

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20200109002

http://www.yykxjz.cn/

郑浩然, 陈修报, 刘洪波, 杨健. 背角无齿蚌稚蚌的生长和发育研究. 渔业科学进展, 2021, 42(2): 139–146
Zheng HR, Chen XB, Liu HB, Yang J. Growth and development of the early juvenile *Anodonta woodiana*. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(2): 139–146

背角无齿蚌稚蚌的生长和发育研究*

郑浩然¹ 陈修报² 刘洪波² 杨 健^{1,2①}

(1. 南京农业大学无锡渔业学院 无锡 214081; 2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心
中国水产科学研究院长江中下游渔业生态环境评价和资源养护重点实验室 无锡 214081)

摘要 背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)为具有食用、育珠、净水及生物监测等重要经济和生态价值的淡水双壳贝类。为把握其早期生活史过程中形态变化、器官发育和生长速率的特征,本研究对从脱落后第 1~30 天稚蚌期的个体开展了连续性、系统性的研究。结果显示,在稚蚌 1~30 d 的生长过程中,铰合部的前缘和后缘向上突起,壳顶相对向内收缩,前端生长迅速、向外侧扩展,后端向腹缘方向生长,而腹缘相对向后端生长。第 1 天,稚蚌出现了斧足;第 4 天,内脏团较为明显;第 10 天,鳃清晰可见,前、后闭壳肌已经形成;第 15 天,肠道和心脏清晰可见;第 20 天,进水管和出水管形成;第 25 天以后,稚蚌的器官已经全部发育完成。壳长、壳高和年龄之间呈指数型相关关系,壳长与壳高之间呈正异速生长关系。上述结果可为背角无齿蚌的人工繁育、种质资源保护和种群恢复以及有效开发、利用其为水污染监测专用指示生物等工作提供理论指导。

关键词 背角无齿蚌;稚蚌;形态;器官;生长;指示生物

中图分类号 Q174 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2021)02-0139-08

背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)是起源于我国黑龙江和长江流域的一种淡水双壳贝类(Demayo *et al.*, 2012)。其不仅具有食用、育珠等传统的水产经济价值,而且具有净水、监测水体污染等重要生态价值(Liu *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2012; 孙珊等, 2017)。特别是该蚌已被筛选为“淡水贝类观察”研究体系的专用指示生物和模式动物(杨健等, 2005; 杨健, 2015),分别应用于水污染的被动监测(刘洪波等, 2009; Bian *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2010)、主动监测(陈修报等, 2014; Chen *et al.*, 2019)和毒理学研究(陈修报等, 2017; Liu *et al.*, 2018)。值得注意的是,由于人类活动对水域生态环境的破坏,野生背角无齿蚌的资源量正急剧

减少(董志国等, 2004),因此,迫切需要有效的人工繁养增殖和自然种群复壮。

稚蚌是指钩介幼虫从宿主鱼身上破囊脱落下来的幼体(常亚青, 2007)。背角无齿蚌稚蚌阶段的死亡率最高,是决定其人工繁养成败的关键时期(苏彦平等, 2014)。虽然,闻海波等(2006)报道了圆背角无齿蚌(*Anodonta woodiana pacifica*)刚脱落(第 1 天)和生长第 6 天的稚蚌形态特征。徐良等(2016)初步研究了背角无齿蚌 30 d 稚蚌的壳长等生长状况。刘士力等(2009a)对背角无齿蚌稚蚌形态进行了较为详细的记录,并对壳长的生长特征进行了研究。Chen 等(2015)在人工繁养背角无齿蚌稚蚌的研究中取得突破。然

* 中国水产科学研究院基本科研业务费(2019GH10)、国家自然科学基金(31502166)、江苏省自然科学基金(BK20161144)和中国水产科学研究院淡水渔业研究中心基本科研业务费(2019JBFM05)共同资助 [This work was supported by Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund of CAFS (2019GH10), National Natural Science Foundation of China (31502166), Natural Science Funds of Jiangsu Province (BK20161144), and Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, Freshwater Fisheries Research Center, CAFS (2019JBFM05)]. 郑浩然, E-mail: 1750313712@qq.com

① 通讯作者: 杨 健, 研究员, E-mail: jiany@ffrc.cn

收稿日期: 2020-01-09, 收修改稿日期: 2020-03-04

而,以上报道都未对稚蚌的形态、器官及生长动态等进行连续性、系统性的研究。本研究通过连续采集背角无齿蚌稚蚌(1~30 d)的个体样本,探究和掌握其形态变化、器官发育和个体生长等方面的特征,以期为其人工繁养、种质资源保护、自然种群恢复及水污染监测指示生物群体的建立、开发和利用提供理论支撑和技术基础。

1 材料与方法

1.1 样本采集

背角无齿蚌的人工繁育在中国水产科学研究院淡水渔业研究中心南泉养殖基地进行。2019年5月中旬,从成熟母蚌中人工获取钩介幼虫,并选用黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)作为寄生鱼(Chen *et al.*, 2015),在稚蚌脱落高峰时将其转移至自主研发的立体循环水淡水贝类繁育系统(LFER-FWMW-1901型,中国水产科学研究院淡水渔业研究中心)进行培育。每天16:00~17:00进行稚蚌的采集,连续采集30 d,每次在同一培育池中随机采集30个稚蚌。

