

刘慧玲,陈荣,王成桂,等.不同盐度条件下氨氮和亚硝酸盐对墨吉明对虾的急性毒性试验[J].江苏农业科学,2019,47(1):155-158.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.01.037

不同盐度条件下氨氮和亚硝酸盐对墨吉明对虾的急性毒性试验

刘慧玲^{1,2},陈荣¹,王成桂¹,杨世平¹,孙成波¹,陆启顺¹,李长玲^{1,2,3}

(1.广东海洋大学水产学院,广东湛江 524088;2.广东省藻类养殖及应用工程技术中心,广东湛江 524088;

3.广东海洋大学深圳研究院,广东深圳 518120)

摘要:为了评估不同盐度条件下氨氮和亚硝酸盐对墨吉明对虾(*Fenneropenaeus merguensis*)的急性毒性,采用半静水生物毒性法进行试验,并计算氨氮和亚硝酸盐的半致死浓度(LC₅₀)和安全浓度(SC)。结果显示,盐度为3.0%、2.5%、2.0%、1.5%、1.0%和0.5%时,氨氮对墨吉明对虾96 h LC₅₀为29.72、29.83、23.48、14.57、11.92、8.49 mg/L,SC为2.97、2.98、2.35、1.46、1.19、0.85 mg/L;盐度为3.0%、2.5%、2.0%、1.5%、1.0%、0.5%时,亚硝酸盐对墨吉明对虾96 h LC₅₀为11.24、20.11、8.60、6.24、2.91、1.05 mg/L,SC为1.12、2.01、0.86、0.62、0.29、0.11 mg/L。结果表明,盐度为2.5%时,氨氮和亚硝酸盐的SC最高,盐度过高或过低,其SC都会降低。在相同盐度条件下,氨氮和亚硝酸盐对墨吉明对虾的毒性随着浓度的升高而增加;在相同氨氮和亚硝酸盐浓度条件下,暴露的时间越长,对墨吉明对虾的毒性也越强。

关键词:氨氮;亚硝酸盐;墨吉明对虾;盐度;半致死浓度;安全浓度

中图分类号:S968.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2019)01-0155-04

近年来,对虾养殖密度不断增加,在对虾高密度养殖系统中,氮污染更加容易积累^[1]。氨氮和亚硝酸盐是水产动物养

殖水环境中最常见的污染物^[2-3]。氨氮是蛋白质代谢过程中的主要产物,一般由对虾直接分泌产生,也会通过水体中残余饵料及动物残肢、水产动物的代谢产物及其粪便等含氮有机物的氨化作用产生,污染养殖水环境,影响水产动物健康成长^[2-5]。亚硝酸盐是氨氮在细菌硝化作用过程或硝酸盐在反硝化作用过程中产生^[5]。在对虾养殖过程中,氨氮和亚硝酸盐的转化受到多种因素的影响,尤其是在对虾高密度养殖的后期,氨氮和亚硝酸盐的含量会积累超标^[6],从而影响对虾的生长、代谢、免疫力和存活^[2-3,7-10]。因此,研究氨氮和亚硝酸盐对不同物种的毒性极为重要,有利于在养殖过程中设定它们的控制上限和控制策略,提高养殖对虾的存活率。

收稿日期:2017-09-19

资助项目:国家自然科学基金(编号:31572606);广东省海洋渔业科技与产业发展专项科技攻关与研发项目(编号:A201508B08);广东省科技计划(编号:2014B02020202014);广东省湛江市科技计划(编号:2015A03030)。

作者简介:刘慧玲(1976—),女,湖南湘乡人,硕士,高级实验师,主要从事水产养殖及水产微生物学研究。E-mail:liuhuilin745@126.com。

通信作者:杨世平,博士,副教授,主要从事虾蟹类健康养殖及水产微生物学研究。E-mail:ysp20010@sina.com。

Aquaculture Nutrition,2013,19(1):84-90.

[11]王朝明,罗莉,张桂众,等.饲料脂肪水平对胭脂鱼生长性能、肠道消化酶活性和脂肪代谢的影响[J].动物营养学报,2010,22(4):969-976.

