stress and contaminant exposure on growth, organization structure, physiological metabolism and immunity were summarized. It provides reference for water environment monitoring and regulation of culture of freshwater crayfish.

Key words: freshwater crayfish; environmental stress; environmental contaminant

淡水螯虾是指十足目螯虾下目中的淡水种类, 是我国重要的人工养殖水产品类别之一, 以克氏原螯虾 *Procambarus clarkii* Girard 为主, 另外还有红螯螯虾 *Cherax quadricarinatus* von Martens。由于克氏原螯虾的消费市场日益火爆, 需求量巨大, 其人工养殖面积得到了迅猛发展。近年来, 由于对虾养成率低下、罗非鱼利润低等原因, 一部分养殖户为寻求新的商机而转养淡水螯虾。由于工业、农业以及科学技术的快速发展, 许多化学有害物质污染淡水资源, 并且呈现污染加剧的趋势, 淡水资源的污染已成为威胁淡水养殖螯虾生存和生长的重要因素;

且有毒物质进入螯虾体内富集积累, 继而危害人类的健康。本文就近 20 年来对淡水螯虾的生理生态学及环境毒理学方面的研究文献进行综述, 以期对淡水螯虾的健康养殖提供参考。

1 盐度

在我国内陆和沿海地区有大量的盐碱地, 而大部分的盐碱地还未开发利用。由于近年来淡水螯虾养殖业日益火爆, 利用未开发的盐碱地来养殖淡水螯虾也逐渐兴起, 但盐碱地中盐度较高所带来的影响是首要问题。

收稿日期 (Received): 2017-06-22 接受日期 (Accepted): 2017-09-29

基金项目: 海南省重点研发计划项目 (ZDYF2016084); 中国热带农业科学院基本科研业务费专项资金 (1630052016011、1630052016021)

作者简介: 鲁耀鹏, 男, 硕士研究生。研究方向: 水产健康养殖

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: xian-ja@163.com

研究显示,体重为(15.15±2.12) g 的克氏原螯虾的盐度安全值为 6.00 g · L⁻¹ (李洪涛等,2006),体重为(1.70±0.15) g 的幼虾的盐度安全值为 6.23 g · L⁻¹ (李庭古,2009a,2009b)。平均体重为 1.75 g 的红螯螯虾幼虾和 0.222 g 的虾苗的盐度安全值分别为 4.41‰ 和 5.04‰ (吴志新等,1997)。李庭古

(2009b)指出,盐度为 0‰~14‰ 时,克氏原螯虾的幼体均能存活与生长,盐度为 0‰~6‰ 时,其成活率较高,生长较快,饲料系数较低。张曹进等(2011)的实验显示,克氏原螯虾对 10‰ 以下盐度具有较强的适应性(表 1)。

表 1 环境因子或毒性污染物对淡水螯虾的半致死浓度和安全浓度

Table 1 The mean lethal concentrations (LC₅₀) and safety concentrations of environmental factors or toxic contaminants for freshwater crayfish