1.2 形态结构分析

应用光学显微镜(BX-51型, Olympus, 日本)和连续变倍体视显微镜(XTL-3400型, 上海精密仪器仪表有限公司)观察、记录其形态和器官发育情况。拍照并用测量软件(Olympus, 日本)测定壳长和壳高。利用 tpsdig2 软件(闫宝荣等, 2010; 姜涛等, 2011)对拍摄好并经过处理的稚蚌形态建立的地标点(图1), 获取地标点的坐标值, 建立地标点数据文件。随后, 使用 tpsRelw 计算平均型, 并用 tpsRegr 根据稚蚌的平均型对不同阶段稚蚌进行薄板样条分析并绘制网格图。

1.3 生长分析

利用绝对生长率(AGR)(Mohamed *et al.*, 2006)和

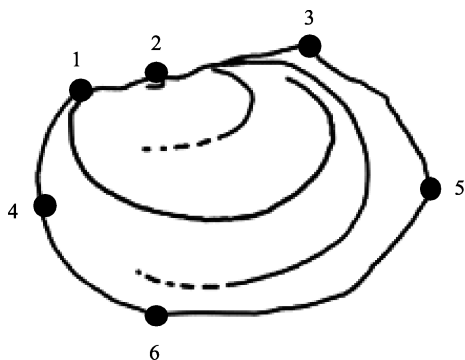


图1 稚蚌所选定的形态学地标点示意图

Fig.1 Landmark points for morphological measurements of the *A. woodiana* juvenile

相对生长率(IGR)(Hopkins *et al.*, 1992)比较稚蚌的生长速率:

$$AGR=(L_t-L_i)/t$$

式中, L_i 为初始长度, L_t 为在 t 时刻的最终长度。

$$IGR=(\ln t-\ln i)/t$$

式中, $\ln i$ 为初始长度的自然对数, $\ln t$ 为在 t 时刻长度的自然对数。

通过对数据进行线性函数拟合来分析壳长和壳高之间的关系(Kovitvadi *et al.*, 2009):

$$\text{Log}Y=\text{Log}b+a\text{Log}X$$

式中, $\text{Log}Y$ 和 $\text{Log}X$ 为指壳长、壳高的对数, $\text{Log}b$ 为截距, a 为斜率。线性回归得到的 a 值显示生长是等速的($a=1$)还是异速的(负异速: $a<1$; 正异速: $a>1$)。变量之间的关联程度由相关系数(R^2)计算得出。

1.4 统计分析

应用 SPSS 23.0 和 Excel 2010 进行数据分析。选定相关系数(R^2)为最大值的函数关系式作为最佳回归曲线(姚建平, 2018; 徐大风等, 2019); 利用形态地标点法(闫宝荣等, 2010; 姜涛等, 2011)分析稚蚌的形态变化; 应用独立样本 t 检验分析壳长和壳高的绝对生长率、相对生长率之间的差异。 $P<0.05$ 表示相关性或差异水平显著。

2 结果

2.1 形态变化

稚蚌的形态变化见图2。第1天, 稚蚌的外部形态类似于成熟的钩介幼虫(图2A), 壳钩依然存在(图2B); 第4天, 稚蚌的内侧已长出1对新壳, 壳钩完全退化, 双壳可完全闭合(图2C); 第10天, 稚蚌分泌形成的新贝壳的生长轮清晰可见, 前、后端分化明显(图2D); 第15天, 稚蚌的前后端增长显著, 呈椭圆形, 铰合部呈直线生长(图2E); 第20天, 稚蚌的铰合部前缘和后缘开始向上生长(图2F); 第25天, 稚蚌的背角开始形成(图2G); 第30天, 稚蚌的形态已趋于成体(图2H)。

使用 tpsRegr 软件将不同日龄稚蚌的差异可视化, 进行网格变形分析后获得网格变形图(变异扩大3倍)(图3)。从图3可以看出, 在稚蚌1~30 d的生长过程中, 铰合部的前缘和后缘(1、3地标点)向上突起, 壳顶(2地标点)相对向内收缩, 中轴线前端(4地标点)生长迅速、向外侧扩展, 中轴线后端(5地标点)向腹缘方向生长, 腹缘(6地标点)相对向后端生长。

