

文章编号:1000-0615(2008)02-0296-07

·研究简报·

## 三角帆蚌消化酶的分布特性和晶杆的形态结构

徐钢春<sup>1,2</sup>, 华 丹<sup>1,3</sup>, 顾若波<sup>1</sup>, 闻海波<sup>1</sup>, 邵仙萍<sup>2</sup>, 孔令龙<sup>2</sup>

(1. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心

农业部水生动物遗传育种和养殖生物学重点开放实验室, 江苏 无锡 214081;

2. 南京农业大学渔业学院, 江苏 无锡 214081;

3. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia 24061, USA)

关键词: 三角帆蚌; 蛋白酶; 淀粉酶; 纤维素酶; 晶杆  
中图分类号: Q 954.63; S 917 文献标识码: A

三角帆蚌 (*Hyriopsis cumingii*) 隶属瓣鳃纲、真瓣鳃目、蚌科, 是我国的特有种<sup>[1]</sup>, 也是我国生产淡水珍珠的主要贝类<sup>[2]</sup>, 产出的珍珠以其品质高而享誉全球。尽管我国在三角帆蚌育珠方面有悠久的历史<sup>[3]</sup>, 但其基础研究还相对薄弱, 许多与养殖相关的基础理论尚未弄清, 尤其是其消化生理的研究。

目前, 对海水贝类消化酶的研究已有不少报道<sup>[4-7]</sup>, 但鲜有淡水贝类消化酶的研究, 仅见费志良等<sup>[8]</sup>对包括三角帆蚌在内的 3 种淡水贝类胃、肠的蛋白酶、淀粉酶和纤维素酶进行了测定。此外, 晶杆是三角帆蚌消化系统中一个极其重要的组成部分, Judd<sup>[9]</sup>认为晶杆是进行细胞外消化酶的来源, 但迄今为止未见有其结构功能的研究, 仅见王兰等<sup>[10]</sup>对背角无齿蚌的晶杆进行了扫描电镜观察, 绳秀珍等<sup>[11]</sup>对栉孔扇贝晶杆的形态结构和组织化学进行了研究。本试验对 3 种规格[湿重分别为 (94.83 ± 3.97) g、(167.24 ± 5.58) g、(426.83 ± 16.72) g]三角帆蚌直肠、中肠、前肠、消化腺、胃和晶杆 6 种组织的蛋白酶、淀粉酶和纤维素酶进行了测定, 并分析了其分布特性, 利用石蜡切片法、光镜、扫描和透射电镜技术系统研究了三角帆蚌的晶杆的结构功能, 旨在填补三角帆蚌消

化生理学的空白, 为其健康高效养殖提供理论依据。

### 1 材料与方 法

#### 1.1 试验蚌及取样

试验用三角帆蚌用耢网采集于太湖无锡贡湖段。消化酶试验用三角帆蚌(表 1)在采集后停食 24 h, 于次日上午解剖取样。晶杆结构与功能试验用三角帆蚌(不分规格)在采集后饲养于曝气 3 d 以上的自来水, 分不投喂组与投喂组, 投喂组则每日投喂人工培育的四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricauda*) 和普通小球藻 (*Chlorella vulgaris*)。

表 1 试验三角帆蚌生物学数据

Tab. 1 The biology characteristics of *Hyriopsis cumingii*

组别 group	年龄 (a) age	样本数 (ind.) sample number	壳长 (cm) shell length	壳宽 (cm) shell width	湿重 (g) wet weight
I	2	20	12.13 ± 0.18	2.49 ± 0.08	94.83 ± 3.97
II	3	20	14.48 ± 0.14	2.78 ± 0.05	167.24 ± 5.58
III	5	20	19.33 ± 0.19	3.92 ± 0.12	426.83 ± 16.72

#### 1.2 实验方法

取三角帆蚌于冰盘上解剖, 根据文献 [5, 12-13] 的方法, 迅速准确取出直肠(近肛门)

收稿日期: 2007-03-13

资助项目: 国家科技基础性工作专项资助(2002DEB10052)

作者简介: 徐钢春(1979-), 男, 福建永定人, 研究实习员, 硕士研究生, 主要从事水生生物基础生物学研究。Tel: 0510-85559775,

E-mail: xugc@ffrc.cn

通讯作者: 华 丹, Tel: 0510-85552220, E-mail: huad@vt.edu

段)、中肠(位于围心腔的肠)、前肠(位于内脏、足部的肠)、消化腺(消化盲囊)、胃和晶杆6个部位,剥除多余的脂肪和结缔组织,用4℃冷却去离子水冲净内容物,然后用滤纸轻轻吸干水分,称取4~7只三角帆蚌各组织1.5g左右(晶杆约0.7g)为1个样本,每种规格5个重复,加9倍于其重量4℃冷却去离子水,分别在低温(0~4℃)下用ZS83-1型内切式组织匀浆机(10 000 r·min<sup>-1</sup>)匀浆2 min<sup>[14]</sup>,随后标号分装,将粗酶提取液保存在4℃冰箱中,24 h内测定。

