

林俊良,张亚丽,李素霞. 外源铜胁迫下茅尾海南美白对虾营养成分变化分析[J]. 江苏农业科学,2018,46(23):183-186.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.23.047

# 外源铜胁迫下茅尾海南美白对虾营养成分变化分析

林俊良,张亚丽,李素霞

(钦州学院资源与环境学院,广西钦州 535011)

**摘要:**通过设置不同的外源铜浓度(0、0.10、0.25、0.50 mg/L  $\text{Cu}^{2+}$ ),分析探讨随外源铜浓度的变化,茅尾海南美白对虾体内铜累积率、氨基酸、灰分、钙、磷、铁等营养成分的变化情况,为茅尾海对虾的安全养殖与重金属污染诊断提供科学的依据。研究表明,当外源 Cu 的浓度为 0.10 mg/L 时,对虾体内 Cu 的富集累积率为 98.71%;当外源 Cu 的浓度为 0.25 mg/L 时,累积率为 99.21%;当外源 Cu 的浓度为 0.50 mg/L 时,累积率为 99.50%。随着外源 Cu 浓度的提高,非必需氨基酸、必需氨基酸总体呈下降的趋势,其中丝氨酸、谷氨酸活性稍有增加,天门冬氨酸、甘氨酸、丙氨酸、脯氨酸等营养成分的活性受到抑制,肌苷酸含量呈下降趋势。外源 Cu 浓度与灰分含量和 Fe、Ca、P 含量分别呈显著负相关、高度负相关、显著负相关和微负相关关系。总体来说,外源 Cu 浓度为 0.10 mg/L 时,对虾体内 Cu 的累积速率最快,氨基酸、Fe 的营养成分最易流失;受外源 Cu 环境影响程度为  $P > \text{肌苷酸} > \text{灰分} > \text{Fe} > \text{Ca}$ 。

**关键词:**茅尾海南美白对虾;外源铜;氨基酸;灰分;Fe;Ca;P

**中图分类号:** S917 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)23-0183-04

人们对食品品质要求日益提高,对虾作为钦州四大海产之一,其食品安全与营养成分倍受社会各界关注。茅尾海位于广西钦州湾海域南部,面积约为 134 km<sup>2</sup>,海岸线绵延曲折,水深浪静,呈倒口袋状,口窄内宽,是一个半封闭海湾。该海域属南亚热带海洋性气候,年均气温约为 22.1 ℃,水温可保持在 17 ℃ 以上,为对虾的养殖提供优良的自然环境。其对虾以肉质鲜美、营养丰富而著名。而近年来随着钦州市的养殖、工业、生活、采矿等产业的发展,其排污水顺着茅岭江、钦江从北面汇入茅尾海,不仅在一定程度上对茅尾海的海洋环境造成污染,给对虾养殖也带来威胁;此外在对虾养殖过程中,通过向对虾塘泼洒  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (五水硫酸铜)溶液进行杀菌灭藻。虾农由于缺乏专业知识,不能适当合理地使用  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  溶液,无形中加剧外源铜对对虾养殖的风险。铜在生物体新陈代谢中起着举足轻重的作用,铜离子较强的氧化还原电势和配位共价的能力,使其成为细胞内多种蛋白质和酶的重要成分;但高浓度的铜离子会改变生物体细胞环境的氧化还原状态,难降解的特点使其对生物体的生存带来危害。加上对虾通过食物链的放大作用,将在短期内对重金属的富集传递给消费者,对消费者的健康造成危害。

南美白对虾又称凡纳滨对虾,与中国对虾、斑节对虾被誉为养殖产量最高的三大优良虾种。南美白对虾具有对环境的适应性强、成长速度快、抗病能力强、对营养需求低、抗盐性强(0%~6%)等特点。南美白对虾主要由海水和淡水养殖,研究中发现,海水养殖对虾感官评价总体得分高于淡水养殖,在鲜美、甜味方面海水养殖对虾优于淡水养殖,灰分也相对较

