

龟足成体的5种消化酶活力

林岗, 饶小珍, 陈宁, 郭世群, 许友勤

福建省发育与神经生物学重点实验室, 福建师范大学生命科学学院, 福建 福州 350108

摘要: 龟足是一种营养价值高, 具有多种生理功能和保健作用的优质海产品, 开展其消化生理的研究, 可以为其规模化养殖提供理论依据。用酶学分析方法测定了龟足 *Capitulum mitella* 成体消化道5种消化酶的活力并探讨了温度、pH因子对5种消化酶活力的影响。结果表明, 龟足的消化道能检测出类胰蛋白酶、胃蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶和脂肪酶的活力, 其中类胰蛋白酶活力最高, 胃蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶活力均较高, 纤维素酶活力极低, 类胰蛋白酶活力 > 胃蛋白酶活力, 淀粉酶活力 > 纤维素酶活力。类胰蛋白酶、胃蛋白酶、淀粉酶的最适温度均为 55 ℃, 纤维素酶、脂肪酶的最适温度分别为 45 ℃、35 ℃; 类胰蛋白酶、胃蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶、脂肪酶的最适 pH 分别为 10.8、2.5、5.9、4.2—5.5、7—7.5。最适温度、pH 下测得胰蛋白酶、胃蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶、脂肪酶活力分别为: (267.07±13.69)U、(72.21±6.1)U、(28.62±1.6)U、(1.46±0.02)U、(65.24±1.8)U。淀粉酶(A)与类胰蛋白酶(T)活力的比值(A/T值)表明龟足是以动物食性为主的甲壳动物。

关键词: 龟足; 消化酶活力; 温度; pH; 食性

中图分类号: S917 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2011)05-0088-07

Digestive enzyme activities in the alimentary tract of pedunculate cirripede *Capitulum mitella*

LIN Gang, RAO Xiao-zhen, CHEN Ning, GUO Shi-qun, XU You-qin

Key laboratory of developmental biology and neurobiology, Fujian normal university, Fuzhou 350108, China

Abstract: Goose barnacle *Capitulum mitella* is a seafood with high nutrition and multiple biological and health benefits. To study its digestive functionality can provide theoretical foundation for its breeding. Five major digestive enzyme activities of the adult goose barnacle (Rostral-carinal length > 11 mm) and the effects of different temperature and pH values on activities of the digestive enzymes were studied by enzyme analysis. The results indicate that the activities of trypsin-like protease, pepsin, amylase, cellulase, and lipase were determined in alimentary tract and affected obviously by temperature and pH values. The optimal temperatures for the activities of trypsin-like protease, pepsin, and amylase were 55 ℃, and 45 ℃ for cellulase, and 35 ℃ for lipase, respectively. The optimal pH values for trypsin-like protease, pepsin, and amylase were 10.8, 2.5, and 5.9, respectively at 55 ℃, and those for cellulase and lipase were 4.2–5.5 at 35 ℃ and 7.0–7.5 at 45 ℃. The activities of five digestive enzymes were in an order from strong to weak: trypsin-like protease, pepsin, amylase, cellulase, and lipase in alimentary tract at the most favorable reacting temperature and pH. The low ratio of Amylase/Trypsi (A/T) indicates that *Capitulum mitella* is a kind of carnivorous crustacean.

Key words: *Capitulum mitella*; digestive enzyme activities; temperature; pH; feeding habits

通过对动物消化酶种类、性质的研究可以了解动物的消化生理、营养物质的消化吸收状况, 并为

养殖动物配合饲料的开发以及确立适宜的投饵策略提供科学依据^[1-3]。研究表明, 甲壳动物食性与消化

收稿日期: 2010-12-09; 修订日期: 2011-04-28。卢冰编辑

基金项目: 福建省科技厅重点项目(2006N0066)

作者简介: 林岗(1967—), 男, 福建省福州市人, 副教授, 从事海洋生物学与水产养殖学研究。E-mail: lgffz@fjnu.edu.cn

酶活力关系密切, 消化酶活力的高低直接反映了动物对营养物质吸收利用的能力^[1-7]。迄今, 有关甲壳动物食性及消化酶的研究主要集中于虾、蟹等经济养殖动物, 尤其以甲壳动物幼体消化酶及食性转化的研究较多^[6-15], 桡足类、卤虫的蛋白酶研究也有报道^[16-17]。然而有关有柄蔓足类消化酶的研究迄今尚未见报道。