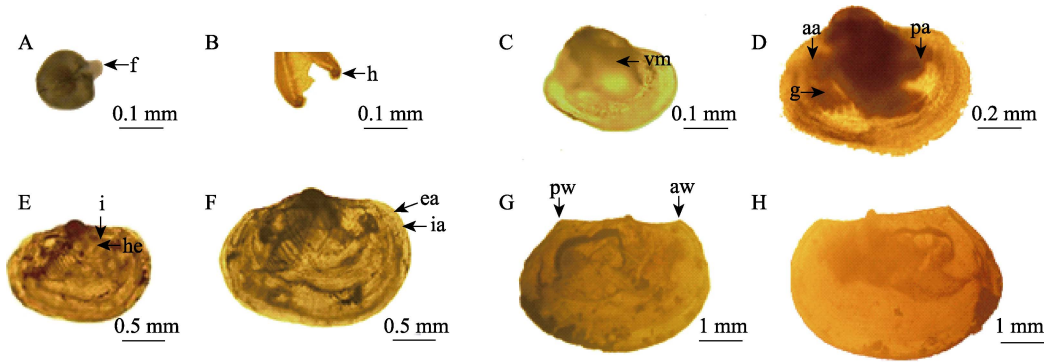


图 2 背角无齿蚌稚蚌的生长发育形态

Fig.2 Morphological development of early juvenile *A. woodiana*

A: 第 1 天; B: 第 1 天壳钩; C: 第 4 天; D: 第 10 天; E: 第 15 天; F: 第 20 天; G: 第 25 天; H: 第 30 天
 f: 斧足; h: 壳钩; vm: 内脏团; g: 鳃; aa: 前闭壳肌; pa: 后闭壳肌; hc: 心脏;
 i: 肠道; ea: 出水管; ia: 入水管; aw: 前背角; pw: 后背角
 A: 1st day; B: The hook of 1st day juvenile; C: 4th day; D: 10th day; E: 15th day; F: 20th day; G: 25th day; H: 30th day
 f: Foot; h: Hook; vm: Visceral mass; g: Gill; aa: Anterior adductor; pa: Posterior adductor; hc: Heart; i: Intestine;
 ea: Exhalant aperture; ia: Inhalant aperture; aw: Anterior wing; pw: Posterior wing

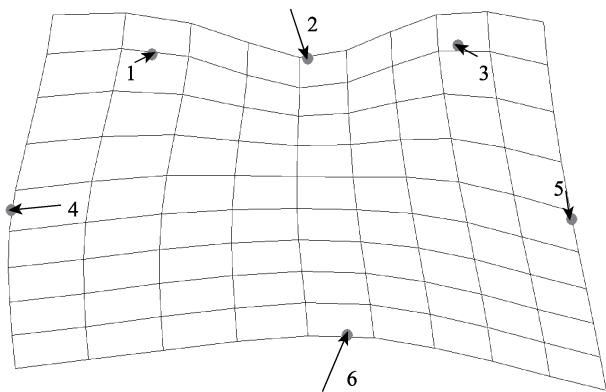


图 3 背角无齿蚌稚蚌形态的网格变形图(变异扩大 3 倍)
 Fig.3 Morphological grid deformation for early juvenile *A. woodiana* (variation enlarged 3 times)

2.2 器官发育

第 1 天, 稚蚌最明显的特征是出现斧足, 可自由爬行(图 2A); 第 4 天, 稚蚌的内脏团较为明显(图 2C); 第 10 天, 稚蚌内脏团和鳃均清晰可见, 前、后闭壳肌已经形成(图 2D); 第 15 天, 稚蚌的肠道和心脏清晰可见(图 2E); 第 20 天, 稚蚌鳃的外端与外套膜逐渐愈合, 形成进水管和出水管(图 2F); 第 25 天(图 2G) 和第 30 天(图 2H), 稚蚌的器官已全部发育完成。

2.3 生长特征

表 1 为背角无齿蚌第 1~30 天的形态测定结果。第 1 天, 稚蚌的壳长为(0.257±0.007) mm, 壳高为(0.291±0.011) mm; 第 15 天, 稚蚌的壳长为(1.399±0.128) mm, 壳高为(0.933±0.115) mm; 第 30 天, 稚

表 1 背角无齿蚌第 1~30 天稚蚌的形态变化

Tab.1 Variation of morphological morphometrics from 1~30 day-old juvenile *A. woodiana*

日龄 Day age	壳长 Shell length (mm)	壳高 Shell height (mm)	壳长/壳高 Shell length/Shell height
1	0.257±0.007	0.291±0.011	0.883
2	0.265±0.012	0.296±0.012	0.895
3	0.291±0.019	0.306±0.020	0.950
4	0.326±0.025	0.331±0.024	0.985
5	0.375±0.036	0.349±0.023	1.074
6	0.463±0.081	0.374±0.057	1.238
7	0.586±0.055	0.406±0.040	1.443
8	0.631±0.107	0.454±0.059	1.390
9	0.741±0.107	0.529±0.077	1.401
10	0.857±0.130	0.614±0.083	1.396
11	0.984±0.136	0.667±0.069	1.475
12	1.181±0.151	0.781±0.093	1.512
13	1.261±0.130	0.876±0.083	1.439
14	1.365±0.130	0.910±0.113	1.500
15	1.399±0.128	0.933±0.115	1.499
16	1.479±0.199	0.955±0.133	1.549
17	1.626±0.256	1.060±0.170	1.534
18	1.651±0.312	1.089±0.197	1.516
19	1.806±0.357	1.146±0.227	1.576
20	1.998±0.413	1.262±0.241	1.583
21	2.070±0.276	1.304±0.156	1.587
22	2.297±0.322	1.443±0.185	1.592
23	2.418±0.279	1.613±0.137	1.499
24	2.807±0.607	1.738±0.341	1.615
25	3.170±0.732	1.917±0.327	1.654
26	3.846±0.894	2.162±0.591	1.779
27	4.326±0.706	2.477±0.337	1.746
28	4.881±1.123	2.816±0.584	1.733
29	5.494±1.111	3.167±0.613	1.735
30	5.746±1.191	3.288±0.657	1.748