[12]唐辉旭.不同饵料饲养胭脂鱼幼苗的试验分析[J].怀化学院学报,2010,29(11):65-66.

[13]龚宏伟,蔡春芳,阙林林,等.长江胭脂鱼开口饵料的研究[J].水产科学,2005,24(11):7-9.

[14]叶建生,赵素珍,陈小江,等.不同饵料对胭脂鱼生长和肠道消化酶活性的影响[J].水产科学,2017,36(1):109-112.

[15] Meske C. Fish aquaculture [M]. Oxford: Pergamon Press, 1985:237.

[16]叶建生.密度和温度对沙塘鳢生长影响的研究[J].江苏农业科学,2012(9):210-211.

[17]江仁党.放养密度对虹鳟稚鱼生长的影响[J].水产学杂志,2009,22(4):31-33.

[18]李大鹏,庄平,严安生,等.光照、水流和养殖密度对史氏鲟稚

鱼摄食、行为和生长的影响[J].水产学报,2004,28(1):54-61.

[19]宋志飞,温海深,李吉方,等.养殖密度对流水养殖系统中俄罗斯鲟幼鱼生长的影响[J].水产学报,2014,38(6):835-842.

[20]任华,蓝泽桥,王一明,等.循环水养殖系统中放养密度对杂交鲢仔鱼摄食行为、生长和存活的影响[J].渔业现代化,2013,40(2):12-16.

[21]谢小军,孙儒泳.影响鱼类代谢的主要生态因素的研究进展[J].西南师范大学学报(自然科学版),1989,14(4):141-149.

[22]Poston H A, Williams R C. Interrelations of oxygen concentration, fish density, and performance of atlantic salmon in an ozonated water reuse system[J]. Progressive Fish-Culturist, 1988, 50(2):69-76.

[23]许勤智,周波,陈娜娜,等.温度和体质量对胭脂鱼种耗氧率的影响[J].广东海洋大学学报,2014,34(1):37-41.

[24]Aguiar L H, Kalinin A K, Rantin F T. The effects of temperature on the cardiorespiratory function of the Neotropical fish *Piaractus mesopotamicus* [J]. Therm Biology, 2002, 27(4):299-308.

墨吉明对虾 (*Fenneropenaeus merguensis*) 属节肢动物门 (Arthropoda) 甲壳动物亚门 (Crustacea) 软甲纲 (Malacostraca) 对虾科 (Penaeidae) 明对虾属 (*Fenneropenaeus*), 俗称大明虾、大虾^[11]。墨吉明对虾为一种经济、暖水性的对虾, 具有生长较快、资源丰富、肉质美、抗病性较强等优点^[12], 备受养殖企业和研究者关注。近年来开展了墨吉明对虾胚胎发育、代谢、环境适应性、毒性试验和疾病防治等研究^[4,13-17]。氨氮和亚硝酸盐浓度对墨吉明对虾的毒性及对其免疫因子的影响已有研究^[4,15]。但未涉及到不同盐度条件下氨氮和亚硝酸盐的毒性研究。氨氮和亚硝酸盐在不同盐度条件下对凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 和南方滨对虾 (*L. schmitti*) 的急性毒性已有研究报道, 并证明盐度对氨氮和亚硝酸盐的毒性有较大的影响^[7,18-20]。本研究通过使用半静水生物毒性试验的方法, 探讨不同盐度条件的情况下, 氨氮和亚硝酸盐对墨吉明对虾的急性毒性作用, 为墨吉明对虾的水环境调控和健康养殖提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2016 年 7—8 月在广东海洋大学东海岛海洋生物研究基地内完成。试验所用的墨吉明对虾来自于广东海洋大学东海岛海洋生物研究基地, 挑选体色正常、活力好的同一批对虾进行试验, 对虾平均体长为 (4.0 ± 0.5) cm。试验前, 通过盐度渐变将试验对虾分别驯化到试验所需的盐度, 然后保持盐度不变, 暂养 3 d。不同盐度的试验用水为经沙滤、沉淀, 再用有效氯浓度为 20 g/m³ 的强氯精消毒、充气和暴晒处理后的天然海水和地下水配制而成。氯化铵和亚硝酸钠均为分析纯, 分别用于调节氨氮和亚硝酸盐的浓度 (以氮计)。试验水体 pH 值为 8.0, 水温为 28 ℃。