物种 Species	规格大小 Values	环境因子或毒性污染物 Environmental factor or toxic contaminant	半致死浓度 Medial lethal concentration	安全浓度或 适宜范围 Safety concentration or suitable range	文献 Reference
克氏原螯虾 <i>P. clarkii</i>	(15.15±2.12) g	盐度 Salinity		6.00 g · L ⁻¹	李洪涛等,2006
	(1.70±0.15) g	盐度 Salinity		6.23 g · L ⁻¹	李庭古,2009a,2009b
	(2.7±0.3) cm	温度 Temperature		26 °C	张龙岗等,2015
	均长 A.L. 6.7 mm	温度 Temperature		25 °C	李铭等,2006
	(28.88±4.40) g	低 pH Low pH	pH=3.675(96 h)		陶易凡等,2016a
	(24.17±3.40) g	高 pH High pH	pH=10.194(96 h)		陶易凡等,2016b
	1.0~1.5 cm	氨氮 Ammonia	167.54 mg · L ⁻¹ (24 h)	7.94 mg · L ⁻¹	罗静波等,2006
	1.0~1.5 cm	非离子氨 Non-ionic ammonia	4.04 mg · L ⁻¹ (24 h)	0.191 mg · L ⁻¹	
	(6.8±1.2) g	氨氮 Ammonia	289.36 mg · L ⁻¹ (24 h)	37.89 mg · L ⁻¹	钟君伟等,2013
	(12.8±1.1) g		441.88 mg · L ⁻¹ (24 h)	76.95 mg · L ⁻¹	
	0.95~1.06 cm	亚硝酸盐 Nitrite	28.69 mg · L ⁻¹ (24 h)	1.52 mg · L ⁻¹	罗静波等,2005
	(6.91±0.41) cm	亚硝酸盐 Nitrite	118.0 mg · L ⁻¹ (24 h)	12.32 mg · L ⁻¹	钟君伟等,2014
	(31.25±0.5) g	Hg ²⁺	18.39 mg · L ⁻¹ (24 h)	0.0143 mg · L ⁻¹	宋维彦等,2010
	(31.25±0.5) g	Cd ²⁺	36.99 mg · L ⁻¹ (24 h)	0.0322 mg · L ⁻¹	
	(31.25±0.5) g	Cu ²⁺	49.01 mg · L ⁻¹ (24 h)	0.0401 mg · L ⁻¹	
	(31.25±0.5) g	Pb ²⁺	81.91 mg · L ⁻¹ (24 h)	0.1995 mg · L ⁻¹	
	(31.25±0.5) g	Zn ²⁺	198.34 mg · L ⁻¹ (24 h)	0.2795 mg · L ⁻¹	
	(28.5±1.5) g	Cr ²⁺	335.48 mg · L ⁻¹ (24 h)	9.25 mg · L ⁻¹	谭树华等,2007a,2007b
	1.1~1.5 cm	硫化物 Sulfide	12.96 mg · L ⁻¹ (24 h)	0.46 mg · L ⁻¹	於叶兵等,2011
	红螯螯虾 <i>C. quadricarinatus</i>	1.75 g	盐度 Salinity		4.41‰
0.222 g				5.04‰	
2.85~4.27 cm		温度 Temperature		25 °C	吴志新等,1997
(幼虾 Juvenile shrimp)					
0.9 cm					
(虾苗 Post larvae)					
3.5~5.4 cm				25~30 °C	陈孝煊等,1995
(幼虾 Juvenile shrimp)					
0.8~1.0 cm					
(虾苗 Post larvae)					
2.85~4.27 cm		氨氮 Ammonia	88.9 mg · L ⁻¹ (96 h)		陈孝煊和吴志新,1995
			94.3 mg · L ⁻¹ (24 h)		Meade & Watts,1995
		非离子氨 Non-ionic ammonia	2.02 mg · L ⁻¹ (24 h)		
		亚硝酸盐 Nitrite	42.9 mg · L ⁻¹ (24 h)		
均重 A.W. 0.023 g	Hg ²⁺	0.032 mg · L ⁻¹ (24 h)		陈孝煊等,1999	
均重 A.W. 0.023 g	Cd ²⁺	0.35 mg · L ⁻¹ (24 h)			
均重 A.W. 0.023 g	Zn ²⁺	2.05 mg · L ⁻¹ (24 h)			
均重 A.W. 0.023 g	Pb ²⁺	6.64 mg · L ⁻¹ (24 h)			

盐度对螯虾的代谢、繁殖、行为及免疫功能也有一定的影响。研究表明,0‰~20‰范围内的

盐度变化对体长(9.9±0.4) cm 的克氏原螯虾血淋巴渗透压及鳃丝 Na⁺-K⁺-ATPase 活力和生物胺含

量影响显著,并且这些变化在一定的时间内能趋于稳定,表明螯虾对盐度具有适应能力(金彩霞和潘鲁青,2008)。而盐度在 0‰~4‰时,体重(30~40)g 的克氏原螯虾的孵化率较高,孵化时间较短(李庭古,2009c)。浓度 0‰~12‰内随着盐度的升高,体重(1.82±0.21)g 的克氏原螯虾幼虾的耗氧率和排氨率均有增高的趋势,并且 2 个指标均在盐度为 2‰时最低,说明螯虾幼虾的等渗点盐度可能在 2‰左右(李庭古和马牲,2009)。盐度为 4‰时,克氏原螯虾格斗时间显著长于盐度为 12‰的实验组,格斗次数也多于 0‰和 12‰的次数(陈翔宇等,2013)。张龙岗等(2015b)认为,适当的升高盐度可以激活和增强体重(7.51±1.23)g 的克氏原螯虾肝脏中的抗氧化酶活力以及鳃丝 ATPase 活力,但不同酶的激活具有一定的组织器官特异性和时序性。