**酶活力测定** 蛋白酶测定参考刘波等<sup>[15]</sup>的方法,略加修改。蛋白酶活性定义为:每克新鲜组织在30℃,pH 7.0<sup>[16]</sup>的条件下,每分钟水解酪蛋白产生1 μg 酪氨酸的酶量定为1个酶活力单位(U)。淀粉酶的测定采用碘-淀粉比色法进行,试剂盒购自南京建成生物公司。淀粉酶活性定义为:每克新鲜组织在30℃,pH 7.0的条件下,与底物作用1 min,水解1 mg 淀粉的AMS为1个酶活力单位(U)。纤维素酶测定参考文献<sup>[17]</sup>的方法稍作修改。纤维素酶活性定义为:每克新鲜组织在30℃,pH 7.0的条件下,每分钟催化纤维素水解生成1 mg 葡萄糖的酶量定为1个活力单位(U)。

**石蜡切片和光镜观察** 取晶杆囊,用Bouin氏液固定,石蜡包埋,连续切片(厚度6~7 μm),H.E染色,Olympus BH-2显微镜观察并拍照,取各不同形态晶杆在体视显微镜下观察摄影。

**扫描电镜观察** 将晶杆迅速地从小道内取出,用pH 7.3,0.1 mol·L<sup>-1</sup>磷酸缓冲液清洗3

次,放入4%戊二醛溶液中先行固定,约24 h后再入1%锇酸溶液中进行后固定,约2 h。用0.1 mol·L<sup>-1</sup>磷酸缓冲液清洗,梯度乙醇脱水,醋酸异戊酯置换,液态CO<sub>2</sub>临界点干燥,金溅射喷镀,日立S-3000N型扫描电子显微镜观察并拍照。

**透射电镜观察** 切取三角帆蚌晶杆(约0.5 mm<sup>3</sup>)依次用5%戊二醛固定2 h以上(4℃),0.2 mol·L<sup>-1</sup>磷酸缓冲液(pH 7.4)清洗3次,1%锇酸固定2 h(4℃),0.2 mol·L<sup>-1</sup>磷酸缓冲液清洗2次,丙酮脱水,Epon812环氧树脂浸透包埋,常规方法<sup>[18]</sup>制作超薄切片,醋酸双氧铀染色30 min,柠檬酸铅染色20 min,在日立H-7650型透射电镜下观察并拍照。

### 1.3 数据分析及图片处理

所有数据均用SPSS11.5软件进行统计分析,结果以Mean ± S.E.表示;图片用Photoshop 7.0编辑处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 消化酶的分布特性

结果显示(表2),3组三角帆蚌各消化器官蛋白酶活性均以晶杆中最高,显著高于其他各组织,消化腺次之,前肠、胃、直肠、中肠则最低,且差异不显著( $P > 0.05$ )。

晶杆、胃以及中肠的蛋白酶活性随着湿重的增加而上升,而消化腺和内肠的蛋白酶活性则随着湿重的增加而降低,说明随着年龄的增长,蛋白质的细胞外消化能力增强。

表2 三角帆蚌各消化器官蛋白酶活性

Tab.2 Activities of protease in different digestive organs of *Hyriopsis cumingii*

U·g<sup>-1</sup>

组别 group	直肠 straight intestine	中肠 middle intestine	前肠 inner intestine	消化腺 digestive gland	胃 stomach	晶杆 crystalline style
I	1.93 ± 0.12 <sup>a</sup>	1.94 ± 0.10 <sup>a</sup>	3.86 ± 0.15 <sup>c</sup>	5.16 ± 0.11 <sup>b</sup>	2.69 ± 0.04 <sup>d</sup>	6.81 ± 0.16 <sup>a</sup>
II	1.87 ± 0.06 <sup>d</sup>	2.25 ± 0.13 <sup>d</sup>	3.57 ± 0.13 <sup>c</sup>	4.80 ± 0.05 <sup>b</sup>	3.28 ± 0.15 <sup>c</sup>	8.03 ± 0.42 <sup>a</sup>
III	1.97 ± 0.22 <sup>a</sup>	2.39 ± 0.08 <sup>c</sup>	2.36 ± 0.32 <sup>c</sup>	4.45 ± 0.17 <sup>b</sup>	3.64 ± 0.10 <sup>b</sup>	10.51 ± 0.56 <sup>a</sup>

