

氨氮和亚硝酸盐对红螯螯虾幼虾和 亚成虾的急性毒力

潘训彬¹, 张秀霞², 鲁耀鹏¹, 郑佩华¹, 王安利¹, 冼健安^{2*}

¹华南师范大学生命科学学院, 广东 广州 510631; ²中国热带农业科学院
热带生物技术研究所以, 海南 海口 571101

摘要:【目的】近年来,红螯螯虾养殖面积越来越广泛,明确不同规格的红螯螯虾对氨氮和亚硝酸盐的耐受力,有利于提高其养成率,促进其养殖业的健康发展。【方法】在水温 24~25 °C、pH 7.9~8.0 的条件下,研究了氨氮和亚硝酸盐对红螯螯虾幼虾和亚成虾的急性毒性,分析半致死浓度(LC₅₀)和安全浓度(SC)。【结果】总氨氮对红螯螯虾幼虾的 24、48、72 和 96 h LC₅₀ 分别为 188.0、136.15、104.67 和 88.00 mg · L⁻¹, SC 为 8.80 mg · L⁻¹;总氨氮对亚成虾的 24、48、72 和 96 h LC₅₀ 分别为 344.01、270.46、205.15 和 167.68 mg · L⁻¹, SC 为 16.77 mg · L⁻¹;非离子氨对幼虾的 24、48、72 和 96 h LC₅₀ 分别为 10.16、7.35、5.65 和 4.75 mg · L⁻¹, SC 为 0.48 mg · L⁻¹;非离子氨对亚成虾的 24、48、72 和 96 h LC₅₀ 分别为 18.58、14.60、11.08 和 9.05 mg · L⁻¹, SC 为 0.91 mg · L⁻¹;亚硝酸盐对幼虾的 24、48、72 和 96 h LC₅₀ 分别为 46.76、33.88、27.97 和 22.81 mg · L⁻¹, SC 为 2.28 mg · L⁻¹;亚硝酸盐对亚成虾的 24、48、72 和 96 h LC₅₀ 分别为 77.56、59.33、45.41 和 37.48 mg · L⁻¹, SC 为 3.75 mg · L⁻¹。【结论】红螯螯虾对氨氮的耐受力高于亚硝酸盐,亚成虾对氨氮和亚硝酸盐的耐受力高于幼虾。

关键词: 红螯螯虾; 氨氮; 亚硝酸盐; 急性毒性

Acute toxicity of ammonia and nitrite on juvenile and subadult redclaw crayfish (*Cherax quadricarinatus*)

PAN Xunbin¹, ZHANG Xiuxia², LU Yaopeng¹, ZHENG Peihua¹, WANG Anli¹, XIAN Jian'an^{2*}

¹College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631, China; ²Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China

Abstract: 【Aim】In recent years, the aquaculture of redclaw crayfish has significantly increased. The aim of this study is to understand the ammonia-N and nitrite-N tolerance of different life stages of red claw crayfish to improve the survival rate and promote the redclaw crayfish production in aquaculture. 【Method】The acute toxicity of ammonia-N and nitrite-N on juvenile and subadult redclaw crayfish was tested, and the half lethal concentrations (LC₅₀) and safe concentrations (SC) under 24~25 °C and pH 7.9~8.0 were determined. 【Result】The LC₅₀s of total ammonia-N for juvenile crayfish at 24 h, 48 h, 72 h and 96 h were 188.0, 136.15, 104.67 and 88.00 mg · L⁻¹, and the SC was 8.80 mg · L⁻¹. The LC₅₀s of total ammonia-N for subadult at 24 h, 48 h, 72 h and 96 h were 344.01, 270.46, 205.15 and 167.68 mg · L⁻¹, and the SC was 16.77 mg · L⁻¹. The LC₅₀s of non-ionic ammonia for juvenile at 24 h, 48 h, 72 h and 96 h were 10.16, 7.35, 5.65 and 4.75 mg · L⁻¹, and the SC was 0.48 mg · L⁻¹. The LC₅₀s of non-ionic ammonia for subadult at 24 h, 48 h, 72 h and 96 h were 18.58, 14.60, 11.08 and 9.05 mg · L⁻¹, and the SC was 0.91 mg · L⁻¹. The LC₅₀s of nitrite-N for juvenile at 24 h, 48 h, 72 h and 96 h were 46.76, 33.88, 27.97 and 22.81 mg · L⁻¹, and the SC was 2.28 mg · L⁻¹. The LC₅₀s of nitrite-N for subadult at 24 h, 48 h, 72 h and 96 h were 77.56, 59.33, 45.41 and 37.48 mg · L⁻¹, and the SC was 3.75 mg · L⁻¹. 【Conclusion】The tolerance of redclaw crayfish to ammonia-N was stronger than nitrite-N, and the tolerance of subadult to ammonia-N and nitrite-N was stronger than that of juvenile.