2 温度

温度是常规的环境因子之一,对水产动物的生长和存活具有十分重要的影响。张龙岗等(2015b)指出,适当提高螯虾的幼苗养殖温度,可以促进体长(2.7±0.3)cm 的螯虾生长和存活,26℃ 条件是最适合螯虾幼苗生长的温度。李铭等(2006)研究表明,低温下螯虾生长缓慢,但成活率高,一定的高温可明显促进幼虾的生长,但在 31℃ 时死亡率很高,建议温度为 25℃ 最适于螯虾幼虾的生长发育。对于红螯螯虾,吴志新等(1997)对幼虾(体长 2.85~4.27 cm)和虾苗(体长 0.9 cm)进行温度耐受性实验,结果表明,红螯螯虾在一定范围内对温度有一定的耐受性,25℃ 最适合幼虾和虾苗的生长和存活。陈孝煊等(1995b)认为,25~30℃ 最适合红螯螯虾的生长。

韩晓磊等(2013)设置了 4、12 和 25℃ 3 个温度梯度,测定了克氏原螯虾在 96 h 内的心率和耗氧率的变化,实验结果显示,温度越低,螯虾的心率和耗氧率也越低,死亡率也降低。韩晓磊等(2011)以体重为 24.95~39.28 g 的克氏原螯虾为研究对象,设计了 10~30℃ 的 5 个温度梯度,观察认为温度对克氏原螯虾的交配、抱卵、孵化都有一定程度的影响。李进和温海深(2009)的研究表明,在 20~30℃ 范围内,随着温度升高,红螯螯虾的抱卵率和孵化率均明显增高。王天神等(2012)指出,温度对体重 10~15 g 的克氏原螯虾免疫力有显著的影响,水温在 20℃ 左右时螯虾的相关免疫因子指标较好,有较强的抗病能力。

3 pH

pH 是水体环境评价的一个重要指标,pH 过高或过低都会对水生生物造成一定的危害。陶易凡等(2016a,2016b)对体重(25.88±4.40)g 的克氏原螯虾进行了研究,得出低 pH 的 96 h LC₅₀为 3.675,并测定了半致死浓度下鳃代谢酶活力和肝胰腺抗氧化指标,结果表明,低 pH 胁迫会引起组织缺氧,虾体氧化防御功能在胁迫前期被诱导激活,在胁迫后期受到一定抑制,并且鳃和肝胰腺组织结构受损。高 pH 对克氏原螯虾的 96 h LC₅₀为 10.194,高 pH 胁迫可导致氧化应激,并对鳃和肝胰腺的组织结构造成损伤,使组织的生物功能受到影响。倪静静(2016)研究了 pH 对克氏原螯虾摄食行为的影响,认为 pH 过高或低都会使摄食行为缓慢,指出 30℃ 水温和 pH 6.7 是克氏原螯虾摄食的最佳条件。郭春雨等(2007)发现,体长(9.0±0.5)cm 的克氏原螯虾的 Na⁺-K⁺-ATPase 在 pH 为 7.0 时酶活力最高。

4 氨氮

氨氮是水产动物排泄以及残饵、粪便的氨化作用所产生的,随着养殖时间的延长,氨氮会不断积累(洗健安等,2014)。研究显示,克氏原螯虾的规格越大,其氨氮耐受力越强。在 pH 7.8、水温 20℃ 的条件下,氨氮对克氏原螯虾幼虾(体长 1.0~1.5 cm)的 24 h LC₅₀为 167.54 mg·L⁻¹(罗静波等,2006),对体重(6.8±1.2)和(12.8±1.1)g 的克氏原螯虾的 24 h LC₅₀分别为 289.36 和 441.88 mg·L⁻¹(钟君伟等,2013)。陈婷等(2011)研究了克氏原螯虾对氨溶液的趋避选择性,结果显示,体长(5.01±0.43)cm 的亚成体在氨浓度 4.750~14.250 mg·L⁻¹时,无明显选择性,在氨浓度 19.000 mg·L⁻¹时,则显著避开污水;(0.75±0.15)cm 的幼体在氨浓度 4.750 mg·L⁻¹时,无明显选择性,在氨浓度 7.125 和 9.500 mg·L⁻¹时,显著避开污水,当氨浓度达到 14.250 mg·L⁻¹及以上时,出现中毒症状,丧失选择能力。在水温 21~22℃、pH 为 6.7~7.2 时,氨氮对体长 2.85~4.27 cm 的红螯螯虾的 48、72、96 h 的 LC₅₀分别为 118.06、100.79 和 88.9 mg·L⁻¹(陈孝煊和吴志新,1995)(表 1)。