注:同一行中不同角标字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),下同

Notes: The same row data with different letters are significantly different( $P < 0.05$ ), the same as follows

由表3可见,三角帆蚌各消化器官淀粉酶活性均表现出相似的规律:酶活性大小依次为晶杆 > 前肠 > 胃 > 消化腺、中肠、直肠。与蛋白酶

的变化趋势相反,晶杆的淀粉酶活性随着湿重的增加显著降低( $P < 0.05$ ),这说明三角帆蚌对淀粉消化利用能力的降低。

表3 三角帆蚌各消化器官淀粉酶活性

Tab.3 Activities of amylase in different digestive organs of *Hyriopsis cumingii*U·g<sup>-1</sup>

组别 group	直肠 straight intestine	中肠 middle intestine	前肠 inner intestine	消化腺 digestive gland	胃 stomach	晶杆 crystalline style
I	9.62 ± 1.03 <sup>d</sup>	10.81 ± 2.17 <sup>d</sup>	34.83 ± 0.82 <sup>b</sup>	13.43 ± 2.75 <sup>cd</sup>	17.71 ± 1.31 <sup>c</sup>	57.39 ± 2.48 <sup>a</sup>
II	11.79 ± 2.00 <sup>cd</sup>	8.89 ± 0.73 <sup>d</sup>	29.51 ± 0.41 <sup>b</sup>	14.85 ± 0.88 <sup>c</sup>	16.29 ± 1.76 <sup>c</sup>	44.79 ± 1.58 <sup>a</sup>
III	9.59 ± 0.79 <sup>c</sup>	10.37 ± 0.47 <sup>c</sup>	29.17 ± 1.78 <sup>b</sup>	13.56 ± 2.14 <sup>c</sup>	14.11 ± 2.48 <sup>c</sup>	40.33 ± 1.08 <sup>a</sup>

从表4可知,三角帆蚌各消化器官的纤维素酶活性均不高,而以直肠和胃中的活性相对较高,分别为(6.81 ± 0.13) U·g<sup>-1</sup>、(6.76 ± 0.20) U·g<sup>-1</sup>。综合比较分析,三角帆蚌6种器官的消化酶活性大小均呈淀粉酶 > 纤维素酶 > 蛋白酶的趋

势,淀粉酶活性远大于其他两种酶活性。淀粉酶和纤维素酶活性随着湿重的增加不断降低,而蛋白酶活性则升高,这种变化在一定程度上反映了三角帆蚌对食物不同营养成分消化利用能力的转变。

表4 三角帆蚌各消化器官纤维素酶活性

Tab.4 Activities of cellulase in different digestive organs of *Hyriopsis cumingii*U·g<sup>-1</sup>

组别 group	直肠 straight intestine	中肠 middle intestine	前肠 inner intestine	消化腺 digestive gland	胃 stomach	晶杆 crystalline style
I	5.39 ± 0.28 <sup>b</sup>	3.67 ± 0.32 <sup>c</sup>	3.63 ± 0.18 <sup>c</sup>	3.99 ± 0.45 <sup>c</sup>	6.76 ± 0.20 <sup>a</sup>	3.36 ± 0.10 <sup>c</sup>
II	5.58 ± 0.14 <sup>a</sup>	3.02 ± 0.01 <sup>c</sup>	3.05 ± 0.07 <sup>c</sup>	3.81 ± 0.45 <sup>b</sup>	5.84 ± 0.34 <sup>a</sup>	3.65 ± 0.22 <sup>bc</sup>
III	6.81 ± 0.13 <sup>a</sup>	3.45 ± 0.34 <sup>cd</sup>	3.00 ± 0.03 <sup>d</sup>	3.96 ± 0.14 <sup>c</sup>	5.13 ± 0.06 <sup>b</sup>	3.59 ± 0.09 <sup>c</sup>

## 2.2 晶杆的形态结构

**晶杆的各种形态和大小** 三角帆蚌的晶杆为一支细长的几丁质的棒状物,呈灰白色或者肉色(图版-1~3),全长5~15 cm,最宽处直径1.5~3 mm,位于晶杆囊内(图版-4),头部伸达胃腔,与胃楯下部的片状物连接,在靠近胃腔的颈部膨大而头部呈尖钻状(图版-5),向后逐渐变细,成为杆状的尾部,依靠晶杆囊内壁的柱状纤毛(图版-6)和胃楯的纤毛的摆动,不断地搅拌食物,每分钟10~100转不等,依生理状态而定。而当饥饿时间达到72 h以上时晶杆溶解消失。