Key words: *Cherax quadricarinatus*; ammonia; nitrite; acute toxicity

收稿日期(Received): 2017-03-31 接受日期(Accepted): 2017-05-17

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: 潘训彬, 男, 实验师。研究方向: 水产养殖生态及毒理学, 水产动物营养与饲料学。E-mail: defun@126.com

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

红螯螯虾 *Cherax quadricarinatus* (von Martens) 原产自澳大利亚,是目前世界上主要养殖的淡水经济虾类之一。红螯螯虾自 20 世纪 90 年代便已引入我国试养,由于虾苗繁殖量低及凡纳滨对虾 *Litopenaeus vannamei* Boone 正处于养殖热潮,致使红螯螯虾没能大面积推广,仅有少量规模的养殖。近年来,凡纳滨对虾疾病频发、养成率低下,罗非鱼养殖也面临利润空间低等状况,这些主养品种一直处于低迷且难以短时恢复的状态。红螯螯虾具备食性广、个体大、生长速度快、适应性强、出肉率较高、肉质鲜美、经济价值高等优点(赵云龙等,2000)。近几年,借着克氏原螯虾 *Procambarus clarkii* Girard 的养殖势头,红螯螯虾的养殖规模也逐渐扩大。但是,红螯螯虾养殖方面的研究仍较少,主要集中在育苗技术方面的研究报道(罗文等,2004;吴志新等,2000;赵云龙等,2000)。氨氮和亚硝酸盐是水产集约化养殖过程中主要的 2 种水体毒性污染物(寇红岩等,2014;冼健安等,2014),本文研究了氨氮和亚硝酸盐对 2 种规格的红螯螯虾的毒性,确定了半致死浓度(LC₅₀)和安全浓度(SC),以期为红螯螯虾的人工养殖提供参考数据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用红螯螯虾购自海南省琼海市某私人养殖场,幼虾体长 25~38 mm,体重 0.83~1.88 g,亚成虾体长 72~93 mm,体重 38.31~54.92 g。实验前在实验室循环养殖系统养殖 1 周,水温 24~25 ℃,pH 7.9~8.0,溶解氧 5.6~6.0 mg·L⁻¹。实验前停食 24 h,选取处于蜕皮间期、健康无病患、附肢完整的螯虾作为实验用虾。

1.2 实验方法

毒性实验参考罗静波等(2005)和钟君伟等(2013)的方法。实验在放置 30 L 水的塑料储物箱(52.5 cm×37.5 cm×32 cm)中进行。经预实验确定浓度范围后,再按等对数间距分别设置对照组和 7 个浓度梯度组,浓度设置如表 1 所示。以 NH₄Cl(广州化学试剂厂,分析纯)作为氨氮来源,NaNO₂(广州化学试剂厂,分析纯)作为亚硝酸氮来源,根据设定的浓度准确称量并溶解到水中。幼虾组每箱放置幼虾 20 尾,亚成虾组放置 10 尾,每个浓度组设置 3 个重复。实验期间不投喂,及时取出死亡个体及排污,观察记录 24、48、72 和 96 h 的死亡个体数。为保证水体的实验浓度稳定,每 24 h 换水及投药一次。