高<sup>[1]</sup>。茅尾海南美白对虾的养殖特点是主要在咸淡水区域养殖,江河水与海水交汇处特殊的水流运动、气候特点及养殖环境使其口感与营养成分具有自身的特色。在目前关于对虾的研究中,发现在饲料中添加铜,对南美白对虾生长、体内铜含量、生理机能等均有不同程度的影响。饲料中适当添加微量元素可以提高凡纳滨对虾生长率<sup>[2]</sup>,随饲料铜水平的增加,增质量率、饲料效率、特定增长率先升高后降低<sup>[3]</sup>,添加不同水平的硫酸铜,不仅对南美白对虾生长影响显著,而且能影响对虾的免疫能力,且铜最主要积累在肝胰腺<sup>[4]</sup>。虾肝胰腺中铜含量随硫酸铜、蛋氨酸铜添加浓度的提高及喂养时间的延长而显著增加<sup>[5-6]</sup>。低浓度的铜有助于对虾的生长<sup>[7]</sup>。相同浓度有机铜离子的生物利用率优于无机铜<sup>[8]</sup>。王维娜等研究表明,在水环境中添加重金属元素对对虾的影响表现为,水环境中外加低浓度的  $\text{Cu}^{2+}$  (24 μg/L)时可提高日本沼虾摄食率,高浓度时可降低其摄食率<sup>[9]</sup>。为进一步比较分析水环境和饲料中重金属对南美白对虾的影响,分别在饲料与海水中添加铅(Pb),喂养任一浓度饲料时,海水中 Pb 浓度为 0.001 5、0.008 0、0.046 6 mg/L 时凡纳滨对虾肌肉、外骨骼和肝胰腺组织中 Pb 含量均小于限量值 0.5 mg/kg;而在 Pb 浓度为 0.230 2 mg/L 的海水中,南美白对虾各组织中 Pb 的累积量随着投喂饲料浓度的增大而高于限量值的时间越早<sup>[10]</sup>。养殖水域中某重金属达到一定浓度时,水域中的重金属与投放饲料中该重金属在凡纳滨对虾体内产生叠加效应;而当水域中该重金属未达到一定浓度时,在饲料中重金属含量的不同并不能对对虾体内重金属含量的累积起关键作用。现有研究中,南美白对虾对外源重金属的吸附积累研究成果较丰富,但外源 Cu 对其氨基酸等营养成分影响的研究较少。本研究选取茅尾海对虾养殖区为研究区域,以重金属 Cu 为变化因子,初步探讨其不同浓度下对虾体内氨基酸、灰分、铁(Fe)、钙(Ca)等成分的变化情况。

收稿日期:2017-08-13

基金项目:广西北部湾海洋生物多样性养护重点实验室项目(编号:2015ZD02、2015ZC05);钦州学院科研项目(编号:2014XJKY-17B)。

作者简介:林俊良(1986—),女,广西贵港人,硕士,讲师,主要从事海洋生态环境演变与管理研究。E-mail:linjunliang1986@163.com。

1 材料与方法

1.1 试验用水与试剂

供试用水为实验室制备的纯水,试剂为  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、海盐。

1.2 试验样品与器材

供试样品为茅尾海南美白对虾,器材为 4 个中型泡沫箱、8 孔增氧机、取暖灯。对虾样品各项指标见表 1。

表 1 茅尾海南美白对虾营养成分

营养成分	含量	营养成分	含量
天门冬氨酸(%)	7.37 ± 0.12	异亮氨酸(%)	3.10 ± 0.06
丝氨酸(%)	2.87 ± 0.15	亮氨酸(%)	5.92 ± 0.13
谷氨酸(%)	12.27 ± 0.29	苯丙氨酸(%)	3.65 ± 0.02
甘氨酸(%)	8.86 ± 0.33	赖氨酸(%)	6.50 ± 0.23
丙氨酸(%)	5.00 ± 0.17	组氨酸含量(%)	1.69 ± 0.03
胱氨酸(%)	1.03 ± 0.26	肌苷酸含量(μg/g)	2 297.29 ± 35.16
酪氨酸(%)	3.12 ± 0.03	灰分含量(%)	6.15 ± 1.02
脯氨酸(%)	1.56 ± 0.05	磷(P)含量(mg/kg)	11 192.50 ± 314.57
精氨酸(%)	7.46 ± 0.02	铁含量(mg/kg)	104.21 ± 5.77
苏氨酸(%)	3.16 ± 0.11	钙含量(mg/kg)	1 462.00 ± 23.76
缬氨酸(%)	3.18 ± 0.07	铜含量(mg/kg)	15.27 ± 0.25
蛋氨酸(%)	1.93 ± 0.03		