**晶杆的表面及内部结构** 在扫描电镜下,晶杆头部裹有正在被消化的食物(图版-7,8),整个晶杆的表面均呈棕糝丝状,似一种膜性结构,其上吸附有大量的消化酶颗粒(图版-9)。在光镜下,其头部在机械搅拌食物时,食物均附其上,极其膨大(图版-10);杆部的食物通道内食物形态各异:无食物时,呈明显的空道(图版-11);有食物时,则或呈一字形(图版-12,13)或呈螺旋形(图版-14),亦或是附在外层(图版-15),还可能呈结式(图版-16)。

晶杆截面的扫描电镜(图版-17)显示,食物通道呈同轴圆环状,有4~5环,无细胞结构,藻类有已经消化和未消化两种,并富含消化酶颗粒(图版

-18)。

晶杆的透射电镜结果显示,不投喂组三角帆蚌的晶杆内电子密度物质呈絮状(图版-19),横切面则有明显的带状高电子密度区(图版-20),在高电子密度区有大量空泡状结构(透明小泡)(图版-21),在已经摄食的晶杆中还可可见消化和未消化的藻类的截面(图版-22)。

## 3 讨论

### 3.1 消化酶的分布特性

费志良等<sup>[8]</sup>、李太武等<sup>[19]</sup>对贝类消化酶的研究表明,不同消化器官的酶活性分布不均。本研究结果也显示,蛋白酶活性以晶杆中最高,消化腺次之,前肠、胃、直肠、中肠则差异不大;淀粉酶活性依次为晶杆,前肠,胃,消化腺、中肠、直肠则在一定幅度波动;纤维素酶活性以直肠和胃中的活性高于其他组织。由此可推测,晶杆所在的胃腔部及晶杆囊是三角帆蚌淀粉和蛋白质的细胞外消化的主要部位;胃和直肠是进行纤维细胞外消化的主要部位。

刘月英等<sup>[1]</sup>、郑光明等<sup>[20]</sup>、龚世园等<sup>[21]</sup>的调查研究表明,淡水贝类属于被动摄食动物,主要滤食环境中的藻类和有机碎屑及其他小型浮游动物。此外,Biesiot等<sup>[22]</sup>认为淀粉酶与蛋白酶活性

比值(A/P)是衡量动物食性的一个重要指标:A/P值高时,动物为植食性或偏植食性;A/P值低时,动物为肉食性或偏肉食性。本实验结果显示,三角帆蚌的消化酶活性大小呈淀粉酶>纤维素酶>蛋白酶的趋势,且淀粉酶活性远大于其他两种酶活性。随着体重的增加,三角帆蚌A/P值逐渐降低,对蛋白质的消化能力增强。这可能与它的滤食器官结构有关,随着年龄增加,鳃丝间隔不断变大,对颗粒有机碎屑的摄食增强,与朱爱民等<sup>[23]</sup>的高龄三角帆蚌比低龄摄食率提高的研究结果相吻合。

### 3.2 晶杆的结构及功能

一直以来,贝类研究者对于晶杆的功能看法不一。张玺等<sup>[24]</sup>、许人和等<sup>[25]</sup>认为晶杆具有储存食物的功能,王兰等<sup>[10]</sup>认为背角无齿蚌晶杆主要起搅拌和胞外消化作用,绳秀珍等<sup>[11]</sup>的研究表明栉孔扇贝晶杆是实心的,应雪萍等<sup>[26]</sup>在对文蛤晶杆研究中推断晶杆内部的疏松物质为消化酶,外面几层致密物质则为储存的食物。而本研究对三角帆蚌蛋白酶、淀粉酶和纤维素酶的测定,光镜及电镜的观察结果表明,当三角帆蚌处于饥饿时,晶杆为实心;在食物充足的条件下,则形成食物通道,并借助纤毛的摆动,作一定方向的旋转以搅拌、分检和包裹食物,微小的食物颗粒进入消化盲囊进行胞内消化吸收,大的颗粒则在食物通道中进行消化吸收,未消化完的食物颗粒则进入肠腺中进行再次消化吸收。