龟足 *Capitulum mitella* Linnaeus 1758, 又名笔架、佛手, 隶属于甲壳纲 Crustacea、蔓足亚纲 Cirripedia、指茗荷科 Pollicipidae、龟足属 *Capitulum*。在我国主要分布于长江口以南海浪剧烈冲击的暴露型岩相海岸中、高潮区, 属于亚热带和热带性种类, 是我国浙、闽、粤沿海的高级特色海鲜^[18]。与龟足属分类地位相近的指茗荷属 *Pollicipes* 的各个种在美国、加拿大、英国、西班牙、葡萄牙、智利和日本等国家被视为一种美味佳肴, 市场前景广阔, 已经成为一种重要的渔业资源。龟足体分为头状部和柄部, 柄部肌肉发达。分析表明其肌肉鲜味氨基酸含量丰富, EPA 和 DHA 占脂肪酸总量高达 34.3%, 富含各种矿质元素, 其中 Ca、Fe、Zn、Se 的含量高于许多其他食物, 硒含量为天然动物性食物中最高^[19]。龟足是一种营养价值高, 具有多种生理功能和保健作用的优质海产品, 具有较高的经济价值和广阔的市场前景。

随着人工育苗关键技术的突破, 龟足有望成为新的规模化养殖品种, 开展其消化生理的研究具有重要的理论意义和应用价值。本实验开展龟足的胰蛋白酶、胃蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶、脂肪酶等 5 种消化酶活力及温度、pH 值对消化酶活力影响的初步研究, 以期丰富甲壳动物消化生理研究内容, 并为龟足配合饲料的研发提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 材料与酶液制备

本实验用龟足于 2008 年 4 至 6 月大潮期间(初夏时节是龟足的繁殖初期, 摄食活动旺盛、肥满度大^[20]) 采自福建省连江县定海海区 (26°16'N, 119°48'E)。挑选峰吻径大于 11mm 的成熟个体, 在冰上解剖, 剥取出完整的消化道, 置于 -70℃ 冰箱中保存备用。

分别取 30—40 个个体的消化道合计约 500 mg (其每个个体的消化道长度约 1cm、鲜重约 10—20mg), 加入 10 倍预冷的双蒸水, 在冰浴中研磨, 高速冷冻离心机以 10000r·min⁻¹ 离心 30min, 取

上清液作为酶液, 立即用于消化酶活力测定。每种酶重复 3 次。

1.2 酶活力测定方法

类胰蛋白酶、胃蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶、脂肪酶活力的测定均参照潘鲁青等的方法^[11-12]。

蛋白酶活力用 Folin-酚法测定, 定义在一定温度和 pH 值条件下每克鲜组织中所含酶每分钟水解酪素产生 1μg 酪氨酸为一个蛋白酶活力单位(U)。

淀粉酶活力用 3, 5 - 二硝基水杨酸法测定, 定义在一定温度和 pH 条件下每克鲜组织中所含酶每分钟可水解淀粉产生 1μmol 麦芽糖为一个淀粉酶活力单位(U)。

纤维素酶活力用 3, 5 - 二硝基水杨酸法 -DNS-CMC 测定, 定义在一定温度和 pH 条件下每克鲜组织所含酶每小时水解纤维素生成 1μmol 葡萄糖所需的酶量为一个纤维素酶活力单位(U)。

脂肪酶活力用聚乙烯醇橄榄油乳化液水解法测定, 定义在一定温度和 pH 条件下以每克鲜组织中所含酶每分钟水解脂肪产生 1μmol 脂肪酸所需的酶量为一个脂肪酶活力单位(U)。

1.2.1 温度对 5 种消化酶活力的影响

酶活力测定的温度范围设置在 5—75℃, 以 10℃ 为一个梯度, 共设 8 个梯度。以 37℃、不同 pH 值条件下测定 5 种酶的活力初步确定最适 pH, 并依此结果设定类胰蛋白酶、胃蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶、脂肪酶反应体系的 pH 值分别为 10.5、2.5、6.0、5.0、7.5。