蚌的壳长为(5.746±1.191) mm,壳高为(3.288±0.657) mm。背角无齿稚蚌壳长、壳高与日龄之间均呈指数型相关关系(图 4)。

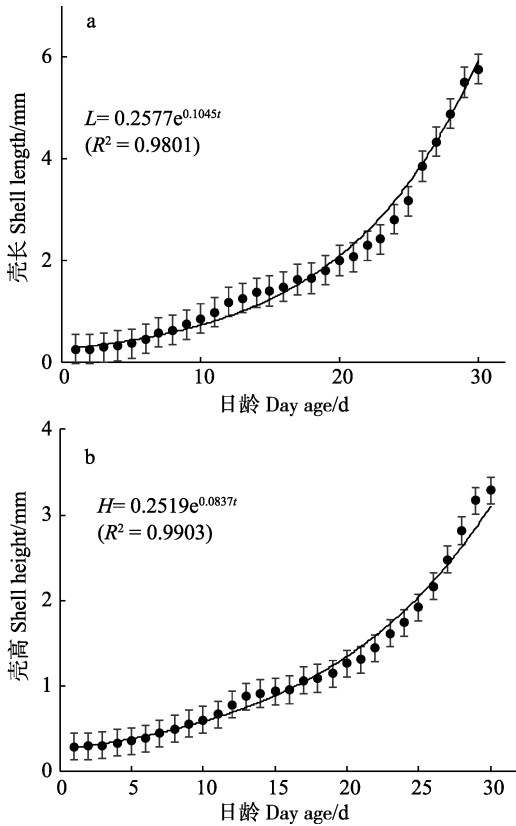


图4 背角无齿稚蚌壳的形态与日龄之间的关系
Fig.4 Relationships between shell morphology and day age of early juvenile *A. woodiana*

第 1、15 和 30 天稚蚌的壳长与壳高比分别为 0.883、1.499 和 1.748。壳长和壳高比在第 26 天达到最高值(1.779)(表 1)。稚蚌壳长的绝对生长率明显高于壳高的绝对生长率($P < 0.05$; 图 5a)。壳长绝对生长率的峰值(0.676)在第 26 天出现;壳高绝对生长率的峰值(0.351)出现在第 29 天。壳长的相对生长率也明显高于壳高的相对生长率($P < 0.05$),壳长相对生长率的峰值出现在第 10 天,达 0.151;壳高相对生长率的峰值出现在第 13 天,达 0.092(图 5b)。壳长和壳高之间呈正异速($a > 1$)生长,即壳长比壳高增长得快(图 6)。

3 讨论

3.1 形态变化

一般来说,通过传统形态学方法来了解生物生长发育较为简便、直观、成本低,但其结果可能会受到不够客观或不够精确的限制。本研究采用的地标点法能较灵敏地把握水生动物(特别是甲壳类、软体动物

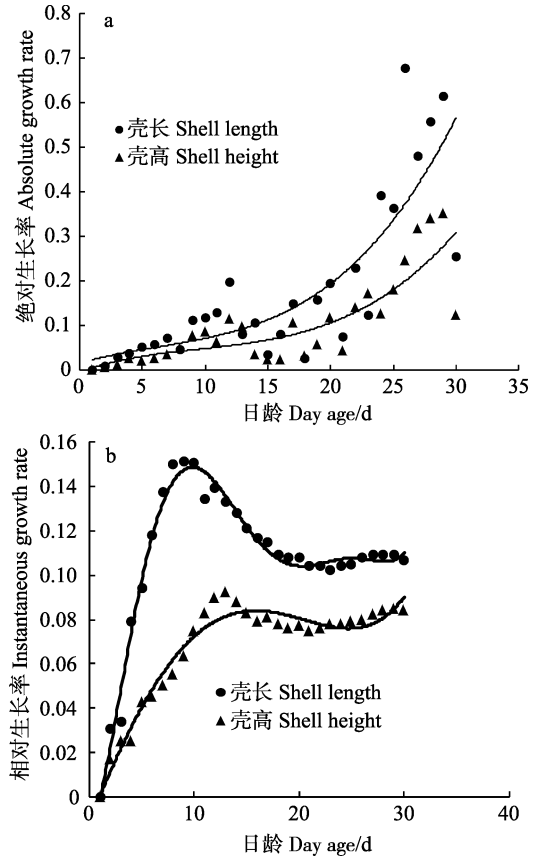


图5 背角无齿稚蚌壳长、壳高的生长率
Fig.5 Growth rate of shell length and height of early juvenile *A. woodiana*