高浓度氨氮胁迫能抑制红螯螯虾幼虾部分免疫酶活力及基因表达,对免疫系统造成损害。胁迫

之后7 h的恢复时间不足以让红螯螯虾从胁迫中完全恢复,其肌肉仍处于轻度氧化应激状态(蒋琦辰等,2013)。氨氮浓度为 $0\sim 50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,克氏原螯虾抗氧化酶活性随着氨氮胁迫水平增加表现出先激活后抑制的趋势,在此过程中机体因氨氮胁迫而受到的损伤逐渐增加(芦光宇等,2014)。朱毅菲(2006)认为,高浓度氨氮能在8 h内迅速提高克氏原螯虾的免疫能力,而长时间作用则导致螯虾抗病力下降,对病原的易感性提高。

5 亚硝酸盐

亚硝酸盐也是养殖水体中常见的污染物之一,主要由氨氮转化而来,对水产动物具有较强的毒性(寇红岩等,2014)。与氨氮耐受力一样,规格越大的克氏原螯虾的亚硝酸盐氮耐受力越强。亚硝酸盐氮对体长 $0.95\sim 1.06\text{ cm}$ 的克氏原螯虾仔虾的24 h LC_{50} 为 $28.69\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (罗静波等,2005);对体长 $(6.91\pm 0.41)\text{ cm}$ 的克氏原螯虾成虾的24 h LC_{50} 为 $118.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (钟君伟等,2014)(表1)。

亚硝酸盐胁迫下,肝胰腺总超氧化物歧化酶(T-SOD)和过氧化氢酶(CAT)活力显著降低,而酸性磷酸酶(ACP)和碱性磷酸酶(AKP)活力变化趋势相同,在12 h时被诱导升高,之后恢复到正常水平。研究显示,亚硝酸盐胁迫下红螯螯虾肝胰腺、鳃和肌肉中的免疫酶活力都显著降低,随着亚硝酸盐浓度的增加,酶活力也呈现降低的趋势;超微结构显示各个组织也受到了不同程度的破坏,肝胰腺和鳃的形态学结构受损,影响其生物学功能(吕晓燕等,2010)。

6 重金属

随着近年来工业的快速发展,淡水资源污染日益加重,特别是工业排放的重金属离子严重污染了水体环境。重金属具有较强的毒性,并且容易积累在水产动物体内,对人类健康造成威胁。重金属对淡水养殖螯虾的危害是研究的重点之一。

6.1 重金属对淡水螯虾的急性毒性

宋维彦等(2010)研究了 Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Zn^{2+} 对克氏原螯虾的毒性作用,结果显示,毒性强度依次为 $\text{Hg}^{2+}>\text{Cd}^{2+}>\text{Cu}^{2+}>\text{Pb}^{2+}>\text{Zn}^{2+}$ 。谭树华等(2007a, 2007b)测得 Cr^{6+} 对克氏原螯虾的24、48、72和96 h LC_{50} 分别为335.48、165.23、117.51和92.52 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,安全浓度为 $9.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。陈孝煊等(1999)指出, Hg^{2+} 、

Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Pb^{2+} 对红螯螯虾的毒性强度依次为 $\text{Hg}^{2+}>\text{Cd}^{2+}>\text{Zn}^{2+}>\text{Pb}^{2+}$ 。

6.2 重金属对淡水螯虾生长的影响及其在虾体内的富集

Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 在低浓度时对克氏原螯虾幼虾的生长有一定的促进作用,而高浓度时则抑制幼虾的生长甚至产生致死作用(王书莉等,2012)。肝胰腺、鳃、螯足肌、腹部肌、甲壳等不同组织都具有富集重金属的能力,且富集量与生境中的土壤和水体中的重金属含量密切相关,环境中重金属污染越严重,虾体各组织富集重金属的量就越多。

6.3 重金属对淡水螯虾组织的损伤及其对酶活力的影响

王权等(2012)认为,当 Zn^{2+} 浓度高于 $4.04\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,浸浴21 d后克氏原螯虾组织均出现不同程度的病变,并严重影响螯虾的生存和繁殖。研究显示,克氏原螯虾的肝胰腺比鳃对高浓度 Cr^{6+} 的毒性更为敏感,高浓度 Cr^{6+} 在短期内可能对抗氧化防御功能起促进作用;另外,高浓度下克氏原螯虾抗氧化能力的提高可能并非由抗氧化酶活力的提高引起,而主要通过调动机体非酶促系统来完成(谭树华等,2007a, 2007b)。水体 Cu^{2+} 胁迫会导致克氏原螯虾蛋白质的氧化损伤,可能与 Cu^{2+} 诱发机体细胞产生大量的活性氧(ROS)有关(赵辉,2014)。为保证氧化和抗氧化的平衡,谷胱甘肽过氧化物氧化酶(GSH-Px)活力和总抗氧化能力(T-AOC)也随之升高。当ROS过量时,抗氧化酶活力开始下降。组织蛋白受到氧化损伤,可能会破坏鳃的呼吸作用,还会破坏肝胰腺的生理机能,这可能是 Cu^{2+} 产生毒性效应和影响虾体健康的重要机制。肝胰腺比血清更容易受到 Zn^{2+} 胁迫的影响,克氏原螯虾可通过调节免疫相关酶的活力来适应 Zn^{2+} 胁迫,其对 Zn^{2+} 有很强的耐受能力(谭树华等,2007c)。