1.2 试验方法

分别在盐度为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0% 的条件下, 设置不同浓度的氨氮和亚硝酸盐进行试验。根据预试验的结果, 把氨氮和亚硝酸盐以等对数间距设置 5 个浓度组。盐度为 0.5%、1.0%、1.5% 条件下氨氮浓度组为 10.00、15.14、22.39、33.88、50.12 mg/L; 盐度为 2.0%、2.5%、3.0% 条件下为 17.46、25.00、35.81、51.29、73.45 mg/L。盐度为 0.5% 和 1.0% 条件下亚硝酸盐浓度组为 5.01、7.94、12.30、19.50、30.20 mg/L; 盐度为 1.5% 条件下为 7.94、12.30、19.50、30.20、47.86 mg/L; 盐度为 2.0%、2.5% 和 3.0% 的条件下为 10.00、16.22、26.30、42.66、69.18 mg/L。试验在 16 L 的塑料桶中进行, 装水为 8 L, 放虾 10 尾, 每个试验组设 3 个平行, 每个盐度梯度组设 1 个对照组。试验中每 24 h 换水 1 次, 全程不充气, 并记录试验对虾的存活情况, 及时清理出死虾。判断对虾死亡标准是用玻棒触碰时没有任何反应和心脏停止跳动即视为已死亡。依据周永欣等的方法进行急性毒性试验^[21]。

1.3 半致死浓度和安全浓度

根据试验结果, 按线性回归法可计算出亚硝酸盐和氨氮的 24、48、72、96 h 时段的半致死浓度 (LC₅₀), 再由公式 SC = 0.1 × [96 h (LC₅₀)] , 求出各时段的的安全浓度 (SC)。

2 结果与分析

2.1 氨氮对墨吉明对虾的急性毒性

由表 1 可知, 在相同盐度的条件下, 随氨氮的浓度增加, 墨吉明对虾的死亡率也增加; 在相同氨氮浓度的条件下, 试验时间越长, 墨吉明对虾的死亡率也会越高。氨氮浓度分别为 17.46、25.00、35.81、51.29、73.45 mg/L, 盐度为 2.5% 时, 墨吉明对虾的 96 h 死亡率分别为 33.33%、46.67%、60.00%、73.33%、93.33%, 而在盐度为 2.0% 时, 墨吉明对虾的 96 h 死亡率分别为 36.67%、53.33%、80.00%、100.00% 和 100.00%。盐度为 0.5% 的条件下, 在氨氮浓度为 22.39、33.88、50.12 mg/L 时, 墨吉明对虾的 96 h 死亡率均为 100%。

表 1 不同盐度条件下氨氮对墨吉明对虾的急性毒性

盐度 (%)	氨氮浓度 (mg/L)	死亡率 (%)			
		24 h	48 h	72 h	96 h
3.0	17.46	10.00	20.00	23.33	26.67
	25.00	3.33	16.67	26.67	36.67
	35.81	20.00	46.67	86.67	90.00
	51.29	53.33	93.33	100.00	100.00
	73.45	90.00	100.00	100.00	100.00
2.5	17.46	3.33	13.33	30.00	33.33
	25.00	16.67	23.33	40.00	46.67
	35.81	13.33	33.33	46.67	60.00
	51.29	30.00	53.33	70.00	73.33
	73.45	70.00	80.00	86.67	93.33
2.0	17.46	0.00	20.00	33.33	36.67
	25.00	13.33	30.00	43.33	53.33
	35.81	33.33	50.00	56.67	80.00
	51.29	66.67	93.33	100.00	100.00
	73.45	96.67	100.00	100.00	100.00
1.5	10.00	0.00	6.67	23.33	36.67
	15.14	10.00	20.00	36.67	50.00
	22.39	16.67	36.67	63.33	83.33
	33.88	40.00	60.00	80.00	96.67
	50.12	73.33	80.00	100.00	100.00
1.0	10.00	6.67	13.33	30.00	43.33
	15.14	20.00	26.67	40.00	56.67
	22.39	26.67	56.67	73.33	93.33
	33.88	40.00	66.67	90.00	100.00
	50.12	76.67	90.00	100.00	100.00
0.5	10.00	13.33	20.00	36.67	50.00
	15.14	20.00	36.67	43.33	66.67
	22.39	46.67	80.00	93.33	100.00
	33.88	63.33	86.67	96.67	100.00
	50.12	83.33	100.00	100.00	100.00