绳秀珍等<sup>[27]</sup>在对栉江珧的研究中发现晶杆囊能分泌消化酶;而Henry等<sup>[28]</sup>认为*Pecten maximus*的晶杆内的大量淀粉酶是由胃分拣区的淀粉酶分泌细胞产生,然后被结合到晶杆中的。作者的观点更倾向于后者,因为整个晶杆消化酶的分布均匀,晶杆囊的表皮细胞在分泌晶杆胶状物质的同时也分泌消化酶,从而导致晶杆棕榈丝状的疏松结构。这有待于进一步深入研究验证。

三角帆蚌的晶杆大小与贝体的性别无关,长度随着个体的增大而增长,当有食物存在时,饥饿几十小时后晶杆消失,这与许人和等<sup>[25]</sup>、王兰等<sup>[10]</sup>、绳秀珍等<sup>[11]</sup>的研究结果相似。而Langton<sup>[29]</sup>认为贻贝(*Mytilus edulis*)晶杆的大小与贝体暴露在水外还是没于水中有关,还与海水pH值的变化及潮高有重要的相关性。

实验过程中得到中国药科大学电镜室濮祖茂老师、南京农业大学农业部重点生理生化实验室唐雪博士的大力帮助,谨致谢忱!

### 参考文献:

- [1] 刘月英,张文珍,王跃先,等. 中国经济动物志——淡水软体动物[M]. 北京:科学出版社,1979:83-85.
- [2] Hua D, Gu R B. Freshwater pearl culture and production in China[J]. *Aquaculture Asia*, 2002, 7(1):6-8.
- [3] 张元培. 淡水珍珠养殖技术[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,1981:262-264.
- [4] 杨蕙萍,童圣英,王子臣. 皱纹盘鲍蛋白酶的研究[J]. *水产学报*, 1997, 21(2):128-133.
- [5] 杨蕙萍,童圣英,王子臣. 皱纹盘鲍淀粉酶和褐藻酸酶的研究[J]. *水产学报*, 1998, 22(4):345-351.
- [6] Picos-García C, García-Carreñ F L, Serviere-Zaragoza E. Digestive proteases in juvenile Mexican green abalone, *Haliotis fulgens* [J]. *Aquaculture*, 2000, 181:157-170.
- [7] 范德朋,潘鲁青,肖国强,等. 温度、pH对缢蛏(*Sinonovacula constricta*)消化酶活力的影响[J]. *海洋湖沼通报*, 2003, 4:69-73.
- [8] 费志良,乔慧,郝忱,等. 3种淡水蚌消化酶活力的初步研究[J]. *淡水渔业*, 2006, 36(4):3-6.
- [9] Judd W. The secretions and fine structure of bivalve style sacs[J]. *Ophelia*, 1979, 18:205-233.
- [10] 王兰,张小民,赵赓,等. 背角无齿蚌晶杆的扫描电镜观察[J]. *水生生物学报*, 1996, 20(1):63-65.
- [11] 绳秀珍,任素莲,王德秀,等. 栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)晶杆的形态结构和组织化学研究[J]. *海洋学报*, 2002, 24(1):96-100.
- [12] 王文,杜开和,王毓明. 三角帆蚌消化系统的组织学研究及其胃肠在饥饿状态下的变化[J]. *南京师范大学学报*, 1995, 18(4):134-138.
- [13] 许星鸿,郑家声. 缢蛏消化道组织学与组织化学的研究[J]. *青岛海洋大学学报*, 2003, 33(3):391-398.
- [14] 黎军胜,李建林,吴婷婷. 样品处理对罗非鱼和银鲫肠道消化酶活性测定的影响[J]. *水产学报*, 2004, 28(6):738-740.
- [15] 刘波,刘文斌,王恬. 地衣芽孢杆菌对异育银鲫消化机能和生长的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2005, 28(4):80-84.
- [16] 尾崎久雄. 鱼类消化生理[M]. 上海:上海科技出版社,1983:19-88.
- [17] 中山大学生物系生化微生物教研室. 生化技术导论[M]. 北京:人民教育出版社,1978:61-63.
- [18] 安利国,刘家尧,孙虎山,等. 细胞生物学实验教程