注:样品 A 为没有经过试验直接剥壳去头去尾的鲜虾烘干样(同批鲜虾中随机抽取 4 组,每组 8 尾)。

1.3 试验设计

试验于 2016 年 11 月进行,选取钦江与茅尾海交汇处的某南美白对虾养殖基地。在盐度配制方面,相关研究认为,盐度高低对南美白对虾的存活、生长及营养成分均有不同程度的影响。中等盐度(2‰、1.8‰)时,南美白对虾生长最好,存活率最高<sup>[11-12]</sup>。茅尾海对虾养殖区位于钦江、茅岭江与茅尾海交汇处,为还原模拟茅尾海咸淡水养殖环境,配制 4 组浓度为 0.5% 的盐水,用于配制 A<sub>0</sub>、A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub> 4 组浓度分别为 0、0.10、0.25、0.50 mg/L 的 Cu<sup>2+</sup> 溶液,每组设 3 个平行样。温度保持在(28 ± 1)℃、充氧 6 h 后,保持充氧通风状态,每箱放入体长约为 20 cm 的南美白对虾 35 尾,养殖 3 d 后取出,剥壳去头去尾,立即放入烘干箱,恒温 105℃ 烘至恒质量,封口袋封装、待检。

1.4 试验方法

用高效液相色谱法分析南美白对虾的氨基酸、肌苷酸含量;利用电子耦合等离子光谱法分析重金属铜、钙、铁与无机元素磷(P)含量。用灰化剂灰化法测灰分。

1.5 统计分析

数据以“平均值 ± 标准误”表示,相关图表均用 Excel 制作。

2 结果与分析

2.1 南美白对虾体内 Cu 的积累变化

在本试验中,通过改变对虾养殖溶液环境中 Cu 的浓度,观察其体内 Cu 的积累情况。表 2 中,样品 A 为没有经过试验直接剥壳去头去尾的鲜虾烘干样,A<sub>0</sub> 组为 0.5% 盐水养殖 3 d 的对虾样品,A<sub>1</sub> 组为 0.1 mg/L  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  与 0.5% 盐水混合溶液养殖 3 d 的对虾烘干样品,A<sub>2</sub> 组为 0.25 mg/L

$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  与 0.5% 盐水混合溶液养殖 3 d 的对虾烘干样品,A<sub>3</sub> 组为 0.5 mg/L  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  与 0.5% 盐水混合溶液养殖 3 d 的对虾烘干样品。

表 2 不同浓度下对虾体内铜累积情况

样品	外源铜浓度 (mg/L)	对虾体内铜含量 (mg/kg)	对虾体内铜累积率 (%)
A	—	15.27 ± 1.75	—
A <sub>0</sub>	0	9.31 ± 0.63	-64.02
A <sub>1</sub>	0.10	1 190.00 ± 5.36	98.71
A <sub>2</sub>	0.25	1 954.00 ± 5.78	99.21
A <sub>3</sub>	0.50	3 091.00 ± 5.81	99.50

注:对虾体内铜累积率以对虾体内铜质量的平均值计算,根据公式: $S = \frac{X_{n-1} - X_n}{X_n} \times 100\%$  (n = 0,1,2,3),S 为对虾体内铜的累积率;X 为对虾体内铜质量。

在外源铜胁迫下,南美白对虾体内铜含量变化情况见图 1。从表 2、图 2 可以看出,所设置外源 Cu 的浓度中,当外源 Cu 的浓度为 0.1 mg/L 时,对虾体内 Cu 的富集累积率上升最快,为 98.71%;而随着外源 Cu 浓度的增加(>0.1 mg/L),对虾体内的累积率表现平稳上升的趋势,当浓度为 0.25 mg/L 时,累积率为 99.21%;浓度为 0.50 mg/L 时,累积率为 99.50%,说明对虾体内 Cu 的累积率会随着外源 Cu 浓度的提高呈上升趋势。在不同 Cu 浓度梯度(0.00、0.10、0.25、0.50 mg/L)下,茅尾海南美白对虾体内铜累积率差异梯度为 162.73%、0.50%、0.29%,说明外源 Cu 环境浓度为 0.10 mg/L 接近对虾体内 Cu 吸收的临界值。