1.2.2 pH 对 5 种消化酶活力的影响

以 1.2.1 试验中测得酶活力最高值的反应温度为最适温度, 设定不同 pH 范围, 以 0.5 为一个梯度, 共设 9 个梯度。蛋白酶活力测定的 pH 值范围设置在 1.5—5.5, 用磷酸氢二钠-柠檬酸钠缓冲液调节 pH 值范围, 反应温度为 55℃。类胰蛋白酶活力测定的 pH 值范围设置在 7.5—11.5, 用磷酸氢二钠-磷酸二氢钠缓冲液、硼酸缓冲液、硼砂-氢氧化钠缓冲液调节 pH 值范围, 反应温度为 55℃。淀粉酶活力测定的 pH 值范围设置在 3.5—8.5, 用磷酸氢二钠-柠檬酸钠缓冲液调节 pH 值范围, 反应温度为 45℃。纤维素酶活力测定的 pH 值范围设在 3.0—8.0, 用柠檬酸-柠檬酸钠和磷酸氢二钠-磷酸二氢钠缓冲液调节 pH 值范围, 反应温度为 55℃。脂肪酶活力测定的 pH 值范围设置在 5.0—9.5, 用磷酸氢二钠-磷酸二氢钾和巴比妥钠-盐酸缓冲液调节 pH 值范围, 反应温度为 35℃。

1.3 数据处理

实验数据用 SPSS13.0 软件进行统计, 采用单因素方差 ANOVA 分析和 Duncan 多重比较。

2 结果与分析

2.1 龟足消化酶的活力

龟足的消化道能检测出类胰蛋白酶、胃蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶、脂肪酶的活力, 其中类胰蛋白酶活力最高, 胃蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶活力均较高, 纤维素酶活力极低。胰蛋白酶活力 > 胃蛋白酶活力, 淀粉酶活力 > 纤维素酶活力, 最适温度、pH 值下测得胰蛋白酶、胃蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶、

脂肪酶活力分别为: (267.07±13.69)U、(72.21±6.1)U、(28.62±1.6)U、(1.46±0.02)U、(65.24±1.8)U。

2.2 温度对 5 种消化酶活力的影响

温度对胰蛋白酶、胃蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶、脂肪酶等 5 种消化酶活力的影响明显, 在温度 5—75 范围内, 龟足类胰蛋白酶、胃蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶、脂肪酶等消化酶活力均随温度升高呈现先上升后下降的趋势, 只是各酶活力出现峰值的温度不同(图 1、表 1)。在 5℃时, 类胰蛋白酶、胃蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶、脂肪酶活力均最低; 15℃时胃蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶活力明显上升, 均为 5℃时的一倍以上, 差异显著($P < 0.05$)。

表 1 温度对龟足 5 种消化酶活力的影响

Tab. 1 Effects of temperature on activities of five kinds of digestive enzyme of *Capitulum mitella*

温度/	类胰蛋白酶活力/U	胃蛋白酶活力/U	淀粉酶活力/U	纤维素酶活力/U	脂肪酶活力/U
5	52.66±9.56	3.22±0.31	6.77±1.13	0.11±0.02	2.34±0.51
15	96.34±28.05	10.23±0.65	19.39±1.45	0.65±0.04	24.02±1.24
25	152.07±41.4	13.65±0.94	22.42±1.58	0.92±0.05	28.66±2.85
35	205.44±33.39	19.23±1.57	23.35±1.27	1.15±0.42	60.53±7.36
45	237.55±27.38	39.25±2.82	28.62±1.65	1.31±0.07	33.58±2.11
55	267.07±13.69	72.21±6.12	18.35±1.26	1.46±0.02	30.25±2.49
65	188.34±57.44	49.73±4.36	15.48±1.19	0.99±0.09	18.31±2.06
75	96.34±45.42	13.46±1.25	9.26±0.93	0.03±0.01	13.67±1.28

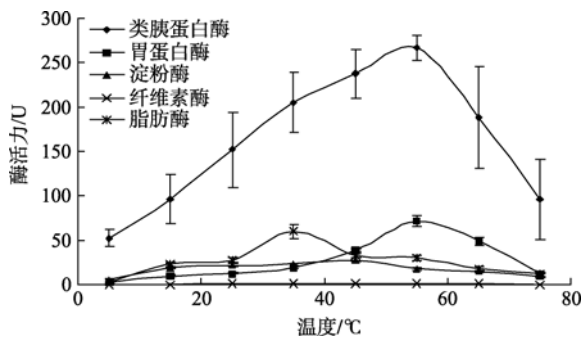


图 1 温度对龟足 5 种消化酶活力的影响

Fig. 1 Effects of temperature on activities of five kinds of digestive enzyme of *Capitulum mitella*