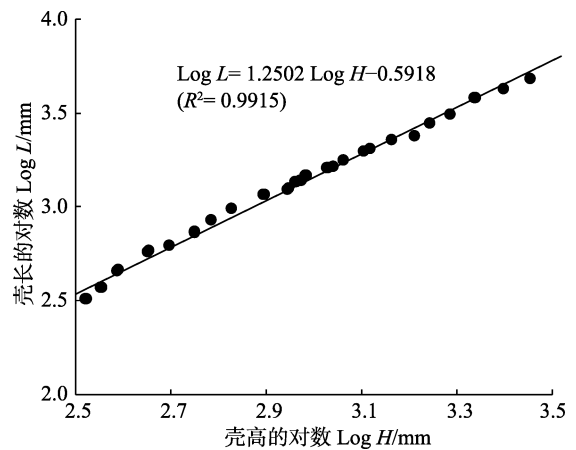


图6 背角无齿稚蚌壳长和壳高之间的生长关系
Fig.6 Relationship between Log *L* and Log *H* of early juvenile *A. woodiana*

和鱼类)的形态变化(陈新军等, 2013)。该法主要优点是可将研究对象的形状作为变量来进行比较,从而找出形态学观察中难以发现的形态变化特征(Urban, 2002),并且以图形化的方式更加直观地再现形态差异,清晰展现稚蚌形态变化的趋势(Ponton, 2006)。在本研究中,选择稚蚌的壳顶、铰合部前缘后缘、中轴

线前端后端等 6 个特征点作为地标点, 1、2、3、5 为 I 型地标点, 4、6 为 III 型地标点(图 1)。其中, 壳顶(2 地标点)、稚蚌前端(4 地标点)和腹缘(6 地标点)在形态变化中最明显(图 3)。壳顶是原钩介幼虫的双壳所在位置, 是形成新贝壳的中心点。壳顶(2 地标点)相对向内收缩, 提示壳顶的形成可能是钩介幼虫双壳退化和稚蚌贝壳增长的双重作用引起的。稚蚌壳前端(4 地标点)显示出明显的近乎水平向外侧生长的趋势, 表明该部分是决定稚蚌形态生长方向的重要因素, 且生长速率较快。腹缘(6 地标点)相对向后端生长, 值得注意的是, 腹缘是稚蚌壳钩的所在位置, 这可能与稚蚌生长过程中壳钩退化有关。壳钩是钩介幼虫附着寄生鱼类、完成寄生过程的主要器官(陈修报等, 2011)。传统观点认为, 刚脱落的稚蚌壳钩就已经退化(陈修报等, 2010; 王宏等, 2007)。刘士力等(2009a)观察到刚脱落的稚蚌壳钩并没有退化, 但对其具体退化时间没有详细记录。本研究首次发现虽然稚蚌壳钩的大小相对于钩介幼虫时期明显变小, 但直到第 4 天才完全退化; 且在第 1~4 天, 双壳由于壳钩的存在而无法紧密闭合。另外, 在第 4 天之前, 稚蚌的鳃尚未发育完全(图 2), 还不能完全进行自主呼吸; 故认为, 稚蚌壳钩的“延迟”退化可能与维护蚌体的呼吸效率有关。

3.2 器官发育

本研究中, 背角无齿蚌稚蚌的大部分器官出现的时间与先前的研究较一致(Chen *et al.*, 2015), 即第 1 天观察到斧足, 第 4 天观察到内脏团, 第 10 天观察到鳃和闭壳肌, 第 15 天观察到肠道和心脏, 第 20 天观察到进水管和出水管。然而, 与其他淡水贝类相比具有明显差异性。例如, 淡水帆蚌属贝类 *Hyriopsis myersiana* 的鳃直到第 13 天才完全发育成熟, 100 d 后进水管和出水管才完全发育成熟(Kovitvadhi *et al.*, 2009); 三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*)的鳃直到第 15 天才完全发育成熟, 27 d 后才出现进水管和出水管(刘士力等, 2009b)。鳃是淡水贝类的呼吸器官, 进水管和出水管则是促进摄食的重要器官(陈修报等, 2011)。背角无齿蚌稚蚌相关器官的出现时间均明显早于 *H. myersiana* 和三角帆蚌, 提示前者呼吸和摄食的需求较早。

3.3 生长特征

刘士力等(2009a)研究显示, 背角无齿蚌稚蚌壳长与日龄之间呈三次函数($L=370.11-32.66t+14.27t^2-0.15t^3$, $R^2=0.9526$)生长, 而本研究发现, 背角无齿蚌 1~30 d 稚蚌的壳长与日龄之间呈指数型相关关系