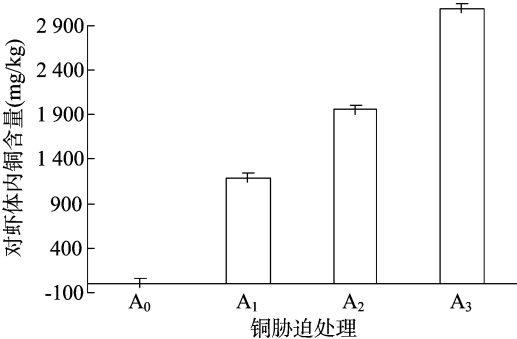


图 1 外源铜胁迫下南美白对虾体内铜含量变化

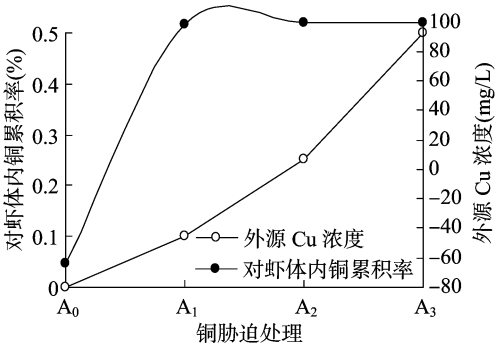


图 2 外源铜浓度与对虾体内铜累积率关系

此外,在纯盐水中养殖对虾体内 Cu 含量比其体内原有 Cu 含量要低 64.02%,说明日常生活中可以通过淡盐水的漂洗去除对虾体内重金属 Cu 的含量,进而达到一定清洁虾体

内污染的作用。

2.2 Cu 胁迫下南美白对虾氨基酸营养成分的变化

重金属污染在一定程度上影响着动植物体内营养成分、生理性能。研究发现,在不同外源 Cu 浓度胁迫下,茅尾海对虾氨基酸营养成分也受到不同程度的影响。从表 3 可以看出,从氨基酸含量变化的平均值看,各氨基酸的活跃程度有所变化,丝氨酸、谷氨酸随着外源 Cu 浓度的提高,活跃性稍有增加;天门冬氨酸、甘氨酸、丙氨酸、脯氨酸等营养成分的活跃性受到抑制。其次,非必需氨基酸、必需氨基酸含量随着外源

Cu 浓度的提高总体呈下降的趋势。表 3 中,在 0.5% 盐水中饲养 3 d 的对虾样与鲜样相比,氨基酸活跃程度略有下降但变化不大,非必需氨基酸、必需氨基酸分别下降了 0.32、0.07 百分点,说明氨基酸在淡盐水环境下,流失率较低;随着外源 Cu 浓度提高到 0.10、0.25、0.50 mg/L,非必需氨基酸和必需氨基酸含量分别比上一浓度处理下降 3.20、0.02、0.66 百分点和 1.23、0.98、0.18 百分点。从下降的数据分析,Cu 浓度为 0.10 mg/L 时,对虾氨基酸活跃性降低最快,在设置的浓度梯度中,氨基酸活跃性降低程度呈先快后慢的特点(图 3)。