2.2 不同盐度下氨氮对墨吉明对虾的半致死浓度 (LC₅₀) 和安全浓度 (SC)

由表 2 可知, 在 24、48、72、96 h 内, 盐度为 3.0% 时, 氨氮对墨吉明对虾的半致死浓度为 29.72 ~ 49.46 mg/L; 盐度为 2.5% 时, 氨氮对墨吉明对虾的 LC₅₀ 为 29.83 ~ 59.70 mg/L; 盐度为 2.0% 时, 氨氮对墨吉明对虾的 LC₅₀ 为 23.48 ~ 45.10 mg/L; 盐度为 1.5% 时, 氨氮对墨吉明对虾的 LC₅₀ 为 14.57 ~ 38.30 mg/L; 盐度为 1.0% 时, 氨氮对墨吉明对虾的 LC₅₀ 为 11.92 ~ 35.80 mg/L; 盐度为 0.5% 时, 氨氮对墨吉明

对虾的 LC_{50} 为 8.49 ~ 28.81 mg/L。可以看出,在盐度为 0.5% ~ 2.5% 时,氨氮对墨吉明对虾的 LC_{50} 随着盐度升高而升高。在盐度为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0% 和 2.5% 时,氨氮对墨吉明对虾的 SC 分别为 0.85、1.19、1.46、2.35、2.98 mg/L。在盐度为 0.5% ~ 2.5% 的范围内,氨氮对墨吉明对虾的 SC 也随着盐度的升高而升高。然而,当盐度为 3.0% 时,氨氮对墨吉明对虾的 LC_{50} 和 SC 均低于盐度为 2.5% 时,说明盐度 2.5% 应该在墨吉明对虾最适盐度范围内。

表 2 不同盐度条件下氨氮对墨吉明对虾的半致死浓度 (LC_{50}) 和安全浓度 (SC)

盐度 (%)	LC_{50} (mg/L)				SC (mg/L)
	24 h	48 h	72 h	96 h	
0.5	28.81	20.16	16.05	8.49	0.85
1.0	35.80	25.97	18.14	11.92	1.19
1.5	38.30	31.30	20.97	14.57	1.46
2.0	45.10	35.52	29.56	23.48	2.35
2.5	59.70	48.46	36.14	29.83	2.98
3.0	49.46	37.76	32.13	29.72	2.97

2.3 亚硝酸盐对墨吉明对虾的急性毒性

由表 3 可知,同氨氮的急性毒性试验结果相似,在相同盐度的条件下,随亚硝酸盐的浓度增加,墨吉明对虾的死亡率也会增加;在相同亚硝酸盐浓度的条件下,试验时间越长,墨吉明对虾的死亡率也会越高。亚硝酸盐浓度分别为 10.00、16.22、26.30、42.66、69.18 mg/L,盐度为 2.5% 时,墨吉明对虾的 96 h 死亡率分别为 33.33%、50.00%、66.67%、86.67%、100.00%,低于盐度为 2.0% 和 3.0% 时的 96 h 死亡率。

2.4 不同盐度下亚硝酸盐对墨吉明对虾的半致死浓度 (LC_{50}) 和安全浓度 (SC)

由表 4 可知,盐度为 3.0%、2.5%、2.0%、1.5%、1.0%、0.5% 时,亚硝酸盐对墨吉明对虾的 96h LC_{50} 分别为 11.46、18.26、8.60、6.24、2.91、1.05 mg/L,SC 分别为 1.15、1.83、0.86、0.62、0.29、0.11 mg/L。盐度为 0.5% ~ 2.5% 时,亚硝酸盐在时间 24、48、72、96 h 的 LC_{50} 和 SC 均随着盐度的升高而升高。然而,当盐度为 3.0% 时,亚硝酸盐对墨吉明对虾的 LC_{50} 和 SC 均低于盐度为 2.5% 时,再次说明盐度 2.5% 应该在墨吉明对虾最适盐度范围内。