表 1 氨氮和亚硝酸盐氮的实验浓度
Table 1 The experimental doses of ammonia-N and nitrite-N

处理 Treatments	质量浓度 ρ Doses/(mg·L ⁻¹)							
	对照 CK	1	2	3	4	5	6	7
氨氮-幼虾 Ammonia-juvenile	0	50.00	67.45	90.99	122.74	165.58	223.36	301.30
氨氮-亚成虾 Ammonia-subadult	0	100.00	134.90	181.97	245.47	331.13	446.68	602.56
亚硝酸盐-幼虾 Nitrite-juvenile	0	10.00	13.49	18.20	24.55	33.11	44.67	60.26
亚硝酸盐-亚成虾 Nitrite-subadult	0	20.00	26.98	36.40	49.10	66.22	89.34	120.52

1.3 数据处理

死亡率数据显示为平均值±标准差,应用 SPSS 18.0 进行单因素方差分析,采用 Tukey 多重比较分析组间差异性显著程度, $P<0.05$ 为差异性显著。实验数据利用 SPSS 18.0 的 Probit 分析法计算 LC₅₀,其中响应频率(response frequency)为死亡个数,观测值汇总(total observed)为实验动物数(幼虾 60 尾、亚成虾 30 尾),协变量(covariates)为相应的实验剂量,模型(model)设定为概率(probit),转化(transform)设定为对数底为 10(log base 10)。SC 按以下公式计算(Sprague, 1971):

$SC = 0.1 \times 96 \text{ h } LC_{50}$ 。

2 结果与分析

2.1 氨氮对红螯螯虾的急性毒性效应

如表 2、表 3 所示,对照组无死亡现象,在氨氮急性胁迫下,随着胁迫浓度增加和胁迫时间的延长,幼虾和亚成虾的死亡率均不断上升,氨氮毒性效应增强。幼虾组中,总氨氮浓度为 50.00 和 67.45 mg·L⁻¹ 时,分别在 48 和 24 h 后出现死亡现象,其他浓度组均在 24 h 内出现死亡;总氨氮浓度为 165.58、223.36 和 301.30 mg·L⁻¹ 时,分别在 96、72 和 48 h 内全部死亡。亚成虾组中,总氨氮浓度为 100.00 和 134.90

mg · L⁻¹时,分别在 72 和 24 h 后出现死亡现象,其他浓度组均在 24 h 内出现死亡;总氨氮浓度为 331.13、446.68 和 602.56 mg · L⁻¹时,分别在 96、72 和 72 h 内全部死亡。

依据表 2、表 3 的结果,计算氨氮的 LC₅₀ 和 SC,

结果如表 4 所示。总氨氮对红螯螯虾幼虾和亚成虾的 24 h LC₅₀ 分别为 188.08 和 344.01 mg · L⁻¹, SC 分别为 8.80 和 16.77 mg · L⁻¹。非离子氨对红螯螯虾幼虾和亚成虾的 24 h LC₅₀ 分别为 10.16 和 18.58 mg · L⁻¹, SC 分别为 0.48 和 0.91 mg · L⁻¹。

表 2 氨氮对红螯螯虾幼虾的急性毒性

Table 2 Acute toxicity of ammonia-N on juvenile *C. quadricarinatus*

ρ 总氨氮 Total ammonia /(mg · L ⁻¹)	ρ 非离子氨 Non-ionic ammonia /(mg · L ⁻¹)	死亡率 Mortality/%			
		24 h	48 h	72 h	96 h
0.00	0.00	0.00±0.00e	0.00±0.00e	0.00±0.00e	0.00±0.00d
50.00	2.70	0.00±0.00e	0.00±0.00e	3.33±2.89de	8.33±2.89d
67.45	3.64	0.00±0.00e	3.33±2.89e	11.67±2.89d	20.00±5.00c
90.99	4.91	8.33±2.89e	18.33±2.89d	36.67±2.89c	53.33±2.89b
122.74	6.63	28.33±2.89d	50.00±5.00c	76.67±5.77b	91.67±5.77a
165.58	8.94	40.00±5.00c	71.67±5.77b	93.33±7.64a	100.00±0.00a
223.36	12.06	71.67±7.64b	95.00±5.00a	100.00±0.00a	100.00±0.00a
301.30	16.27	90.00±5.00a	100.00±0.00a	100.00±0.00a	100.00±0.00a

同列不同小写字母表示差异显著。

Different letters in a same column represent significant differences among treatments.