表 3 不同外源 Cu 浓度下对虾体内各种氨基酸含量变化情况

指标		氨基酸含量(%)				
		A	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
非必需氨基酸	天门冬氨酸	7.37±0.43	7.31±0.40	6.92±0.39	6.77±0.37	6.56±0.37
	丝氨酸	2.87±0.11	2.83±0.10	2.93±0.07	2.95±0.08	3.03±0.07
	谷氨酸	12.27±0.71	12.09±0.66	12.56±0.62	12.66±0.61	12.70±0.65
	甘氨酸	8.86±0.42	8.77±0.41	6.85±0.22	7.08±0.30	6.42±0.18
	丙氨酸	5.00±0.22	5.00±0.21	4.61±0.17	4.80±0.16	4.69±0.15
	胱氨酸	1.03±0.07	1.01±0.07	1.04±0.06	1.02±0.07	1.07±0.05
	酪氨酸	3.12±0.17	3.13±0.16	2.89±0.13	3.06±0.11	3.16±0.12
	脯氨酸	1.56±0.33	1.57±0.34	1.18±0.25	1.19±0.23	1.14±0.20
	组氨酸	1.69±0.35	1.72±0.37	1.71±0.31	1.65±0.30	1.61±0.28
	精氨酸	7.46±0.28	7.48±0.29	7.02±0.25	6.51±0.23	6.65±0.20
	总计	51.23±3.09	50.91±3.01	47.71±2.47	47.69±2.46	47.03±2.27
必需氨基酸	苏氨酸	3.16±0.23	3.17±0.22	3.08±0.20	2.78±0.18	2.75±0.17
	缬氨酸	3.18±0.19	3.15±0.19	3.11±0.17	2.65±0.16	2.71±0.16
	蛋氨酸	1.93±0.06	2.08±0.09	1.98±0.06	1.66±0.04	1.57±0.03
	异亮氨酸	3.10±0.25	3.08±0.22	3.20±0.21	3.36±0.22	3.30±0.20
	亮氨酸	5.92±0.34	5.62±0.33	5.50±0.30	5.53±0.28	5.66±0.29
	苯丙氨酸	3.65±0.29	3.69±0.28	3.33±0.26	3.25±0.25	3.11±0.23
	赖氨酸	6.50±0.37	6.58±0.35	5.94±0.33	5.93±0.32	5.88±0.30
	总计	27.44±1.73	27.37±1.68	26.14±1.53	25.16±1.45	24.98±1.38

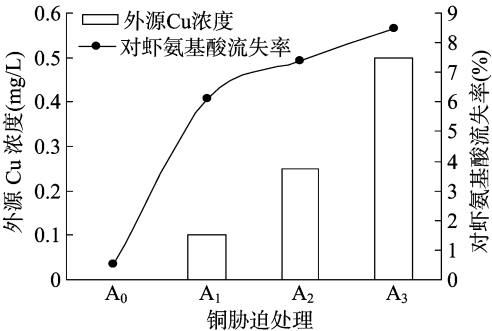


图3 外源 Cu 浓度与虾体氨基酸流失率关系

2.3 外源 Cu 胁迫下南美白对虾其他营养成分变化情况

研究证明,肌苷酸是影响肉类鲜味性的重要指标,是衡量海鲜鲜度的重要指标<sup>[13-14]</sup>。海水可在一定程度上提高对虾的肌苷酸含量,这是海水与淡水养殖的对虾口感存在差异的主要因素之一<sup>[1]</sup>,说明对虾中的肌苷酸与养殖水域的盐度有关系。在试验中,发现茅尾海南美白对虾肌苷酸含量随外源 Cu 浓度的提高呈下降趋势,详见表 4;经过相关性分析,肌苷酸与外源 Cu 浓度相关系数为 -0.88,呈高负相关关系(表 5),表明外源 Cu 环境对对虾鲜味影响较大。但在对虾肌苷酸的增减方面,盐度与外源 Cu 浓度的贡献值没有作进一步试验分析。

表 4 不同浓度 Cu 胁迫下对虾的其他营养成分变化情况

样品	肌苷酸含量 (%)	灰分含量 (%)	Fe 含量 (mg/kg)	Ca 含量 (mg/kg)	P 含量 (mg/kg)
A	2 297.29±3.22	6.15±0.13	104.21±2.55	1 462.00±1.27	11 192.50±2.17
A <sub>0</sub>	2 250.58±3.01	6.13±0.11	18.34±2.19	1 422.00±0.79	11 685.00±1.89
A <sub>1</sub>	1 878.44±3.10	6.20±0.15	13.74±2.20	1 332.00±1.04	10 635.00±2.23
A <sub>2</sub>	1 733.29±2.88	6.17±0.14	9.73±1.24	1 399.00±0.69	10 355.00±1.03
A <sub>3</sub>	1 663.46±2.35	6.19±0.15	6.29±0.61	1 382.00±0.48	9 240.00±1.33