7 农药

7.1 农药对淡水螯虾的急性毒性

稻虾混养是克氏原螯虾的常见养殖模式之一,但稻田往往容易产生农药残留,从而对螯虾产生毒害作用。徐怡等(2010)研究了10种农药对克氏原螯虾幼虾的急性毒性,分别测定了星科、草甘膦、抑虱净、锐劲特、逐灭(自来水)、逐灭(池塘水)、卷清、敌敌畏、百草一号、索虫亡和敌杀死对克氏原螯

虾幼虾的 24 h LC_{50} 和安全浓度,认为克氏原螯虾对不同农药的耐受力不同,其中草甘膦的毒性最低,百草一号的毒性也相对较低,而敌杀死、卷清登对螯虾幼虾的毒性很高。王彬等(2010)对体长(18±1.0) cm 的克氏原螯虾做了 4 种农药(战尽、宁南霉素、噻虫啉、毒死蜱)的毒性实验,发现 48 h 后,战尽、噻虫啉、宁南霉素没有造成螯虾的死亡,而毒死蜱则造成螯虾死亡。研究显示,敌百虫、稻瘟灵、毒死蜱和阿维菌素对体重(34.43±7.04) g 的克氏原螯虾的 24 h LC_{50} 分别为 65.07、42.16、0.17、1.23 $mg \cdot L^{-1}$,安全浓度分别为 3.24、6.34、0.122、0.117 $mg \cdot L^{-1}$ (徐滨等,2014)。可见,阿维菌素和毒死蜱的毒性较高。溴氰菊酯对克氏原螯虾的 24、48、96 h LC_{50} 分别为 0.156、0.0993 和 0.0562 $\mu g \cdot L^{-1}$,安全浓度为 5.62 $\mu g \cdot L^{-1}$ (魏华等,2010)。五氯酚钠对均重 1.38 g 的克氏原螯虾小虾的 24 和 48 h LC_{50} 分别为 80 和 67.5 $mg \cdot L^{-1}$,安全浓度为 14.46 $mg \cdot L^{-1}$;对 29.5 g 的大虾的 24 和 48 h LC_{50} 分别为 750 和 500 $mg \cdot L^{-1}$,安全浓度为 100 $mg \cdot L^{-1}$ (潘建林等,2005)。特丁磷对克氏原螯虾的 96 h LC_{50} 为 5.9 $g \cdot L^{-1}$ (Fornstrom *et al.*,2010)。烟碱类杀虫剂对克氏原螯虾的毒性要远小于拟除虫菊酯类杀虫剂,3 种烟碱类杀虫剂噻虫胺、噻虫嗪和呋虫胺的 96 h LC_{50} 分别为 59、967 和 2032 $\mu g \cdot L^{-1}$,2 种常用拟除虫菊酯类杀虫剂氯氟氰菊酯和醚菊酯的 96 h LC_{50} 分别为 0.16 和 0.29 $\mu g \cdot L^{-1}$ (Barbee & Stout,2009)。

7.2 农药对淡水螯虾组织结构和酶活力的影响

根据抗氧化酶活力的变化,在 48 h 内溴氧菊酯可以通过氧化损伤途径对克氏原螯虾机体产生毒性作用,其对螯虾的毒性极强(魏华等,2010)。研究显示,0.5、0.1 和 0.005 $\mu g \cdot L^{-1}$ 3 个浓度的溴氧菊酯均造成克氏原螯虾肌细胞超微结构损伤,并使组织中产生大量的乳酸,从而导致细胞毒性(吴楠等,2015)。克氏原螯虾暴露于 20 $\mu g \cdot L^{-1}$ 的杀螟硫磷 2 h 后,乙酰胆碱酯酶(AChE)活性会被显著抑制,48 h 后达到最大抑制率(47%)(Escartin & Porte,1996)。