3 讨论

3.1 不同盐度条件下氨氮和亚硝酸盐对墨吉明对虾的急性毒性作用

关于氨氮和亚硝酸盐对对虾的 LC_{50} 的研究主要集中在同一盐度水平进行。而对虾养殖生产中,不同地区、不同养殖池,甚至同一养殖池的不同时期,其养殖盐度往往是不同的。本试验结果显示,在 0.5% ~ 2.5% 的盐度范围下,氨氮和亚硝酸盐对墨吉明对虾 24、48、72、96 h 的 LC_{50} 和 SC 也随着盐度升高而升高。其变化规律大体与其他品种的毒性试验结果^[5,18-20,22-23]相似。说明在一定盐度范围内,随着盐度的下降,水生动物对氨氮和亚硝酸盐的耐受性降低。Barbieri 的研究也发现,盐度由 2.0% 变为 0.5% 时,氨氮对南方滨对虾的 LC_{50} 和 SC 均降低^[18]。当盐度由 2.5% 变为 1.5% 时,氨氮对凡纳滨对虾的 SC 也降低^[19],亚硝酸盐对凡纳滨对虾的毒性

表 3 不同盐度条件下亚硝酸盐对墨吉明对虾的急性毒性

盐度 (%)	亚硝酸盐浓度 (mg/L)	死亡率 (%)			
		24 h	48 h	72 h	96 h
3.0	10.00	13.33	26.67	40.00	43.33
	16.22	6.67	30.00	50.00	60.00
	26.30	30.00	43.33	70.00	93.33
	42.66	40.00	60.00	96.67	100.00
	69.18	73.33	76.67	100.00	100.00
2.5	10.00	3.33	10.00	26.67	33.33
	16.22	16.67	30.00	40.00	50.00
	26.30	23.33	43.33	46.67	66.67
	42.66	33.33	56.67	70.00	86.67
	69.18	63.33	73.33	93.33	100.00
2.0	10.00	26.67	30.00	43.33	46.67
	16.22	26.67	40.00	46.67	60.00
	26.30	40.00	46.67	56.67	83.33
	42.66	46.67	60.00	80.00	100.00
	69.18	70.00	76.67	90.00	100.00
1.5	7.94	13.33	23.33	40.00	46.67
	12.30	23.33	33.33	46.67	60.00
	19.50	30.00	43.33	63.33	73.33
	30.20	43.33	60.00	70.00	83.33
	47.86	56.67	70.00	80.00	96.67
1.0	5.01	0.00	6.67	30.00	50.00
	7.94	16.67	33.33	50.00	63.33
	12.30	10.00	40.00	53.33	73.33
	19.50	36.67	53.33	76.67	93.33
	30.20	50.00	73.33	100.00	100.00
0.5	5.01	20.00	33.33	53.33	56.67
	7.94	30.00	46.67	53.33	60.00
	12.30	36.67	50.00	63.33	76.67
	19.50	53.33	60.00	80.00	90.00
	30.20	60.00	76.67	96.67	100.00

表 4 不同盐度条件下亚硝酸盐对墨吉明对虾的半致死浓度 (LC_{50}) 和安全浓度 (SC)

盐度 (%)	LC_{50} (mg/L)				SC (mg/L)
	24 h	48 h	72 h	96 h	
0.5	20.90	12.95	4.67	1.05	0.11
1.0	27.91	18.36	10.56	2.91	0.29
1.5	39.02	26.82	14.36	6.24	0.62
2.0	43.38	32.01	17.99	8.60	0.86
2.5	55.77	39.71	28.11	18.26	1.83
3.0	48.18	35.86	15.46	11.46	1.15