($L=0.2577e^{0.1245t}$, $R^2=0.9801$)(图 4a)。前者是每 5 d 测定 1 次稚蚌规格, 而本研究是每天采样进行连续测定, 因此, 本研究拟合的生长关系更精准地反映稚蚌的生长特征(R^2 更接近于 1)。本研究首次阐明了稚蚌壳高与日龄的关系(图 4b), 壳长和壳高的绝对、相对生长率(图 5)及二者的关系(图 6)。刘士力等(2009b)研究发现, 刚脱落的三角帆蚌稚蚌的平均壳长为 0.221 mm, 平均壳高为 0.249 mm, 其规格小于刚脱落的背角无齿蚌稚蚌(平均壳长为 0.257 mm, 平均壳高为 0.291 mm)。此外, 背角无齿蚌稚蚌生长速度比三角帆蚌快。需要关注的是, 背角无齿蚌壳长、壳高的绝对生长率和相对生长率的峰值及达到峰值的时间是不同的, 而相对生长率更加准确的反映出稚蚌生长发育的关键时期(如在峰值出现期, 正是稚蚌鳃和心脏等关键器官的发育期), 因此, 建议在背角无齿蚌人工繁育过程中根据相对生长率适时调整繁育对策。

背角无齿蚌稚蚌的壳长和壳高呈正异速生长关系($a>1$, 即壳长比壳高增长得更快)(图 6), 这与壳长和壳高的比值相一致(表 1)。通过比较可发现, 刚脱落的背角无齿蚌和三角帆蚌的壳长/壳高比值相近, 均为 0.9 左右(刘士力等, 2009a、2009b)。随着日龄的增加, 背角无齿蚌稚蚌前后两端的生长速度更快, 30 d 稚蚌的壳长/壳高比值为 1.7 (表 1, 图 6), 形状类似于椭圆形; 而三角帆蚌 30 d 稚蚌的壳长约为 2 mm, 壳高约为 1.5 mm, 壳长/壳高比值为 1.3 (刘士力等, 2009b), 形状向三角形演变(刘士力等, 2009b; 孙朝虎等, 2019), 表明背角无齿蚌稚蚌的生长(特别是壳长)速度相对更快。作者认为这是由二者的种间差异造成的。淡水贝类中, 基于壳长和壳高间生长关系(包括壳长和壳高的比值)的差异是否具有种类鉴别的潜力尚待进一步确证。

4 结论

本研究较为连续而系统地研究和阐释了背角无齿蚌 1~30 d 稚蚌的形态变化、器官发育及生长速率的特征。稚蚌形态变化的总体特征为铰合部的前缘和后缘向上突起, 壳顶相对向内收缩, 前端生长迅速、向外侧扩展, 后端向腹缘方向生长, 而腹缘相对向后端生长。稚蚌器官发育形成的先后顺序可能是斧足、内脏团、鳃、闭壳肌、心脏、肠道、进水管和出水管, 直至最后发育完全。稚蚌生长的特点表现在壳长、壳高与日龄之间均呈指数型相关关系, 生长速率呈前期快、后期慢的生长特征, 且壳长与壳高为正异速生长关系。上述结果将为破解人工繁育过程中稚蚌期死亡