表 3 氨氮对红螯螯虾亚成虾的急性毒性

Table 3 Acute toxicity of ammonia-N on subadult *C. quadricarinatus*

ρ 总氨氮 Total ammonia /(mg · L ⁻¹)	ρ 非离子氨 Non-ionic ammonia /(mg · L ⁻¹)	死亡率 Mortality/%			
		24 h	48 h	72 h	96 h
0.00	0.00	0.00±0.00f	0.00±0.00e	0.00±0.00e	0.00±0.00d
100.00	5.40	0.00±0.00f	0.00±0.00e	0.00±0.00e	3.33±2.89d
134.90	7.28	0.00±0.00f	5.00±5.00e	13.33±2.89d	28.33±2.89c
181.97	9.83	11.67±2.89e	26.67±2.89d	36.67±7.64c	56.67±5.77b
245.47	13.26	36.67±2.89d	53.33±5.77c	81.67±2.89b	98.33±2.89a
331.13	17.88	50.00±5.00c	75.00±5.00b	95.00±5.00a	100.00±0.00a
446.68	24.12	78.33±2.89b	91.67±7.64a	100.00±0.00a	100.00±0.00a
602.56	32.54	93.33±7.64a	98.33±2.89a	100.00±0.00a	100.00±0.00a

同列不同小写字母表示差异显著。

Different letters in a same column represent significant differences among treatments.

表 4 氨氮对红螯螯虾的半致死浓度和安全浓度

Table 4 The LC₅₀s and SC of total ammonia-N and non-ionic ammonia to *C. quadricarinatus*

实验材料 Experimental material	时间 Time/h	总氨氮 Total ammonia			非离子氨 Non-ionic ammonia	
		LC ₅₀ /(mg · L ⁻¹)	95%置信限/(mg · L ⁻¹) 95% Confidence limits	SC/(mg · L ⁻¹)	LC ₅₀ /(mg · L ⁻¹)	SC/(mg · L ⁻¹)
幼虾 Juvenile	24	188.08	168.51~211.87	8.80	10.16	0.48
	48	136.15	128.38~144.61		7.35	
	72	104.67	98.68~111.10		5.65	
	96	88.00	83.09~93.27		4.75	
亚成虾 Subadult	24	344.01	300.87~397.03	16.77	18.58	0.91
	48	270.46	224.86~326.50		14.60	
	72	205.15	194.00~217.08		11.08	
	96	167.68	159.12~176.91		9.05	

2.2 亚硝酸盐对红螯螯虾的急性毒性效应

如表 5、表 6 所示,对照组无死亡现象,在亚硝

酸盐急性胁迫下,随着胁迫浓度的增加和胁迫时间的延长,幼虾和亚成虾的死亡率均不断上升,亚硝

酸盐毒性效应增强。幼虾组中,亚硝酸氮浓度为 10.00、13.49 和 18.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,分别在 72、48 和 24 h 后出现死亡现象,其他浓度组均在 24 h 内出现死亡;亚硝酸氮浓度为 44.67 和 60.26 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,分别在 72 和 48 h 内全部死亡。亚成虾组中,亚硝酸氮浓度为 20.00 和 26.98 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,分别在 48 和 24 h 后出现死亡现象,其他浓度组均在 24 h 内

出现死亡;亚硝酸氮浓度为 66.22、89.34 和 120.52 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,分别在 96、72 和 48 h 内全部死亡。

依据表 5、表 6 的结果,计算亚硝酸氮的 LC_{50} 和 SC,结果如表 7 所示。亚硝酸氮对红螯螯虾幼虾和亚成虾的 24 h LC_{50} 分别为 46.76 和 77.56 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SC 分别为 2.28 和 3.75 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表 5 亚硝酸氮对红螯螯虾幼虾的急性毒性
Table 5 Acute toxicity of nitrite-N on juvenile *C. quadricarinatus*