灰分是反映食物无机成分总量的一项指标。测定灰分可以判断食品受污染的程度<sup>[15]</sup>。从试验分析数据可以看出,灰分与外源 Cu 呈负相关关系,与外部环境受污染程度表现一

致。而 Fe 和 Ca、P 作为人体重要的微量元素和常量元素与外源 Cu 分别呈高度负相关、中度负相关和微负相关关系,受外源 Cu 影响程度: P>肌苷酸>灰分>Fe>Ca,说明在外源 Cu

表 5 肌苷酸、灰分、Fe、Ca、P、外源 Cu 浓度的相关性

营养成分	相关系数					
	肌苷酸	灰分	Fe	Ca	P	外源 Cu 浓度
肌苷酸	1.00					
灰分	0.91	1.00				
Fe	0.71	0.88	1.00			
Ca	0.68	0.77	0.74	1.00		
P	0.89	0.63	0.44	0.46	1.00	
外源 Cu 浓度	-0.88	-0.65	-0.54	-0.38	-0.97	1.00

浓度胁迫下,P 流失的可能性最大。在外源 Cu 浓度胁迫下,肌苷酸、灰分、Fe、Ca、P 相互间的相关性均表现为正相关关系,说明随着外部 Cu 环境的改变,对虾体内肌苷酸、灰分、Fe、Ca、P 变化具有相对的一致性。受外部 Cu 环境的影响,肌苷酸与灰分的相关系数最高,为 0.91,表明食物受污染越严重,鲜味越差。

研究发现,肌苷酸、Ca、P 在外源 Cu 浓度为 0.10 mg/L 时,变化率表现出相对的一致性。推测在该外源 Cu 浓度下,对虾肌苷酸、Ca、P 的理化反应具有一定的一致性与相关性;其次,比 0.25、0.50 mg/L 的浓度环境下降速率快,详见图 4,说明在此浓度下,肌苷酸、Ca、P 的理化反应比在其他设定的浓度下强烈;另外,说明该浓度下肌苷酸、Ca、P 营养成分流失最快。灰分在试验设定的几个浓度中,变化速率起伏不大,理化反应程度相对一致。Fe 在外源 Cu 浓度为 0.10、0.25、0.50 mg/L 3 个设定浓度中,变化速率随浓度的增大而提高;但在外源 Cu 浓度为 0 mg/L 时,变化速率在试验中最高,这有可能是由于淡盐水对虾体内 Fe 净化作用使其流失程度比其他设定外源 Cu 浓度下理化反应而流失的要大。

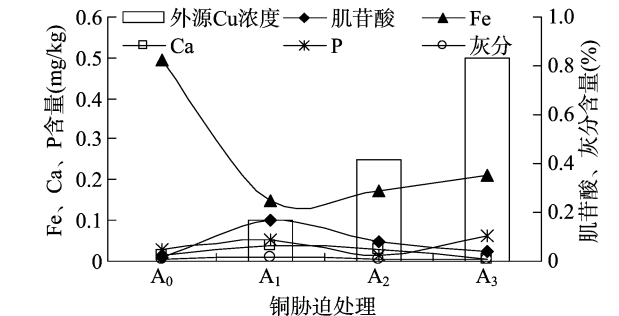


图 4 外源 Cu 胁迫下,肌苷酸、灰分、Fe、Ca、P 含量变化

3 结论

(1) 对虾的生长受到外源 Cu 浓度变化的影响,特别是体内 Cu 的累积。当外源 Cu 浓度为 0~0.1 mg/L 时,对虾体内 Cu 的累积率呈直线上升的特点;当外源 Cu 浓度为 0.10 mg/L~0.50 mg/L 时,呈饱和缓慢上升的特点。(2) 随着外源 Cu 浓度的提高,对虾体内氨基酸总量表现为总体下降的特征。不同的氨基酸表现的特征也有所不同,其中丝氨酸、谷氨酸的活性随着外源 Cu 浓度的提高稍有增加;天门冬氨酸、甘氨酸、丙氨酸、脯氨酸等营养成分的活性受到抑制。当淡盐水的环境下,氨基酸流失率较低;当外源 Cu 浓度为 0.10 mg/L 时,对虾氨基酸活性降低最快。(3) 在外源 Cu 胁迫下,对虾肌苷酸含量与灰分、Fe、Ca、P 含量受外部环