8 其他毒性物质

乐亚玲等(2011)研究了微囊藻毒素对克氏原螯虾的毒性作用,发现浓度为 1.0×10^6 cells $\cdot mL^{-1}$ 下、体长(12.09±0.98) mm 的螯虾幼虾的存活率较

高,为 96.67%;而体长(57.52±3.84) mm 的成虾比幼虾具有更强的耐受性。虾体暴露在铜绿微囊藻溶液后,其免疫酶活力受到藻毒素影响,会有一定程度的升高或减弱,但最终维持在一定的范围;暴露 4 h 后,其血淋巴细胞的吞噬功能受到严重抑制。

於叶兵等(2011)对体长 1.1~1.5 cm 的克氏原螯虾幼虾做了硫化物毒性实验,结果表明,硫化物对克氏原螯虾幼虾 24、48、72、96 h 的半致死浓度分别为 12.96、9.57、7.62、4.63 $mg \cdot L^{-1}$,安全浓度为 0.46 $mg \cdot L^{-1}$,是标准渔业水质的 2.3 倍,说明螯虾幼虾对硫化物的耐受力较强。

赵朝阳等(2009)研究了硫酸铜、高锰酸钾、生石灰和食盐对克氏原螯虾的急性毒性作用,结果显示,它们对螯虾幼虾 24 h LC_{50} 分别为 12.81、9.45、95.12、13.66 $g \cdot L^{-1}$,安全浓度分别为 0.91、0.44、8.08、2.04 $g \cdot L^{-1}$,对克氏原螯虾幼虾的毒性大小依次为高锰酸钾>硫酸铜>食盐>生石灰。

9 问题与展望

水体环境因子以及各类毒性污染物对水产养殖具有至关重要的影响,可直接影响养殖的成败。关于淡水螯虾生理生态学和环境毒理学方面的研究已有一定的基础,但仍有欠缺和待改进之处:(1)目前的研究主要集中在克氏原螯虾,针对红螯螯虾的研究仍甚少;(2)不同规格螯虾对胁迫或毒性的耐受能力有一定的差异,但针对不同规格螯虾的研究仍较少;(3)目前的研究仍处于生理生化层次,可借助转录组、蛋白组等分子生物学手段深入研究淡水螯虾的抗胁迫分子机制,挖掘抗胁迫和解毒的基因,为进一步研究如何提高胁迫和毒性耐受能力提供参考;(4)各地应尽快对目前稻田中所养螯虾进行农药残留检测,以便获得农药残留数据。建议今后采用稻虾混养时,为达到食品安全基本标准,必须以稻田中不用农药为前提,从而确保养殖的螯虾体内无农药残留。

参考文献

- 陈婷,张蕾,唐建清,黄成,2011. 克氏原螯虾亚成体和幼体对不同氨浓度水环境的选择. *长江流域资源与环境*, 20(10): 1186-1190.
- 陈翔宇,王陈路,李佳佳,唐建清,黄成,2013. 盐度对克氏原螯虾格斗行为及存活率的影响. *水产科技情报*, 40(3): 126-130.