增加了 147% ~ 249%^[5]。对于南方滨对虾来说,盐度从 3.5% 降到 0.5% 时,亚硝酸盐的 24、48、72、96 h 毒性分别增加了 33.4%、46.7%、69.2%、103.3%^[20]。在一定的盐度范围内,盐度降低,氨氮和亚硝酸盐的毒性增加,可能与盐度影响到对虾的呼吸、免疫、代谢和渗透压有关^[4,15,18-20,24-25]。因此,养殖生产者在考虑氨氮和亚硝酸盐的毒性时,必须将盐度作为一个重要因素进行考虑。

3.2 相同盐度条件下氨氮对墨吉明对虾的急性毒性作用

从本试验的研究数据不难看出,在相同盐度的条件下,氨氮对墨吉明对虾的毒性随着氨氮浓度升高而增强,在斑节对虾 (*Penaeus monodon*)^[22]、日本囊对虾 (*Marsupenaeus*

japonicus)^[5]、南方滨对虾^[18,20]、凡纳滨对虾^[5,19],以及其他水生动物,如罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)^[26]、斜带石斑鱼(*Epinephelus coioides*)^[27]的毒性试验结果很相似。在相同盐度条件下,亚硝酸盐对南方滨对虾^[20]和凡纳滨对虾^[5]的毒性也随着亚硝酸盐浓度升高而增强,本试验中亚硝酸盐对墨吉明对虾的毒性试验也有类似的结果。

氨氮和亚硝酸盐的毒性也随着处理时间的延长而增加。在盐度为 2.5% 时,氨氮对墨吉明对虾的 24、48、72、96 h LC₅₀ 分别为 59.70、48.46、36.14、29.83 mg/L,其 48、72、96 h LC₅₀ 分别比 24 h 时下降了 18.83%、39.46%、50.03%。Barbieri 研究结果显示,在盐度为 2.0% 时,氨氮对南方纳滨对虾 48、72、96 h LC₅₀ 分别比 24 h 时下降了 35.34%、53.50%、57.20%^[18],其变化幅度大于墨吉明对虾。本研究在盐度为 2.5% 时,亚硝酸盐对墨吉明对虾的 24、48、72、96 h LC₅₀ 分别为 55.77、39.71、28.11、18.26 mg/L,其 48、72、96 h LC₅₀ 分别比 24 h 时下降了 28.80%、49.60%、67.26%。在盐度为 2.0% 时,亚硝酸盐对南方滨对虾的 48、72、96 h LC₅₀ 分别比 24 h 时下降了 36.34%、45.86%、62.01%^[20]。说明在相同盐度的条件下,氨氮和亚硝酸盐的浓度越高,对墨吉明对虾的毒性越强;在相同亚硝酸盐浓度的条件下,暴露的时间越长,对墨吉明对虾的毒性也越强。

参考文献:

- [1] Fríaspericueta M G, Harfushmelendez M, Osunalópez J I, et al. Acute toxicity of ammonia to juvenile shrimp *Penaeus vannamei* Boone[J]. Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology, 1999, 62(5): 646–652.
- [2] 冼健安, 钱 坤, 郭 慧, 等. 氨氮对虾类毒性影响的研究进展[J]. 饲料工业, 2014, 35(22): 52–58.
- [3] 寇红岩, 冼健安, 郭 慧, 等. 亚硝酸盐对虾类毒性影响的研究进展[J]. 海洋科学, 2014, 38(2): 107–115.
- [4] 钱佳慧, 栗志民, 刘建勇, 等. 氨氮对墨吉明对虾的急性毒性及其免疫因子的影响[J]. 应用海洋学学报, 2016, 35(2): 211–216.
- [5] Lin Y C, Chen J C. Acute toxicity of nitrite on *Litopenaeus vannamei*, (Boone) juveniles at different salinity levels[J]. Aquaculture, 2003, 224(1/2/3/4): 193–201.
- [6] 刘加慧, 傅学丽, 刘建勇. 2 种养殖模式下凡纳滨对虾池塘水质理化因子的变化特征[J]. 广东海洋大学学报, 2017, 37(4): 113–117.
- [7] Chen J C, Lin C Y. Effects of ammonia on growth and molting of *Penaeus monodon* juveniles [J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part C Comparative Pharmacology, 1992, 101(3): 453–458.
- [8] Cui Y T, Ren X Y, Li J, et al. Effects of ammonia – N stress on metabolic and immune function via the neuroendocrine system in *Litopenaeus vannamei*[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2017, 64: 270–275.
- [9] Noor – Hamid S, Fortes R D, Parado – Estepa F. Effect of pH and ammonia on survival and growth of the early larval stages of penaeus monodon, fabricius[J]. Aquaculture, 1994, 125(1/2): 67–72.
- [10] Campos B D, Furtado P S, Dincao F, et al. The effect of ammonia, nitrite, and nitrate on the oxygen consumption of juvenile pink shrimp *Farfantepenaeus brasiliensis* (Latreille, 1817) (Crustacea: Decapoda) [J]. Journal of Applied Aquaculture, 2014, 26(1): 94–101.
- [11] 梁华芳. 虾蟹类生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013: 160.
- [12] 麦贤杰, 黄伟健, 叶富良, 等. 对虾健康养殖学[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [13] 杨世平, 王成桂, 黄海立, 等. 环境温度和盐度对墨吉明对虾 (*Fenneropenaeus merguensis*) 胚胎发育的影响[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(4): 817–822.
- [14] 孙成波, 冯英杰, 王 刚, 等. 多因子对墨吉明对虾氮磷代谢的影响[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2014, 33(5): 394–399.
- [15] 栗志民, 钱佳慧, 刘建勇, 等. 亚硝酸盐对墨吉明对虾的毒性及其免疫因子的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(21): 160–163.
- [16] 杨世平, 孙成波, 吴颖豪, 等. 墨吉明对虾幼虾对盐度和温度的适应性研究[J]. 大连海洋大学学报, 2015, 30(3): 261–265.
- [17] Patil P K, Gopal C, Panigrahi A, et al. Oral administration of formalin killed *Vibrio anguillarum* cells improves growth and protection against challenge with *Vibrio harveyi* in banana shrimp [J]. Letters in Applied Microbiology, 2014, 58(3): 213–218.
- [18] Barbieri E. Acute toxicity of ammonia in white shrimp (*Litopenaeus schmitti*) (Burkenroad, 1936, Crustacea) at different salinity levels [J]. Aquaculture, 2010, 306(1/2/3/4): 329–333.
- [19] Lin Y C, Chen J C. Acute toxicity of ammonia on *Litopenaeus vannamei* Boone juveniles at different salinity levels[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2001, 259(1): 109–119.
- [20] Barbieri E, Bondioli A V, Melo C B, et al. Nitrite toxicity to *Litopenaeus schmitti* (Burkenroad, 1936, Crustacea) at different salinity levels[J]. Aquaculture Research, 2016, 47(4): 1260–1268.
- [21] 周永欣, 章宗涉. 水生生物毒性试验方法[M]. 北京: 农业出版社, 1989.
- [22] 胡贤德, 孙成波, 蔡鹤翔, 等. 不同盐度条件下氨氮对斑节对虾的毒性试验[J]. 广西科学, 2009, 16(2): 206–209.
- [23] 胡贤德, 孙成波, 王 平, 等. 不同盐度条件下亚硝酸氮对斑节对虾的毒性影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2009, 40(1): 103–106.
- [24] Chen J C, Nan F H. Changes of oxygen consumption ammonia – N excretion by *Penaeus chinensis* Osbeck at different temperature and salinity levels [J]. Journal of Crustacean Biology, 1993, 13(4): 706–712.
- [25] Silva E, Calazans N, Soares M, et al. Effect of salinity on survival, growth, food consumption and haemolymph osmolality of the pink shrimp *Farfantepenaeus subtilis* (Perez – Farfante, 1967) [J]. Aquaculture, 2010, 306(1/2/3/4): 352–356.
- [26] 臧维玲, 沈林华. 亚硝酸盐和氨对罗氏沼虾幼体的毒性[J]. 上海水产大学学报, 1996, 5(1): 15–22.
- [27] 郑乐云. 氨氮和亚硝酸盐对斜带石斑鱼苗的急性毒性效应[J]. 海洋科学, 2012, 36(5): 81–86.