类胰蛋白酶、胃蛋白酶活力在 25—55℃急速上升, 55℃时酶活力达到最高, 高于 55℃酶活力迅速降低, 65℃酶活力仅为峰值的 70%。15—75℃各温度组间的类胰蛋白酶、胃蛋白酶活力差异显著($P < 0.05$)。

淀粉酶活力在 45℃时达到最大, 随后温度升高其活力逐渐降低, 其中 15℃、25℃、35℃与 55℃的酶活力之间差异不显著($P > 0.05$)酶活力变化幅度较小。

纤维素酶活力极低, 55℃时达到最高值, 其他温度组酶活力降低, 75℃时未能检出酶活力。

脂肪酶活力从 15—25℃随温度升高酶活力缓慢上升, 25—35℃酶活力迅速升高, 在 35℃时达到最高值, 随后温度升高酶活力迅速降低。25℃、45℃与 55℃之间的脂肪酶活力差异不显著($P > 0.05$), 其他各温度间差异显著($P < 0.05$)。

因此, 龟足类胰蛋白酶、胃蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶、脂肪酶的最适温度分别为 55℃、55℃、45℃、55℃、35℃。

2.3 pH 值对 5 种消化酶活力的影响

2.3.1 pH 值对类胰蛋白酶活力的影响

不同 pH 值下类胰蛋白酶活力的测定结果见图 2、表 2。类胰蛋白酶活力受 pH 值的影响十分明显, 酶活力共有两个峰值, 活力高峰值对应的 pH 值为 10.8, 为类胰蛋白酶活力的最适 pH 值, 活力次高峰值对应的 pH 值 7.8, 酶活力为高峰值的 89%。分析表明 pH 值 10.3 与 10.8、pH 值 10.8 与 11.3 之间类胰蛋白酶的活力差异显著($P < 0.05$); pH 值 8.8 与 9.3 之间、pH 值 9.3 与 9.8、pH 值 11.3 与 11.8 之间差异不显著($P > 0.05$), 其他各 pH 值之间差异显著。

表 2 pH 对龟足类胰蛋白酶活力的影响

Tab. 2 Effect of pH on trypsin-like protease activity of *Capitulum mitella*

pH	胰蛋白酶活力/U
7.8	196.46±9.12
8.3	181.19±7.94
8.8	155.53±23.32
9.3	149.08±26.68
9.8	134.12±15.87
10.3	122.00±13.67
10.8	220.71±6.43
11.3	178.83±5.05
11.8	159.00±15.84

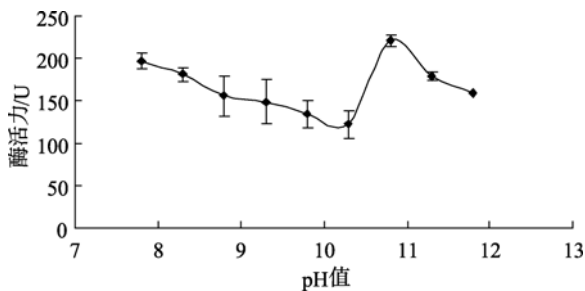


图 2 pH 值对龟足类胰蛋白酶活力的影响

Fig. 2 Effect of pH on trypsin-like protease activity of *Capitulum mitella*

2.3.2 pH 值对胃蛋白酶活力的影响

从图 3、表 3 可知在不同 pH 值条件下胃蛋白酶

表 3 pH 对龟足胃蛋白酶活力的影响

Tab. 3 Effect of pH on pepsin enzyme activity of *Capitulum mitella*

pH	胃蛋白酶活力/U
1.5	50.25±3.66
2	65.31±2.45
2.5	71.37±3.33
3	55.23±1.67
3.5	35.25±1.13
4	23.52±2.11
4.5	36.68±4.12
5	24.02±0.81
5.5	10.35±1.26

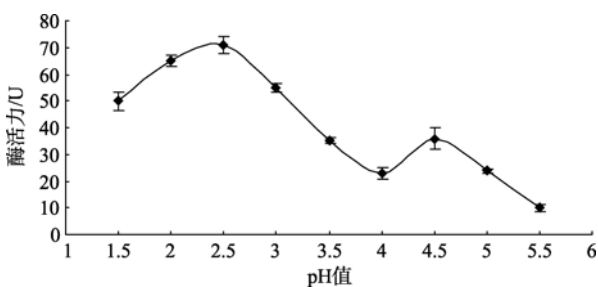


图 3 pH 值对龟足胃蛋白酶活力的影响

Fig. 3 Effect of pH on pepsin enzyme activity of *Capitulum mitella*

活力有两个峰值, 高峰值对应于 pH 值 2.5, 为胃蛋白酶活力的最适 pH 值; 在 pH 值 4.5 时有一活力次高峰值, 酶活力为高峰值的 50.7%。pH 值 4 与 4.5、pH 值 4.5 与 5 之间酶的活力差异显著($P < 0.05$); pH 值 3.5 与 4.5 之间、pH 值 4 与 5 之间酶的活力差异不显著($P > 0.05$), 其他各 pH 值之间差异显著。