- 陈孝煊, 吴志新, 1995. 澳大利亚红螯螯虾对水中氨氮浓度耐受性的研究. 水产科技情报 (1): 14-16.
- 陈孝煊, 吴志新, 操玉涛, 陈喜群, 1999. 红螯螯虾虾苗对四种重金属离子的耐受性. 华中农业大学学报, 18(5): 476-478.
- 陈孝煊, 吴志新, 胡立才, 1995. 水温对澳大利亚红螯螯虾摄食及生长的影响. 华中农业大学学报 (5): 477-480.
- 郭春雨, 管越强, 刘波兰, 2007. 温度、pH 和盐度对克氏原螯虾鳃 $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{ATPase}$ 活性的影响. 动物学杂志, 42(6): 96-102.
- 韩晓磊, 李小蕊, 程东成, 李波, 徐建荣, 2011. 温度对克氏原螯虾交配、抱卵、孵化和幼体生长发育的影响. 湖北农业科学, 50(10): 2078-2080.
- 韩晓磊, 谢雨, 李小蕊, 宋亮, 徐建荣, 2013. 温度对克氏原螯虾生理特征的影响. 水产养殖, 34(1): 37-40.
- 蒋琦辰, 顾曙余, 张文逸, 张呈祥, 冯晓庆, 谭红月, 杨家新, 黄文婷, 李枫, 2013. 氨氮急性胁迫及其毒后恢复对红螯光壳螯虾幼虾相关免疫和代谢指标的影响. 水产学报, 37(7): 1066-1072.
- 金彩霞, 潘鲁青, 2008. 盐度变化对克氏原螯虾渗透调节影响机制的初步研究. 水生生物学报, 32(6): 894-899.
- 寇红岩, 冼健安, 郭慧, 钱坤, 苗玉涛, 叶超霞, 潘训彬, 王安利, 2014. 亚硝酸盐对虾类毒性影响的研究进展. 海洋科学, 38(2): 107-115.
- 乐亚玲, 2011. 铜绿微囊藻及微囊藻毒素对克氏原螯虾的毒性作用. 硕士学位论文. 上海: 上海海洋大学.
- 李洪涛, 周文宗, 高红莉, 张璐, 2006. 盐度和碱度对克氏原螯虾的联合毒性试验. 水产养殖, 27(5): 1-4.
- 李进, 温海深, 2009. 温度对红螯螯虾抱卵率和孵化的影响. 现代农业科学 (4): 193-194.
- 李铭, 董卫军, 邢迎春, 巩雪洁, 王玉凤, 2006. 温度对克氏原螯虾幼虾发育和存活的影响. 水生态学杂志, 26(2): 36-37.
- 李庭古, 2009a. 盐度对克氏螯虾幼虾毒性试验. 农业经济与管理 (4): 37-40.
- 李庭古, 2009b. 盐度对克氏原螯虾幼虾生长的影响. 水产科学, 28(8): 465-467.
- 李庭古, 2009c. 盐度对克氏原螯虾孵化率的影响. 水产科学, 28(12): 789-791.
- 李庭古, 马姓, 2009. 不同盐度对克氏螯虾幼虾代谢率的影响. 海洋湖沼通报 (3): 174-178.
- 芦光宇, 刘国兴, 李佳佳, 彭刚, 严维辉, 魏万红, 唐建清, 2014. 氨氮对克氏原螯虾抗氧化功能的影响. 江西农业学报 (2): 129-133.
- 罗静波, 曹志华, 蔡太锐, 温小波, 2006. 氨氮对克氏原螯虾幼虾的急性毒性研究. 长江大学学报(自然版), 3(4): 183-185.
- 罗静波, 曹志华, 温小波, 蔡太锐, 2005. 亚硝酸盐氮对克氏原螯虾仔虾的急性毒性效应. 长江大学学报(自科版), 2(11): 64-66.
- 吕晓燕, 李嘉尧, 方燕, 郭占林, 赵云龙, 李恺, 2010. 亚硝酸盐对红螯光壳螯虾不同组织免疫相关酶活性及超微结构的影响. 水产学报, 34(12): 1812-1820.
- 倪静静, 2016. 水温、pH 和饲料对克氏原螯虾摄食行为及其肉质的影响. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学.
- 潘建林, 宋胜磊, 唐建清, 吴军, 黄成, 2005. 五氯酚钠对克氏原螯虾急性毒性试验. 农业环境科学学报, 24(1): 60-63.
- 宋维彦, 靳桂双, 毕伟伟, 田艳苓, 王慧, 2010. 五种重金属离子对克氏原螯虾 (*Procambarus clarkii*) 的急性毒性作用研究. 激光生物学报, 19(2): 206-211.
- 谭树华, 邓先余, 蒋文明, 贺凤丽, 2007a. Cr^{6+} 和 Hg^{2+} 对克氏原螯虾的急性毒性试验. 水生态学杂志, 27(5): 93-95.
- 谭树华, 邓先余, 蒋文明, 贺凤丽, 2007b. 高浓度铬对克氏原螯虾抗氧化酶系统的影响. 农业环境科学学报, 26(4): 1356-1360.
- 谭树华, 何艳, 谢佳, 肖菁菁, 谢从新, 2007c. 高浓度 Zn^{2+} 对克氏原螯虾几种免疫学相关指标的影响. 生态与农村环境学报, 23(4): 67-71.
- 陶易凡, 强俊, 王辉, 徐跑, 马昕羽, 赵文强, 2016a. 低 pH 胁迫对克氏原螯虾鳃和肝胰腺酶活力及组织结构的影响. 中国水产科学, 23(6): 1279-1289.
- 陶易凡, 强俊, 王辉, 徐跑, 马昕羽, 赵文强, 2016b. 高 pH 胁迫对克氏原螯虾的急性毒性和鳃、肝胰腺中酶活性及组织结构的影响. 水产学报, 40(11): 1694-1704.
- 王彬, 杨玉松, 邱丛芳, 2010. 常用农药对稻田养殖克氏原螯虾的影响. 科技信息 (8): 341.
- 王权, 王建国, 陆宏达, 熊良伟, 安健, 2012. 硫酸锌慢性毒性胁迫下克氏原螯虾的组织病理. 中国水产科学, 19(1): 126-137.
- 王书莉, 2012. Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 浓度对克氏原螯虾生长及其体内富集的影响. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学.
- 王天神, 周鑫, 赵朝阳, 徐增洪, 水燕, 2012. 不同温度条件下克氏原螯虾免疫酶活性变化. 江苏农业科学, 40(12): 239-241.
- 魏华, 吴楠, 沈竑, 成永旭, 吴婷婷, 2010. 溴氰菊酯对克氏原螯虾的氧化胁迫效应. 水产学报, 34(5): 733-739.
- 吴楠, 魏华, 沈竑, 徐克怀, 陈金民, 2015. 溴氰菊酯对克氏原螯虾肌肉组织的毒性研究. 水产学报, 39(9): 1412-1421.
- 吴志新, 陈孝煊, 李明, 1997. 红螯螯虾对温度耐受性的试验. 水利渔业 (3): 12-13.
- 冼健安, 钱坤, 郭慧, 苗玉涛, 王安利, 王冬梅, 2014. 氨氮