$\rho_{\text{亚硝酸氮 Nitrite-N}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	死亡率 Mortality/%			
	24 h	48 h	72 h	96 h
0.00	0.00±0.00d	0.00±0.00d	0.00±0.00c	0.00±0.00d
10.00	0.00±0.00d	0.00±0.00d	0.00±0.00c	3.33±5.77d
13.49	0.00±0.00d	0.00±0.00d	3.33±5.77c	10.00±10.00cd
18.20	0.00±0.00d	3.33±5.77d	13.33±5.77c	30.00±10.00c
24.55	10.00±0.00cd	23.33±5.77c	46.67±5.77b	70.00±10.00b
33.11	23.33±5.77c	43.33±15.28b	60.00±10.00b	83.33±15.28ab
44.67	53.33±5.77b	86.67±5.77a	100.00±0.00a	100.00±0.00a
60.26	73.33±15.28a	100.00±0.00a	100.00±0.00a	100.00±0.00a

同列不同小写字母表示差异显著。
Different letters in a same column represent significant differences among treatments.

表 6 亚硝酸氮对红螯螯虾亚成虾的急性毒性
Table 6 Acute toxicity of nitrite-N on subadult *C. quadricarinatus*

$\rho_{\text{亚硝酸氮 Nitrite-N}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	死亡率 Mortality/%			
	24 h	48 h	72 h	96 h
0.00	0.00±0.00d	0.00±0.00d	0.00±0.00d	0.00±0.00e
20.00	0.00±0.00d	0.00±0.00d	3.33±5.77d	10.00±0.00de
26.98	0.00±0.00d	6.67±5.77d	16.67±5.77cd	23.33±5.77d
36.40	3.33±5.77d	16.67±11.55cd	33.33±15.28bc	46.67±11.55c
49.10	16.67±5.77d	30.00±10.00c	53.33±5.77b	76.67±11.55b
66.22	43.33±5.77c	66.67±5.77b	90.00±10.00a	100.00±0.00a
89.34	70.00±10.00b	90.00±10.00a	100.00±0.00a	100.00±0.00a
120.52	90.00±10.00a	100.00±0.00a	100.00±0.00a	100.00±0.00a

同列不同小写字母表示差异显著。
Different letters in a same column represent significant differences among treatments.

表 7 亚硝酸氮对红螯螯虾的半致死浓度和安全浓度
Table 7 The LC_{50} s and SC of nitrite-N to *C. quadricarinatus*

实验材料 Experimental material	时间 Time/h	$\text{LC}_{50}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	95%置信限/ 95% Confidence limits $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{SC}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
幼虾 Juvenile	24	46.76	142.96~51.54	2.28
	48	33.88	31.44~36.72	
	72	27.97	25.84~30.44	
	96	22.81	20.89~24.95	
亚成虾 Subadult	24	77.56	71.39~84.69	3.75
	48	59.33	54.47~64.92	
	72	45.41	41.52~49.81	
	96	37.48	34.18~41.12	

3 讨论

3.1 氨氮对虾类的急性毒性

氨氮是水生动物含氮废物的主要排泄形式,对于甲壳动物,因物种而异,其含氮废物有 40%~90% 以氨氮的形式从鳃上皮组织排出。此外,微生物对残饵和粪便中的含氮有机物进行氨化作用所产生的氨氮,也是养殖水体中氨氮的主要来源(洗健安等,2014)。因此,在集约化养殖系统中,氨氮往往随着养殖时间的延长而不断积累,成为养殖环境中主要的胁迫因子之一。研究表明,氨氮具有较强的毒性,可对虾类的生长、变态、组织结构、生理代谢、免疫力和抗病力等产生负面作用。