2.3.3 pH 值对淀粉酶活力的影响

由图 4、表 4 可见, 淀粉酶活力在 pH 值 5.9 时达到最高, pH 值小于 5.9 时酶活力随着 pH 值的升高迅速升高, 高于此 pH 值后, 酶活力开始迅速下降。pH 值 5.4、pH 值 6.5 的酶活力分别为峰值的 56% 和 52%, 分析表明 pH 值 5.4、pH 值 6.5 与 pH 值 5.9 之间酶活力差异显著($P < 0.05$), pH 值 5.4 与 6.5 之间、4.6 与 7、7.6 与 8.4 差异不显著($P > 0.05$)。因此, 龟足淀粉酶的最适 pH 值为 5.9。

表 4 pH 对龟足淀粉酶活力的影响

Tab. 4 Effect of pH on amylase activity of *Capitulum mitella*

pH	淀粉酶活力/U
3.5	2.05±0.21
4	7.12±0.92
4.6	10.17±1.32
5.4	14.36±1.15
5.9	25.29±1.63
6.5	13.22±1.47
7	9.05±0.91
7.6	8.12±0.42
8.4	7.52±0.73

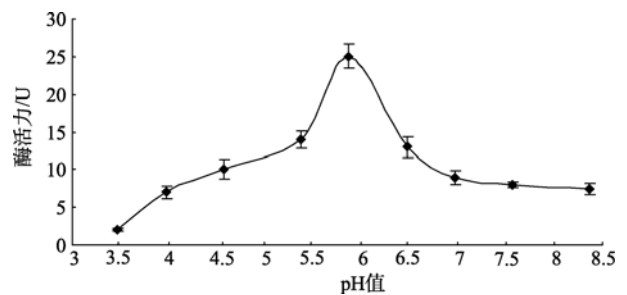


图 4 pH 值对龟足淀粉酶活力的影响

Fig. 4 Effect of pH on amylase activity of *Capitulum mitella*

2.3.4 pH 值对纤维素酶活力的影响

龟足纤维素酶活力随 pH 值的变化见图 5、表 5。在 pH 值 3-5 范围内, 酶活力随着 pH 值的升高逐渐缓慢升高, 高于 5 后, 酶活力逐渐缓慢下降。龟足纤维素酶活力极低, 酶活力变化幅度小, pH 值 3.5-8.2 各组间差异均不显著($P > 0.05$)。纤维素酶最适

pH 值在 4.2—5.5 之间。

表 5 pH 对龟足纤维素酶活力的影响
Tab. 5 Effect of pH on cellulase activity of *Capitulum mitella*

pH	纤维素酶活力/U
3	1.10±0.07
3.6	1.48±0.05
4.2	1.62±0.06
5	1.69±0.06
5.5	1.65±0.03
6	1.58±0.07
6.8	1.46±0.04
7.4	1.31±0.07
8.2	1.15±0.04

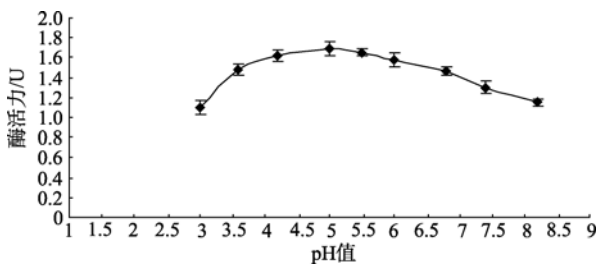


图 5 pH 值对龟足纤维素酶活力的影响
Fig. 5 Effect of pH on cellulase activity of *Capitulum mitella*