境影响程度为 P>肌苷酸>灰分>Fe>Ca。

4 讨论

(1) 现有研究中鲜有探讨在外源重金属胁迫下,对南美白对虾氨基酸等营养成分的影响。本试验中发现,外源 Cu 浓度在 0~0.10 mg/L 时,南美白对虾体内 Cu 累积率、氨基酸活性、肌苷酸、Ca 和 P 的变化特征最明显。在今后的试验中,考虑增加 0~0.10 mg/L 间的浓度梯度,提高试验数据的连贯性。(2) 本试验中通过改变外源 Cu 浓度,测试对虾体内相关营养成分的变化。今后可测试不同外源胁迫条件下,对虾体内氨基酸等营养成分的变化情况。(3) 养殖水域的盐度与外源 Cu 浓度对对虾的肌苷酸含量都有影响,但两者的贡献率分别是多少并没有进行探讨,此外,在其他重金属胁迫条件下,对肌苷酸产生的影响还须进一步研究。

参考文献:

[1] 王士稳,梁萌青,林 洪,等. 海水和淡水养殖凡纳滨对虾呈味物质的比较分析[J]. 海洋水产研究,2006,27(5):79-84.

[2] 宋维彦,王秀敏,靳桂双,等. 铁铜锌对凡纳滨对虾生长和非特异免疫的影响[J]. 江苏农业科学,2011,39(6):376-379.

[3] 刘 伟,文 华,吴建开,等. 高铜饲料对凡纳滨对虾生长、肌肉和肝脏铜积累的影响[J]. 淡水渔业,2008,38(2):12-16.

[4] 郭志勋,陈毕生,徐力文,等. 饲料铜的添加量对南美白对虾生长、血液免疫因子及组织铜的影响[J]. 中国水产科学,2003,10(6):526-528.

[5] 董晓慧,杨原志,郑石轩,等. 饲料中不同铜源和水平对凡纳滨对虾生长、免疫和组织铜含量的影响[J]. 大连水产学院学报,2007,22(5):377-383.

[6] 郭鹏飞,黄旭雄,苏 明,等. 饲料中铜水平对凡纳滨对虾免疫相关基因表达和抗菌能力的影响[J]. 水生生物学报,2012,36(5):809-816.

[7] 简慧敏,姚庆祯,臧维玲,等. 铜、镉、敌敌畏和甲胺磷对南美白对虾的亚急性毒性作用[J]. 生态毒理学报,2007,2(2):237-242.

[8] 周 萌,王安利,曹俊明,等. 饲料中不同形式的铜及添加量对凡纳滨对虾 (*Penaeus vannamei*) 生长性能、血清铜蓝蛋白和生长激素水平的影响[J]. 海洋与湖沼,2010,41(4):577-582.

[9] 王维娜,王安利,孙儒泳,等. 水环境中的铜锌铁钴离子对日本沼虾消化酶和碱性磷酸酶的影响[J]. 动物学报,2001,47(专刊):72-77.

[10] 张美琴,卢元玲,吴光红,等. 海水和饲料中 Pb 在凡纳滨对虾体内的富集与释放特性[J]. 中国水产科学,2017,24(2):374-386.

[11] 黄 凯,王 武,卢 洁,等. 盐度对南美白对虾的生长及生化成分的影响[J]. 海洋科学,2004,28(9):20-25.

[12] 朱春华. 盐度对南美白对虾生长性能的影响[J]. 水产养殖,2002(3):25-27.

[13] Suzuki A N, Homma A, Fukuda T, et al. Effect of high pressure treatment on the flavor-related components in meat[J]. J Meat Sci, 1994, 37(3):369-379.

[14] Furjmur S. Identification of taste-active components in the meat of the Japanese native chicken: Hinaidori and broils, and the effect of feeding treatments on taste-active components[J]. Ani Food Sci, 1998, 50(2):99-158.

[15] 李春秀,佟卫芳. 食品灰分测定中应注意的问题[J]. 职业与健康,2007,23(9):704-705.