率高的“瓶颈”提供思路,也可作为背角无齿蚌的种质资源保护、自然种群恢复及水污染监测指示生物群体的建立、开发和利用提供理论支撑和技术基础。

参 考 文 献

- Bian XS, Liu HB, Gan JL, *et al.* HCH and DDT residues in bivalves *Anodonta woodiana* from the Taihu Lake, China. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, 56(1): 67–76
- Chang YQ. Mollusca culture. Beijing: China Agriculture Press, 2007 [常亚青. 贝类增养殖学. 北京: 中国农业出版社, 2007]
- Chen XB, Liu HB, Su YP, *et al.* Acute toxicity of cadmium and its effects on lipid peroxidation and DNA damage in “standardized” *Anodonta woodiana*. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10): 1960–1967 [陈修报, 刘洪波, 苏彦平, 等. 镉对“标准化”背角无齿蚌的急性毒性及脂质过氧化和DNA损伤的影响. *农业环境科学学报*, 2017, 36(10): 1960–1967]
- Chen XB, Liu HB, Su YP, *et al.* Morphological development and growth of the freshwater mussel *Anodonta woodiana* from early juvenile to adult. *Invertebrate Reproduction and Development*, 2015, 59(3): 131–140
- Chen XB, Su YP, Liu HB, *et al.* Active biomonitoring of metals with cultured *Anodonta woodiana*: A case study in the Taihu Lake, China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, 102(2): 198–203
- Chen XB, Su YP, Liu HB, *et al.* Biomonitoring of heavy metal pollution in Wulihu Bay of Taihu Lake by transplanting “standardized” *Anodonta woodiana*. *China Environmental Science*, 2014, 34(1): 225–231 [陈修报, 苏彦平, 刘洪波, 等. 移植“标准化”背角无齿蚌监测五里湖重金属污染. *中国环境科学*, 2014, 34(1): 225–231]
- Chen XB, Yang J, Liu HB, *et al.* Element concentrations in a unionid mussel (*Anodonta woodiana*) at different life stages. *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University*, 2012, 57(1): 139–144
- Chen XB, Yang J, Wen HB, *et al.* Studies on the morphology of *Anodonta woodiana elliptica* at several important developmental stages and its effective temperature sum during parasitism. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2010, 33(4): 100–104 [陈修报, 杨健, 闻海波, 等. 椭圆背角无齿蚌发育关键阶段形态结构以及寄生有效积温的研究. *南京农业大学学报*, 2010, 33(4): 100–104]
- Chen XB, Yang J. Gametogenesis and development of freshwater bivalve molluscs: A review. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, 18(4): 944–952 [陈修报, 杨健. 淡水蚌类发生与发育研究进展. *中国水产科学*, 2011, 18(4): 944–952]
- Chen XJ, Fang Z, Su H, *et al.* Review and application of geometric morphometrics in aquatic animals. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(12): 1873–1885 [陈新军, 方舟, 苏杭, 等. 几何形态测量学在水生动物中的应用及其进展. *水产学报*, 2013, 37(12): 1873–1885]
- Demayo CG, Cabacaba KMC, Torres MAJ. Shell shapes of the Chinese pond mussel *Sinanodonta woodiana* (Lea, 1834) from Lawis stream in Iligan City and Lake Lanao in Mindanao, Philippines. *Advances in Environmental Biology*, 2012, 6(4): 1468–1473
- Dong ZG, Li JL. Biodiversity and conservation of freshwater mollusks. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, 28(4): 440–444 [董志国, 李家乐. 淡水贝类生物多样性保育. *水生生物学报*, 2004, 28(4): 440–444]
- Hopkins KD. Reporting fish growth: A review of the basics. *Journal of the World Aquaculture Society*, 1992, 23(3): 173–179
- Jiang T, Yang J, Liu HB, *et al.* A comparative study of the morphology of sagittal otolith in *Coilia nasus*, *Coilia mystus* and *Coilia nasus taihuensis*. *Marine Sciences*, 2011, 35(3): 23–31 [姜涛, 杨健, 刘洪波, 等. 刀鲚、凤鲚和湖鲚矢耳石的形态学比较研究. *海洋科学*, 2011, 35(3): 23–31]
- Kovitvadi S, Kovitvadi U, Sawangwong P, *et al.* Morphometric relationship of weight and size of cultured freshwater pearl mussel, *Hyriopsis (Limnoscapha) myersiana*, under laboratory conditions and earthen pond phases. *Aquaculture International*, 2009, 17(1): 57–67
- Liu HB, Chen XB, Oshima Y, *et al.* Biochemical changes in Chinese pond mussel *Anodonta woodiana* following exposure to copper. *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University*, 2018, 63(2): 311–318
- Liu HB, Yang J, Gan JL. Residues of mercury in the bivalve mussels *Anodonta woodiana* from the Wulihu Area of the Taihu, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2): 411–415 [刘洪波, 杨健, 甘居利. 太湖五里湖水域背角无齿蚌中汞的残留. *农业环境科学学报*, 2009, 28(2): 411–415]
- Liu HB, Yang J, Gan JL. Trace element accumulation in bivalve mussels *Anodonta woodiana* from Taihu Lake, China. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, 59(4): 593–601
- Liu J, Gu B, Bian J, *et al.* Antitumor activities of liposome-incorporated aqueous extracts of *Anodonta woodiana* (Lea, 1834). *European Food Research and Technology*, 2008, 227(3): 919–924
- Liu SL, Li JL, Zhang GF, *et al.* Morphological development and growth characteristics of the juvenile of *Anodonta woodiana*. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2009a, 18(3): 269–274 [刘士力, 李家乐, 张根芳, 等. 背角无齿蚌稚蚌形态发育与生长特性. *上海海洋大学学报*, 2009a, 18(3): 269–274]
- Liu SL, Li JL, Zhang GF, *et al.* Morphological development and growth characteristics of the juvenile of *Hyriopsis cumingii*. *Journal of Fisheries of China*, 2009b, 33(4): 604–609 [刘士力, 李家乐, 张根芳, 等. 三角帆蚌稚蚌形态发育与生长