2.3.5 pH 值对脂肪酶活力的影响

不同 pH 值对龟足脂肪酶活力影响较大(图 6、表 6)。在 pH 值 5.0—5.6 内, 酶活力随 pH 值的变化平缓, pH 值 5.6—7.0 酶活力迅速上升, 至 pH 值 7.0 时达到最高值; pH 值 7.0 与 7.5 的酶活力差异不显著 ($P > 0.05$), pH 值高于 7.5 后酶活力迅速下降; pH 值 7.5 与 8.0 的酶活力差异显著 ($P < 0.05$), 而 pH 值 6.2 与 8.6 之间差异不显著 ($P > 0.05$)。结果表明龟足脂肪酶活力的最适 pH 值在 7.0—7.5 之间。

表 6 pH 对龟足脂肪酶活力的影响
Tab. 6 Effect of pH on lipase activity of *Capitulum mitella*

pH	脂肪酶活力/U
7.5	24.15±1.55
8	25.72±1.36
8.5	40.42±3.12
9	64.07±2.41
9.5	65.25±1.84
10	55.46±2.15
10.5	40.38±1.92
11	33.13±2.37
11.5	28.16±2.62

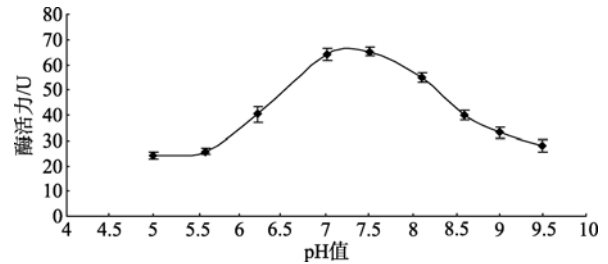


图 6 pH 值对龟足脂肪酶活力的影响
Fig. 6 Effect of pH on lipase activity of *Capitulum mitella*

因此, 龟足类胰蛋白酶、胃蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶、脂肪酶的最适 pH 值分别为 10.8、2.5、5.9、4.2—5.5、7—7.5。

3 讨论

甲壳动物消化酶活力的高低直接反映了动物对营养物质吸收利用的能力^[1]。类胰蛋白酶是甲壳动物体内最重要的消化酶之一, 饵料中相当大比例蛋白质的水解是由类胰蛋白酶来完成的^[4], 在测定的龟足 5 种消化酶中以类胰蛋白酶的活力最大, 纤维素酶活力极低, 与多数甲壳动物的研究结果相似^[4-15,25-27]。龟足的脂肪酶活力较高, 这与多数学者认为十足目甲壳动物脂肪酶活力通常较低的研究结果不尽相同^[4-13], 龟足的脂肪酶活力较高可能与其春夏季食谱中桡足类、无节幼体等动物性食物丰富有关。龟足类胰蛋白酶的活力显著高于胃蛋白酶活力, 淀粉酶活力高于纤维素酶活力, 与中国对虾 *Fenneropenaeus chinensis*、凡纳滨对虾 *Litopenaeus vannamei*、日本囊对虾 *Marsupenaeus japonicus*、罗氏沼虾 *Macrabrachium rosenbergii*、三疣梭子蟹 *Portunus tritulerkulatus*、中华绒螯蟹 *Eriocheir sinensis*、锯缘青蟹 *Scylla serrata*、长江华溪蟹 *Sinopotamon yangtsekiense*、岩龙虾 *Jasus edwardsii*、黑斑口虾蛄 *Oratosquilla kempii* 成体消化酶研究结果一致^[4-7,9,21], 也与许多学者对甲壳动物幼体消化酶的研究结果相似^[6-15]。由于龟足的个体小、消化道体积小, 胃壁薄极易破裂, 分段取样困难, 而中肠占消化道 2/3, 中肠壁较厚、皱褶发达、肠壁腺细胞多, 本文对消化酶的测定以整个消化道为检测对象, 这与多数学者对小个体甲壳动物消化酶研究的取材方法相似^[4, 6-15]。

甲壳动物消化酶活力明显受食物的影响^[1-2], 青蟹能调节消化酶的活力以最大限度地获取所必需的营养素^[23], 动植物比例不同的配合饲料能显著影响红螯螯虾 *Cherax quadricarinatus* 的淀粉酶/蛋白酶