- [M]. 北京:科学出版社, 2004:25-30.
- [19] 李太武, 聂丽萍, 刘金屏. 皱纹盘鲍消化酶的研究[J]. 水产科学, 1995, 14(5):3-7.
- [20] 郑光明, 魏青山. 武昌南湖圆背角无齿蚌食性与生长的研究[J]. 华中农业大学学报, 1999, 18(1):62-67.
- [21] 龚世园, 朱子义, 杨学芬, 等. 网湖绢丝丽蚌食性的研究[J]. 华中农业大学学报, 1997, 16(6):589-593.
- [22] Biesiot P M, Capuzzo J M. Change in digestive enzyme activities during early development of the American lobster *Homarus americanus* [J]. *Mar Biol Ecol*, 1990, 136(2): 107-122.
- [23] 朱爱民, 陈文祥, 奔建国, 等. 三角帆蚌食性及摄食率的初步研究[J]. 水生生物学报, 2006, 30(2):244-246.
- [24] 张 玺, 齐钟彦. 贝类学纲要[M]. 北京:科学出版社, 1961:220-231.
- [25] 许人和, 和振武. 河蚌的晶杆[J]. 生物学通报, 1988, 10:4-5.
- [26] 应雪萍, 张永普, 宋晓东, 等. 文蛤消化系统的形态学研究[J]. 海洋湖沼通报, 2001, 2:60-67.
- [27] 绳秀珍, 任素莲, 王德秀, 等. 栉江珧消化系统组织学与组织化学的研究[J]. 水产学报, 2001, 25(4):294-297.
- [28] Henry M, Benlimane N, Boucaud-Camou E, *et al.* The amylase secreting cells of the stomach of the scallop, *Pecten maximus*: ultrastructural, immunohistochemical and immunocytochemical characterization [J]. *Tissue Cell*, 1993, 25: 537-548.
- [29] Langton R W. Digestive rhythms in the mussel *Mytilus edulis* [J]. *Marine Biology*, 1977, 41:53-58.

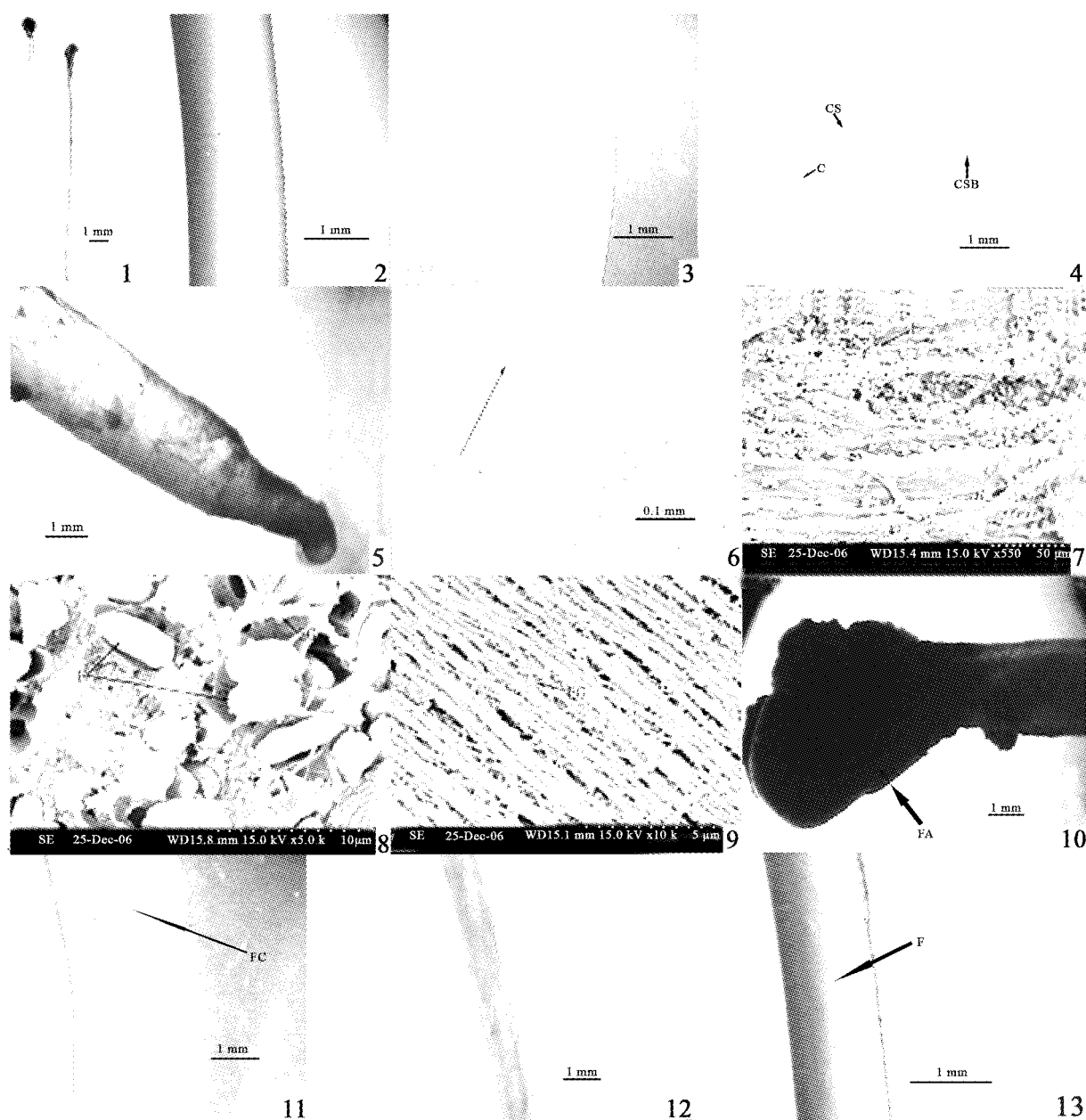
## Distribution properties of digestive enzyme of *Hyriopsis cumingii* and morphological configuration of crystalline style