多种虾类的氨氮 LC_{50} 和 SC 已有报道,如凡纳滨对虾(孙国铭等,2002)、南方滨对虾 *Litopenaeus schmitti* Burkenroad (Barbieri, 2010)、斑节对虾 *Penaeus monodon* Fabricius (胡贤德等,2009)、罗氏沼虾 *Macrobrachium rosenbergii* De Man (王龙等,2011)、克氏原螯虾(罗静波等,2006;钟军伟等,2013)等。本研究中,水温 24~25 °C、pH 7.9~8.0、溶解氧 5.6~6.0 $mg \cdot L^{-1}$ 的条件下,氨氮对体长 25~38 mm、体重 0.83~1.88 g 的红螯螯虾幼虾的 48 h LC_{50} 为 136.15 $mg \cdot L^{-1}$,与陈孝煊等(1995)的研究结果相似。氨氮对体长 25~38 mm 和 72~93 mm 的红螯螯虾的 24 h LC_{50} 分别为 188.08 和 344.01 $mg \cdot L^{-1}$ 。虽然各研究所选用的虾大小规格有一定的差异,但经粗略比较,克氏原螯虾的氨氮耐受力要强于红螯螯虾。就规格大小而言,红螯螯虾亚成虾的氨氮耐受能力远高于幼虾,与克氏原螯虾相似(钟君伟等,2013),规格越大,氨氮耐受力越强。

对于海水虾类品种,已测定出氨氮对凡纳滨对虾(孙国铭等,2002)、南方滨对虾(Barbieri, 2010)、斑节对虾(胡贤德等,2009)、短沟对虾(Kir *et al.*, 2004)、脊尾白虾(梁俊平等,2012)的 24 h LC_{50} 。水体盐度是氨氮毒性的重要影响因素,较高的盐度会降低非离子氨(NH_3)的比例。另外, Na^+ 很容易置换鳃膜上的离子氨(NH_4^+), Ca^{2+} 和其他二价阳离子也通过增强鳃膜渗透性或增加 Na^+ 的富集来减少氨的毒性,即盐度越高,虾类的氨氮耐受性越强(洗健安等,2014)。上述虾类均为海水品种,它们在较高盐度水体中的 LC_{50} 也明显低于 2 种淡水螯虾,表

明螯虾总科的虾类可能相对其他科的虾类具有更强的氨氮耐受力,这可能是螯虾能够在恶劣水质环境中生存的重要原因之一。

氨氮由离子氨和非离子氨 2 种形式组成,由于非离子氨不带电荷,容易透过细胞膜进入虾体内,所以氨氮的毒性主要集中在非离子氨上,而非离子氨所占的比例又与水体温度、pH 及盐度有关(洗健安等,2014)。因此,分析特定环境条件下的非离子氨毒性可能更具参考价值。针对本研究实验水体的环境条件,换算得到非离子氨对红螯螯虾幼虾和亚成虾的 24 h LC_{50} 分别为 10.16 和 18.58 $mg \cdot L^{-1}$,结果与克氏原螯虾(钟君伟等,2013)较接近,红螯螯虾的非离子氨耐受性也高于其他虾类(梁俊平等,2012;孙国铭等,2002;Barbieri, 2010;Kir *et al.*, 2004)。

3.2 亚硝酸盐对虾类的急性毒性

亚硝酸盐是养殖水体中另一种常见的含氮毒性污染物,主要由氨经过亚硝化细菌的转化而来。因此,在集约化养殖过程中,随着养殖时间的延长,氨氮逐渐积累,亚硝酸盐的浓度也会越来越高。亚硝酸盐对虾类也产生各种毒性影响,如抑制生长和变态发育(彭自然等,2004;Mallaseen & Valenti, 2006)、破坏组织结构(胡义波等,2005)、降低血淋巴载氧能力(Cheng & Chen, 1999)、扰乱氮的生理代谢(Lee & Chen, 2004)、抑制免疫力和抗病力(黄翔鸽等,2006;洗健安等,2016;Chand & Sahoo, 2006;Xian *et al.*, 2011)等。因此,亚硝酸盐也是养殖者重点监测的指标之一。

亚硝酸盐对多种虾类的 LC_{50} 已有较多的报道,如克氏原螯虾(罗静波等,2005;於叶兵等,2011)、罗氏沼虾(Chen & Lee, 1997)、日本沼虾 *M. nipponense* (Wang *et al.*, 2004) 和 马氏沼虾 *M. malcolmsonii* (Chand & Sahoo, 2006)。本研究中,亚硝酸氮对红螯螯虾幼虾和亚成虾的 24 h LC_{50} 分别为 46.76 和 77.56 $mg \cdot L^{-1}$,略高于其他淡水虾类。就规格大小而言,红螯螯虾亚成虾的亚硝酸盐耐受能力远高于幼虾,规格越大,亚硝酸盐耐受力越强。