活力(A/P)比值^[24]。Jone 等^[8]、潘鲁青^[12]、朱春华等^[22]、Pavasovi 等^[24]认为肉食性甲壳动物尤其是成体食性与蛋白酶的高活力有显著的相关性,对虾、龙虾、锯缘青蟹、红螯螯虾胃中蛋白酶的活力通常较高。Biesiot 等^[6]曾提出采用淀粉酶与蛋白酶活力的比值(A/P)或淀粉酶与类胰蛋白酶活力的比值(A/T)作为食性的指标,比值低则为肉食性或偏肉食性;反之则为植食性或偏植食性。中国对虾、日本囊对虾 P1、凡纳滨对虾 P1、中华绒螯蟹、三疣梭子蟹的 A/T 值分别为 0.44、0.27、0.17、0.73、0.43^[1,22],而龟足的 A/T 值仅为 0.11,说明龟足是一种以动物食性为主的甲壳动物。其胃含物周年食性的分析也表明龟足成体是以动物性食物和有机碎屑为主,植物性食物为辅;其春、夏、秋季动物性食物的生物量明显高于植物性饵料,动物性食物以桡足类为主(另文发表)。因此,消化酶活力和胃含物分析的结果是相一致的。

龟足类胰蛋白酶和胃蛋白酶最适温度都为 55℃,与凡纳滨对虾结果相同,高于日本囊对虾(40—45℃)和中国对虾(45—47℃)的最适温度^[25-27]。由于龟足属于亚热带和热带种,其生长环境的温度较高,这可能是龟足蛋白酶最适温度较高的原因。蛋白酶族

包括许多酶,最适 pH 值与酶的来源有很大关系,龟足胃蛋白酶和类胰蛋白酶的最适 pH 值为 2.5 和 10.8,而在 4.5 和 7.5 各有一个次高值。次高值的 pH 值与沈文英等^[25]、黄燕华等^[26]、Figueiredo^[29]分别对中国对虾、凡纳滨对虾、红螯螯虾的研究相似,但龟足胃蛋白酶的最适 pH 值非常低,与罗氏沼虾、美国龙虾 *Homams americanus* 及许多鱼类的结果相似^[6,28,30],而与多数甲壳类消化酶的研究不同;类胰蛋白酶的最适 pH 值明显高于虾、蟹,也与卤虫等甲壳动物不一致^[17],说明龟足蛋白酶的来源可能与其他种类有较大不同,其碱性蛋白酶活力大于酸性蛋白酶。

龟足脂肪酶的最适 pH 值与沈文英、黄燕华等^[25-26]报道凡纳滨对虾的脂肪酶最适 pH 值为 7.0—7.5、7.7 相近,最适温度 35℃ 也与凡纳滨对虾 37℃ 相近,与锯缘青蟹的 50℃ 不同^[23]。

龟足淀粉酶在 pH 值 5.9 时活性最强与多数学者认为甲壳动物的淀粉酶在偏酸的环境下活力较强的研究结果相似^[1,25-26]。龟足的淀粉酶活力在温度 15—35℃、55—65℃ 的活力就能达到峰值的 82.1%—64.3%,说明龟足的淀粉酶有较宽的适温范围,这与龟足周年食谱中均有硅藻出现,在食物中所占比例较稳定相对应。