XU Gang-chun<sup>1,2</sup> HUA Dan<sup>1,3</sup>, GU Ruo-bo<sup>1</sup>, WEN Hai-bo<sup>1</sup>,  
SHAO Xian-ping<sup>2</sup>, KONG Ling-long<sup>2</sup>

- (1. Key Open Laboratory for Genetic Breeding of Aquatic Animals and Aquaculture Biology, Ministry of Agriculture, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China;  
2. College of Fisheries, Nanjing Agriculture University, Wuxi 214081, China;  
3. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia 24061, USA)

**Abstract:** Enzyme analytical method was used to investigate the activities and distributions of protease, amylase, cellulase in straight intestine, middle intestine, inner intestine, digestive gland, stomach and crystalline from three different styles of *Hyriopsis cumingii*. The morphology and structure of crystalline style were also examined by paraffin section, light microscopy, scanning and transmission electron microscopy. The results showed that the relationship among digestive enzymes activities in all the six kinds of digestive organs was amylase > cellulase > protease, and amylase activity was significantly higher than cellulase and protease. Both protease and amylase activities were significantly higher in crystalline style, while cellulase activities were higher in stomach and orstraight. In contrast to a marked rise in protease activity, the amylase and cellulase demonstrated pronounced decreasing trend accompanied by the increasing wet weight of *Hyriopsis cumingii*. Compared to the solid line of crystalline style under starvation, a food channel was formed when *Hyriopsis cumingii* was full, which circumgyrated in one direction to mill, separate, enwrap food and digested them finally.

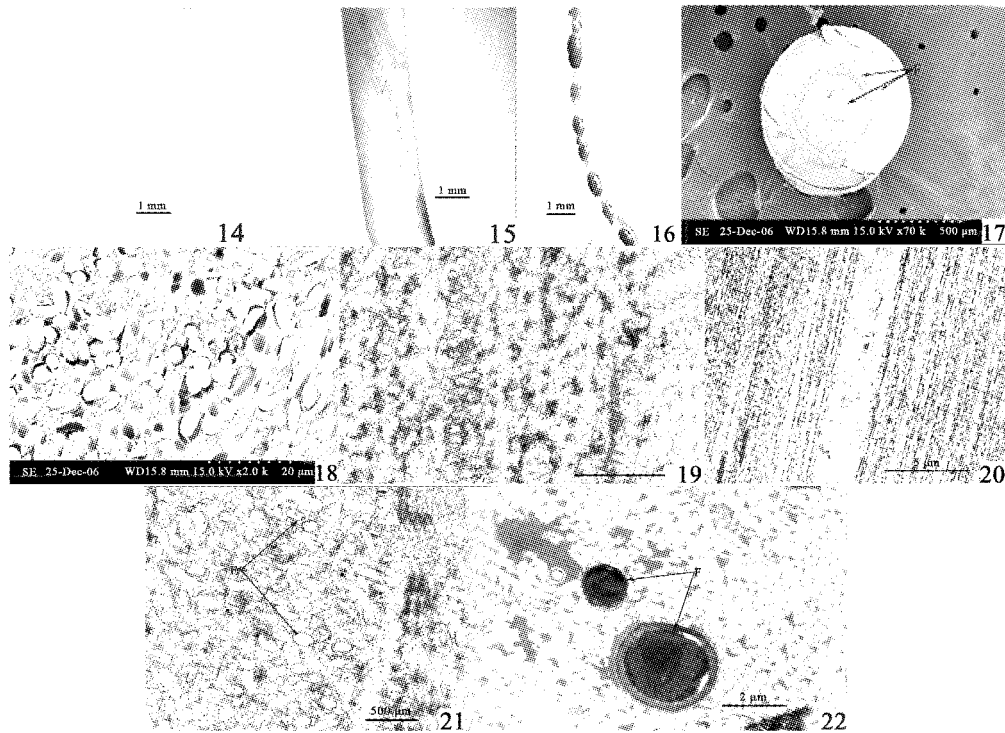
**Key words:** *Hyriopsis cumingii*; protease; amylase; cellulase; crystalline style