对于海水虾类品种,亚硝酸氮对凡纳滨对虾(Lin & Chen, 2003)、斑节对虾(Chen *et al.*, 1990a)、中国明对虾 *Fenneropenaeus chinensis* (Chen

et al., 1990b) 和长毛对虾 *P. penicillatus* (Chen & Lin, 1991) 的 24 h LC_{50} 已测得。红螯螯虾的亚硝酸盐耐受性明显低于这些海水种类, 这是由于盐度对亚硝酸盐的毒性影响很大, 盐度越高, 虾类的亚硝酸盐耐受力越高。盐度影响亚硝酸盐毒性主要与 Cl^- 的含量有关, Cl^- 可与 NO_2^- 竞争鳃上的吸收位点, 盐度越高, Cl^- 含量越高, 被吸收进入体内的 NO_2^- 就越少, 毒性效应越低(寇红岩等, 2014)。

综上所述, 红螯螯虾对氨氮的耐受力高于亚硝酸盐, 其规格越大, 氨氮和亚硝酸盐耐受力也越强。相对其他虾类, 红螯螯虾的氨氮耐受力较强, 亚硝酸盐耐受力强于其他淡水虾类, 而弱于海水虾类。红螯螯虾幼虾的氨氮和亚硝酸盐的 SC 分别为 8.80 和 $2.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 亚成虾的氨氮和亚硝酸盐的 SC 分别为 16.77 和 $3.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SC 相对较高, 实际养殖状态下远低于 SC, 但在养殖过程中也应尽量控制氨氮和亚硝酸盐的含量, 以防慢性胁迫带来的不良影响。此外, $2 \sim 3 \text{ cm}$ 的幼虾是目前放塘的常用规格, 幼虾的耐受力相对较弱, 在养殖前期应注意加强水质调控、稳定水质, 以免环境因子的剧烈变化而导致的胁迫毒害作用。

参考文献

- 陈孝煊, 吴志新, 熊波, 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, 22(1): 14-16.
- 胡贤德, 孙成波, 蔡鹤翔, 王平, 黄海立, 古文光, 2009. 不同盐度条件下氨氮对斑节对虾的毒性试验. 广西科学, 16(2): 206-209.
- 胡义波, 王玥, 姜乃澄, 2005. 氨态氮、亚硝态氮对罗氏沼虾血细胞及超微结构的影响. 浙江大学学报(理学版), 32(6): 691-697.
- 黄翔鸽, 李长玲, 郑莲, 刘楚吾, 周洁, 2006. 亚硝酸盐氮对凡纳滨对虾毒性和抗病相关因子影响. 水生生物学报, 30(4): 466-471.
- 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.
- 梁俊平, 李健, 李吉涛, 刘萍, 戴芳钰, 刘德月, 2012. 氨氮对脊尾白虾幼虾和成虾的毒性试验. 水产科学, 31(9): 526-529.
- 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(自然科学版), 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(自然科学版), 2(11): 64-66.
- 罗文, 赵云龙, 王群, 顾志敏, 徐谷星, 刘启文, 2004. 光照对红螯螯虾繁殖性能及其受精卵卵质的影响. 水产学报, 28(6): 675-681.
- 彭自然, 臧维玲, 高杨, 江敏, 徐桂荣, 丁福江, 2004. 氨和亚硝酸盐对凡纳滨对虾幼虾的毒性影响. 上海水产大学学报, 13(3): 274-278.
- 孙国铭, 汤建华, 仲霞铭, 2002. 氨氮和亚硝酸氮对南美白对虾的毒性研究. 水产养殖(1): 22-24.
- 王龙, 郝志敏, 王晶, 2011. 两种溶氧条件下亚硝酸盐和氨氮对罗氏沼虾毒性比较的研究. 饲料与畜牧: 新饲料(8): 12-16.
- 吴志新, 陈孝煊, 刘小玲, 梅晓华, 陈喜群, 2000. 不同光周期对红螯螯虾繁殖及生长的影响. 水利渔业, 30(3): 4-5.
- 冼健安, 钱坤, 郭慧, 苗玉涛, 王安利, 王冬梅, 2014. 氨氮对虾类毒性影响的研究进展. 饲料工业(22): 52-58.
- 冼健安, 张秀霞, 郭慧, 王冬梅, 王安利, 2016. 亚硝酸盐胁迫对罗氏沼虾血细胞及其抗氧化酶活力的影响. 生物安全学报, 25(4): 300-307.
- 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.
- 赵云龙, 孟凡丽, 陈立侨, 顾志敏, 徐谷星, 刘启文, 2000. 红螯螯虾繁殖习性的研究. 动物学杂志, 35(5): 5-9.
- 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(自然科学版), 10(23): 55-59.
- BARBIERI E, 2010. Acute toxicity of ammonia in white shrimp (*Litopenaeus schmitti*) (Burkenroad, 1936, Crustacea) at different salinity levels. *Aquaculture*, 306: 329-333.
- CHAND R K, SAHOO P K, 2006. Effect of nitrite on the immune response of freshwater prawn *Macrobrachium malcolmsonii* and its susceptibility to *Aeromonas hydrophila*. *Aquaculture*, 258(1/2/3/4): 150-156.
- CHEN J C, LEE Y, 1997. Effects of nitrite on mortality, ion regulation and acid-base balance of *Macrobrachium rosenbergii* at different external chloride concentrations. *Aquatic Toxicology*, 39(3/4): 291-305.
- CHEN J C, LIN C Y, 1991. Lethal effects of ammonia and nitrite