- 特性. 水产学报, 2009b, 33(4): 604–609]
- Mohamed KS, Kripa V, Velayudhan TS, *et al.* Growth and biometric relationships of the pearl oyster *Pinctada fucata* (Gould) on transplanting from the Gulf of Mannar to the Arabian Sea. *Aquaculture Research*, 2006, 37(7): 725–741
- Ponton D. Is geometric morphometric efficient for comparing otolith shape of different fish species? *Journal of Morphology*, 2006, 267(6): 750–757
- Su YP, Chen XB, Liu HB, *et al.* The dietary algae at different juvenile stages of *Anodonta woodiana*. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2014, 21(4): 736–746 [苏彦平, 陈修报, 刘洪波, 等. 背角无齿蚌幼蚌食物中的藻类组成. 中国水产科学, 2014, 21(4): 736–746]
- Sun CH, Bai ZY, Li QQ, *et al.* The optimization of early compound selection for growth traits and shell color in *Hyriopsis cumingii*. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(2): 91–97 [孙朝虎, 白志毅, 李清清, 等. 三角帆蚌生长和壳色性状早期复合选择的优化研究. 渔业科学进展, 2019, 40(2): 91–97]
- Sun S, Zhao YT, Wang LM, *et al.* Status of heavy metal pollution in the shellfish culture area of Shangdong Province and the risk analysis of heavy metal elements in the shellfish. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(4): 118–125 [孙珊, 赵玉庭, 王立明, 等. 山东省主要贝类养殖区重金属环境状况及贝类安全风险. 渔业科学进展, 2017, 38(4): 118–125]
- Urban HJ. Modeling growth of different developmental stages in bivalves. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 238: 109–114
- Wang H, Li JL, Wang GL, *et al.* Preliminary studies on morphological change of the glochidia of *Hyriopsis cumingii* in stage of parasiting. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2007, 16(4): 394–398 [王宏, 李家乐, 汪桂玲, 等. 三角帆蚌钩介幼虫寄宿阶段形态变化的初步研究. 上海水产大学学报, 2007, 16(4): 394–398]
- Wen HB, Xu GC, Hua D. Preliminary observation on parasitic metamorphosis development of *Anodonta woodiana pacifica*. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2006, 15(2): 252–256 [闻海波, 徐钢春, 华丹. 圆背角无齿蚌寄生变态发育的初步观察. 上海水产大学学报, 2006, 15(2): 252–256]
- Xu DF, Liu YS, Chang Q, *et al.* Morphology, growth and development in the early life of *Octopus vulgaris*. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(5): 145–154 [徐大风, 刘永胜, 常青, 等. 真蛸早期发育形态特征及生长规律研究. 渔业科学进展, 2019, 40(5): 145–154]
- Xu L, Ma XY, Wen HB, *et al.* Comparison of the parasitism effect of glochidia in four host fishes and early juvenile mussel development in *Anodonta woodiana*. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2016, 35(6): 489–492 [徐良, 马学艳, 闻海波, 等. 背角无齿蚌在 4 种鱼上的寄生效果及早期稚贝的生长. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2016, 35(6): 489–492]
- Yan BR, Hua BZ. Geometric morphometrics and its application in the systematics and phylogenetics of insects. *Entomotaxonomia*, 2010, 32(4): 313–320 [闫宝荣, 花保祯. 几何形态测量学及其在昆虫分类学和系统发育中的应用. 昆虫分类学报, 2010, 32(4): 313–320]
- Yang J, Harino H, Liu HB, *et al.* Monitoring the organotin contamination in the Taihu Lake of China by bivalve mussel *Anodonta woodiana*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, 81(2): 164–168
- Yang J, Wang H, Zhu HY, *et al.* Bioaccumulation of heavy metals in *Anodonta woodiana* from Wulihu area of Taihu Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(3): 362–366 [杨健, 王慧, 朱宏宇, 等. 背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)在五里湖中的重金属富集. 长江流域资源与环境, 2005, 14(3): 362–366]
- Yang J. Research progress of diagnosis and early-warning technology by bioindicator and biomarker for fisheries ecological environment. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2015, 5(2): 1–7 [杨健. 渔业生态环境指示生物诊断和预警技术研究进展. 中国渔业质量与标准, 2015, 5(2): 1–7]
- Yao JP, Shan XJ, Chen YL, *et al.* Effects of ocean warming and acidification on the growth and development of *Nibea albiflora* Richardson during its early life history. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(2): 24–33 [姚建平, 单秀娟, 陈云龙, 等. 海洋暖化和酸化对黄姑鱼早期生长发育的影响. 渔业科学进展, 2018, 39(2): 24–33]

(编辑 马瑾艳)

Growth and Development of the Early Juvenile *Anodonta woodiana*

ZHENG Haoran¹, CHEN Xiubao², LIU Hongbo², YANG Jian^{1,2①}

(1. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081; 2. Key Laboratory of Fishery Ecological Environment Assessment and Research Conservation in Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081)

Abstract The freshwater mussel *Anodonta woodiana* is a freshwater bivalve with important economic and ecological values, e.g., as a food source or for pearl cultivation, water purification, and aquatic biological monitoring. In order to understand the morphological change, organ development, and growth rate characteristics of *A. woodiana* during its early life stages, relevant studies were conducted on 1~30-day-old juveniles. From the 1 to 30-day stages, the leading and trailing edges of the hinge for the juveniles were raised upward. The umbo was contracted relatively inward. The anterior grew rapidly and extended outwards, but the posterior grew toward the ventral edge. The ventral edge grew toward the ventral edge. The most obvious feature in the one-day-old juveniles was the appearance of a mobile foot. The visceral mass was more obvious in 4-day-old juveniles. At 10 days old, the gills were clearly visible, and the anterior and posterior adductors were formed. The intestine and heart were obviously visible in 15-day-old juveniles. The incurrent and excurrent siphons had been formed in 20-day-old juveniles. For the 25-day-old juveniles, the organs were fully developed. The shell length, height, and age grew exponentially, and the shell length and height grew at a positive allometry. These results can provide theoretical guidance for the artificial breeding of *A. woodiana*, its germplasm resource protection and population restoration, and the effective development and utilization of this bivalve as a special indicator for aquatic pollution biomonitoring.

Key words *Anodonta woodiana*; Juvenile; Morphology; Organ; Growth; Bioindicator

① Corresponding author: YANG Jian, E-mail: jiany@ffrc.cn