### 图版说明 Explanation of Plates

1. 晶杆整体观, 标尺 1 mm; 2. 示灰白色晶杆, 标尺 1 mm; 3. 示肉色晶杆, 标尺 1 mm; 4. 示晶杆囊结构, H.E, 标尺 1 mm; 5. 示晶杆头部, 标尺 1 mm; 6. 示晶杆囊外壁纤毛, H.E, 标尺 0.1 mm; 7. 示晶杆头部附着的藻类, SEM, 标尺 50  $\mu\text{m}$ ; 8. 示藻类及酶颗粒, SEM, 标尺 10  $\mu\text{m}$ ; 9. 示晶杆表面形态, SEM, 标尺 5  $\mu\text{m}$ ; 10. 示富含藻类的晶杆头部, 标尺 10  $\mu\text{m}$ ; 11. 示无食物的食物通道, 标尺 1 mm; 12. 示“—”字形食物通道, 标尺 1 mm; 13. 示轻度摄食食物通道, 标尺 1 mm

1. Holistic observe of crystalline style, scale bar: 1 cm; 2. Showing hoar crystalline style, scale bar: 1 mm; 3. Showing fleshcolor crystalline style, scale bar: 1 mm; 4. Showing configuration of crystalline style bursa, H. E, scale bar: 1 mm; 5. Showing head crystalline style, scale bar: 1 mm; 6. Showing Cilia of crystalline style bursa ektexine, H. E, scale bar: 0.1 mm; 7. Showing algae of head crystalline style, SEM, scale bar: 50  $\mu\text{m}$ ; 8. Showing algae and Enzyme granule, SEM, scale bar: 10  $\mu\text{m}$ ; 9. Showing surface configuration of crystalline style, SEM, scale bar: 5  $\mu\text{m}$ ; 10. Showing head crystalline style full with algae, scale bar: 1 mm; 11. Showing food channels without food, scale bar: 1 mm; 12. Showing “—” shape food channels, scale bar: 1 mm; 13. Showing food channels with light feeding, scale bar: 1 mm



### 图版说明 Explanation of Plates

14. 示螺旋形食物通道, 标尺 1 mm; 15. 示晶杆外层食物, 标尺 1 mm; 16. 示结式晶杆, 标尺 1 mm; 17. 示晶杆横截面扫描电镜, SEM, 标尺 500  $\mu\text{m}$ ; 18. 示晶杆通道中藻类形态, SEM, 标尺 20  $\mu\text{m}$ ; 19. 示絮状电子密度物质, TEM, 标尺 1.0  $\mu\text{m}$ ; 20. 示带状高电子密度区, TEM, 标尺 5.0  $\mu\text{m}$ ; 21. 示透明小泡, TEM, 标尺 500 nm; 22. 示透射电镜下食物通道中的藻类切面, TEM, 标尺 2.0  $\mu\text{m}$

CS: 晶杆; F: 食物; CSB: 晶杆囊; C: 纤毛; FG: 食物颗粒; FA: 食物团; EG: 酶颗粒; FC: 食物通道; TV: 透明小泡

14. Showing spiral food channels, scale bar: 1 mm; 15. Showing outer food of crystalline style, scale bar: 1 mm; 16. Showing kinked crystalline style, scale bar: 1 mm; 17. Showing scanning electron microscope of crystalline style on the across section, SEM, scale bar: 500  $\mu\text{m}$ ; 18. Showing algae morphology in food channels, SEM, scale bar: 20  $\mu\text{m}$ ; 19. Showing flocculent electron density material, TEM, scale bar: 1.0  $\mu\text{m}$ ; 20. Showing banded high electron density area, TEM, scale bar: 5.0  $\mu\text{m}$ ; 21. Showing translucent vesicle, TEM, scale bar: 500 nm; 22. Showing algae section in food channels under transmission electron microscope, TEM, scale bar: 2.0  $\mu\text{m}$

CS: crystalline style; F: food; CSB: crystalline style bursa; C: cilia; FG: food granule; FA: food agglomerate; EG: enzyme granule; FC: food channels; TV: translucent vesicle