- on *Penaeus penicillatus* juveniles at two salinity levels. *Comparative Biochemistry and Physiology C*, 100(3): 477–482.
- CHEN J C, LIU P C, LEI S C, 1990a. Toxicities of ammonia and nitrite to *Penaeus monodon* adolescents. *Aquaculture*, 89(2): 127–137.
- CHEN J C, TING Y Y, LIN J N, LIN M N, 1990b. Lethal effects of ammonia and nitrite on *Penaeus chinensis* juveniles. *Marine Biology*, 107(3): 427–431.
- CHENG S Y, CHEN J C, 1999. Hemocyanin oxygen affinity, and the fractionation of oxyhemocyanin and deoxyhemocyanin for *Penaeus monodon* exposed to elevated nitrite. *Aquatic Toxicology*, 45(1): 35–46.
- KIR M, KURLU M, EROLDogan O T, 2004. Effects of temperature on acute toxicity of ammonia to *Penaeus semisulcatus* juveniles. *Aquaculture*, 241: 479–489.
- LEE W C, CHEN J C, 2004. Nitrogenous excretion and arginase specific activity of kuruma shrimp *Marsupenaeus japonicus* exposed to elevated ambient nitrite. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 308(1): 103–111.
- LIN Y C, CHEN J C, 2003. Acute toxicity of nitrite on *Litopenaeus vannamei* (Boone) juveniles at different salinity levels. *Aquaculture*, 224(1/2/3/4): 193–201.
- MALLASEN M, VALENTI W C, 2006. Effect of nitrite on larval development of giant river prawn *Macrobrachium rosenbergii*. *Aquaculture*, 261(4): 1292–1298.
- SPRAGUE J B, 1971. Measurement of pollutant toxicity to fish. III. Sublethal effects and safe concentrations. *Water Research*, 5: 245–246.
- WANG W N, WANG A L, ZHANG Y J, LI Z H, WANG J X, SUN R Y, 2004. Effects of nitrite on lethal and immune response of *Macrobrachium nipponense*. *Aquaculture*, 232(1/2/3/4): 679–686.
- XIAN J A, WANG A L, CHEN X D, GOU N N, MIAO Y T, LIAO S A, YE C X, 2011. Cytotoxicity of nitrite on haemocytes of the tiger shrimp, *Penaeus monodon*, using flow cytometric analysis. *Aquaculture*, 317: 240–244.

(责任编辑:郭莹)