- 对虾类毒性的研究进展. 饲料工业, 35(22): 52-58.
- 徐滨, 朱祥云, 魏开金, 马宝珊, 2014. 四种稻田农药对克氏原螯虾的急性毒性研究. 淡水渔业 (5): 38-42.
- 徐怡, 刘其根, 胡忠军, 沈竑, 曹君韞, 童留青, 2010. 10 种农药对克氏原螯虾幼虾的急性毒性. 生态毒理学报, 5(1): 50-56.
- 於叶兵, 陆伟, 黄金田, 赵卫红, 吕林兰, 王爱民, 2011. 亚硝酸盐和硫化物对克氏原螯虾幼虾的毒性效应研究. 水生生态学杂志, 32(1): 111-114.
- 张曹进, 姚国兴, 吴国钧, 任忠宏, 2011. 克氏原螯虾对盐度适应性试验. 水产养殖, 32(7): 35-37.
- 张龙岗, 钟君伟, 朱永安, 2015a. 温度对克氏原螯虾苗种生长和存活的影响. 河北渔业 (1): 4-5.
- 张龙岗, 董学飒, 朱永安, 安丽, 孟庆磊, 杨玲, 2015b. 急性盐度胁迫对克氏原螯虾肝脏抗氧化酶及鳃丝 Na^+/K^+ -ATP 酶活力的影响. 淡水渔业 (4): 87-91.
- 赵朝阳, 周鑫, 徐增洪, 王桂芹, 戈贤平, 2009. 4 种水产药物对克氏原螯虾的急性毒性研究. 吉林农业大学学报, 31(4): 456-459.
- 赵辉, 2014. 重金属 Cu^{2+} 对克氏原螯虾的蛋白质氧化损伤效应研究. 硕士学位论文. 太原: 山西大学.
- 钟君伟, 朱永安, 付佩胜, 安丽, 吕宝玉, 2014. 亚硝酸盐氮对克氏原螯虾成虾的毒性及其抗病因子的影响. 长江大学学报(自科版), 11(5): 36-40.
- 钟君伟, 朱永安, 孟庆磊, 王锡荣, 刘红彩, 2013. 氨氮对 2 种规格克氏原螯虾的急性毒性研究. 长江大学学报(自科版), 10(23): 55-59.
- 朱毅菲, 2006. 不同浓度氨氮、不同低 pH 突变对克氏原螯虾免疫功能的影响. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.
- BARBEE G C, STOUT M J, 2009. Comparative acute toxicity of neonicotinoid and pyrethroid insecticides to non-target crayfish (*Procambarus clarkii*) associated with rice-crayfish crop rotations. *Pest Management Science*, 65(11): 1250-1256.
- ESCARTÍN E, PORTE C, 1996. Acetylcholinesterase inhibition in the crayfish *Procambarus clarkii* exposed to fenitrothion. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 34(2): 160-164.
- FORNSTROM C B, LRUM P F, WEISSKOPF C P, LA P T W, 2010. Effects of terbufos on juvenile red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*): differential routes of exposure. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 16(12): 2514-2520.
- MEADE M E, WATTS S A, 1995. Toxicity of ammonia, nitrite, and nitrate to juvenile Australian crayfish, *Cherax quadricarinatus*. *Journal of Shellfish Research*, 14(2): 341-346.

(责任编辑:郭莹)