参考文献

- [1] 潘鲁青,刘泓宇,肖国强. 甲壳动物幼体消化酶研究进展[J]. 中国水产科学, 2006,13(3): 492-501.
- [2] 刘立鹤,陈立侨,周永奎,等. 甲壳动物消化酶的研究[J]. 饲料工业, 2006, 27(18): 56-62.
- [3] 杨惠萍,董圣英,王子臣. 国内外关于水产动物消化酶研究的概况[J]. 大连水产学院学报, 1998, 13(3): 64-72.
- [4] JOHNSTON D. Ontogenetic changes in digestive enzyme activity of the spiny lobster, *Jasus edwardsii* (Decapoda; Palinuridae)[J]. Marine Biology, 2003, 143(6): 1071-1082.
- [5] 薛俊增,赵艳,张燕平,等. 四种蟹成蟹消化酶的研究[J]. 东海海洋, 1998, 16(4): 9-14.
- [6] BIESIOT P M, CAPUZZO J M. Changes in digestive enzyme activities during early development of the American lobster *Homams americanus* Milne Edwards[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 1990, 136: 107-122.
- [7] 刘玉梅,朱谨钊,吴厚余. 中国对虾幼体及成虾消化酶活力及氨基酸组成[J]. 海洋与湖沼, 1991, 22(6): 571-575.
- [8] JONES D A, KUMLU M, VAY L L, et al. The digestive physiology of herbivorous, omnivorous and carnivorous crustacean larvae: a review[J]. Aquaculture, 1997, 155(1-4): 285-295.
- [9] 魏华,赵维信. 罗氏沼虾幼体及成虾消化酶活性[J]. 水产学报, 1996, 20(1): 61-64.
- [10] RODRIGUEZ A, VAY L, MOURENTE G, JONES D A. Biochemical composition and digestive enzyme activity in larvae and postlarvae of *Penaeus japonicus* during herbivorous and carnivorous feeding[J]. Marine Biology, 1994, 118: 45-51.
- [11] 潘鲁青,马姓,王克行,等. 温度对中国对虾幼体生长发育与消化酶活力的影响[J]. 中国水产科学, 1997, 4(3): 18-23.
- [12] 潘鲁青. 四种虾蟹类幼体消化酶活力的比较研究[J]. 青岛海洋大学学报, 1997, 27(3): 313-318.
- [13] 王淑红,陈昌生,刘志勇,等. 南美白对虾幼体消化酶活力的初步研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2004, 43(3): 389-392.
- [14] 汤鸿,李少菁,王桂忠,等. 锯缘青蟹幼体消化酶活力[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1995, 34(1): 88-93.
- [15] 潘鲁青,王克行. 中华绒螯蟹幼体消化酶活力与氨基酸组成的研究[J]. 中国水产科学, 1997, 4(2): 13-20.
- [16] HASSETT R P. Effects of diet and starvation on digestive enzyme activity and feeding behavior of the marine copepod *Calanus pacificus*[J]. Plankton Res, 1990, 12(5): 991-1010.
- [17] SUNPAN B, LAN C, HUNNG T. Changes in composition

- and proteolytic enzyme activities of *Artemia* during early development[J]. *Comp Biochem Physiol*, 1991, 100 (3): 725-730.
- [18] 刘瑞玉, 任先秋. 中国动物志-无脊椎动物第四十二卷(甲壳动物亚门, 蔓足下纲, 围胸目)[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 217-219.
- [19] 陈宁, 林岗, 饶小珍, 等. 龟足营养成分分析及评价[J]. *热带海洋学报*, 2009, 28(6): 117-122.
- [20] 林岗, 邱文仁, 齐秋贞. 福州沿海龟足的繁殖附着与生长[J]. *海洋学报*, 1994, 16(6): 108-115.
- [21] 钱云霞, 蒋霞敏, 王春琳, 等. 黑斑口虾蛄消化酶的初步研究[J]. *中国水产科学*, 2000, 7(2): 100-102.
- [22] 朱春华, 李广丽, 文海翔. 南美白对虾早期幼体消化酶活力的研究[J]. *海洋科学*, 2003, 27(5): 54-57.
- [23] PAVASOVIC M, RICHARDSON N A, ARDERSON A J, et al. Effect of pH, temperature and diet on digestive enzyme profiles in the mud crab, *Scylla serrata*[J]. *Aquaculture*, 2004, 242: 641-654.
- [24] PAVASOVIC A., ARDERSON A J, MATHER P B. Effect of a variety of animal, plant and single cell-based feed ingredients on diet digestibility and digestive enzyme activity in red claw crayfish, *Cherax quadricarinatus* (Von Martens 1868)[J]. *Aquaculture*, 2007, 272: 564-572.
- [25] 沈文英, 胡洪国, 潘雅娟. 温度和 pH 值对南美白对虾消化酶活性的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2004, 35(6): 543-548.
- [26] 黄燕华, 王国霞, 刘襄河, 等. 温度和 pH 值对南美白对虾消化酶活性的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2008, 29(4): 87-90.
- [27] 吴垠, 孙建明, 周遵春. 温度对中国对虾、日本对虾主要消化酶活性的影响[J]. *大连水产学院学报*, 1997, 12(2): 17-24.
- [28] 叶继丹, 卢彤岩, 田雷, 等. 不同 pH 和温度条件下杂交鲟胃中消化酶活性的变化[J]. *中国水产科学*, 2003, 10(1): 79-81.
- [29] FIGUEIREDO M, KRICKER J, ARDERSON A. Digestive enzyme activities in the alimentary tract of redclaw crayfish, *Cherax quadricarinatus* (Decapoda:parastacidae)[J]. *Journal of Crustacean biology*, 2001, 21(2): 334-344.
- [30] 朱春华, 李广丽, 邓筑虹. 罗氏沼虾幼体及仔虾消化酶活力的研究[J]. *水利渔业*, 2003, 23(3): 12-13.