

浮筏养殖虾夷扇贝的自然稀疏效应

刘述锡¹, 崔金元², 林 勇^{1*}

(1. 国家海洋环境监测中心国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室, 辽宁 大连 116023;

2. 大连海洋大学研究生院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 为了研究虾夷扇贝浮筏养殖自然稀疏效应和科学养殖密度, 2009 年 8 月—2010 年 7 月, 对不同密度梯度的 3 个贝龄虾夷扇贝进行浮筏养殖现场实验。在自然稀疏条件下, 逐月调查浮筏养殖不同贝龄的虾夷扇贝壳长生长、湿重增长和累计死亡率, 并估算了适宜的扇贝浮筏养殖密度。结果表明, 在不同养殖密度条件下, 3 个贝龄扇贝周年壳长生长都没有显著差异; 1 龄贝壳长增长最快, 年均增长 29.53 mm; 2 龄贝壳长年均增长 23.50 mm; 3 龄贝壳长增长较慢, 年均增长 15.47 mm; 3 个贝龄扇贝周年湿重增长都没有显著差异, 3 龄贝和 2 龄贝湿重增长较快, 3 龄贝的年均增长约 54.07 g, 2 龄贝的年均增长约 37.80 g, 1 龄贝的年均增长约 14.69 g; 2 龄贝、3 龄贝各养殖密度梯度之间累计死亡率都没有显著差异, 3 龄贝死亡率介于 76.30%~83.33%, 2 龄贝死亡率介于 88.89%~91.78%, 养殖密度为 150 个/层的 1 龄贝与 80 个/层和 50 个/层的 1 龄贝累计死亡率差异显著。依据自然稀疏模型, 浮筏养殖适宜密度 3 龄贝为 4~5 个/层; 2 龄贝为 8~16 个/层, 1 龄贝为 29~124 个/层。

关键词: 虾夷扇贝; 自然稀疏; 养殖密度

中图分类号: S 968.3

文献标志码: A

虾夷扇贝 (*Patinopecten yessoensis*) 在 20 世纪 80 年代从日本引种到中国后^[1], 经过近 30 年规模化养殖, 已经成为我国北方重要的养殖经济物种。养殖区域主要集中在长山群岛海域, 其中獐子岛、海洋岛和大、小长山岛海域是养殖规模较大的区域, 养殖模式主要是浮筏养殖和底播增殖。随着养殖产业快速发展, 出现了一些新的问题, 如陆源污染物和养殖自污染导致养殖环境恶化, 人工育苗导致种质近交退化^[2]和个体生长缓慢^[3], 病原微生物侵害^[4]等, 给养殖产业造成巨大损害。针对上述问题, 国内研究人员分别从死亡原因^[5]、养殖关键技术^[6]、养殖海区浮游微生物^[7]、养殖容量^[8]、养殖群体的遗传结构^[9]、黄海底层冷水团^[10]等角度来分析影响虾夷扇贝养殖的关键因素。国外学者则更注重从贝类养殖对生态环

境影响^[11-13]、扇贝养殖区域选划^[14-15]和养殖容量模型角度, 如局部食物耗尽模型^[16], 最佳养殖容量模型^[17]等方面来进行研究。

2009 年长海县虾夷扇贝出现了大规模的死亡现象, 虽然虾夷扇贝死亡的影响因素很多, 但是养殖密度过大是最为重要的影响因素之一。截至目前为止, 长海县附近海域缺少不同贝龄虾夷扇贝养殖密度梯度实验数据, 而这些数据是进行养殖密度估算和养殖生产研究的关键性数据。本研究从浮筏养殖虾夷扇贝不同贝龄和密度梯度现场实验研究入手, 调查了虾夷扇贝的周年逐月生长数据和海水环境数据, 研究了浮筏养殖虾夷扇贝的自然稀疏效应, 并采用自然稀疏模型计算了虾夷扇贝浮筏养殖密度。本研究成果将为虾夷扇贝科学养殖提供技术支撑。

收稿日期: 2013-05-13 修回日期: 2013-07-11

资助项目: 国家海洋公益性行业科研专项(200805080)

通信作者: 林 勇, E-mail: ylin@nmemc.gov.cn

1 材料与方 法

1.1 实验海域和位置

依据离岸远近在小长山海域布设3个实验站 位,站位经纬度范围 $39^{\circ}12' \sim 39^{\circ}14'$, $122^{\circ}39' \sim 122^{\circ}42'$ 。

1.2 实验设计

实验海区台筏长度 100 m,宽度 6 m,每层层数 15 层,层间距 15 cm(笼长 2.25 m),笼直径 0.34 m,吊绳长度 1.3 m。实验设置 1 龄贝、2 龄贝和 3 龄贝 3 个实验组,每个实验组又分为 3 个养殖梯度(表 1)。实验用贝规格为 1 龄贝个体壳长范围是 1.5 ~ 3.0 cm,湿重范围是 1.0 ~ 2.5 g; 2 龄贝个体壳长范围是 5.5 ~ 6.5 cm,湿重范围是 15.0 ~ 30.0 g; 3 龄贝个体壳长 > 7.0 cm,湿重 > 50 g。

表 1 实验设计养殖密度梯度
Tab.1 The density gradient of culture in experimental design

实验设计 experimental design	1 龄贝 first-year scallop	2 龄贝 second-year scallop	3 龄贝 third-year scallop
密度梯度/ (ind/layer)	1	150	50
2	80	35	15
density gradient	3	50	25
		25	10

1.3 调查参数

扇贝生长参数:周年逐月连续测定扇贝存活数量、死亡数量、湿重和壳长。使用 G&GJJ500 型电子天平测定质量,使用游标卡尺测量长度。

环境参数:周年逐月测定表层水温、pH、盐度和叶绿素 a 等环境因子。水温、pH 和盐度使用梅特勒 SG23-B 现场测定。叶绿素 a 使用叶绿素荧光测定仪 TD700 测定。

1.4 养殖密度估算模型

浮筏养殖的吊笼内扇贝通常形成高度密集、拥挤的养殖竞争环境,有限的空间和食物资源,必然导致种群内个体相互竞争,处于劣势的虾夷扇贝被淘汰死亡,存活下来的个体继续重复自然竞争过程。因而,在有限的空间和食物环境下,高密度浮筏养殖虾夷扇贝必然发生自然稀疏过程。

生物种群自然稀疏(Self-Thinning)模型表述个体质量与养殖密度关系为^[18]:

$$M = kN^{\beta}, \quad B = kN^{\gamma}$$

将上式应用于浮筏养殖虾夷扇贝,则 M 为虾夷扇贝的质量, N 为虾夷扇贝的养殖密度, B 为虾夷扇贝的生物总量, k 、 γ ($\gamma = \beta + 1$) 分别为竞争系数和幂指数。

2 结果

2.1 实验海域环境因子

实验海域表层海水温度范围为 $-0.2 \sim 23.3^{\circ}\text{C}$,年平均温度为 $10.9 \pm 8.1^{\circ}\text{C}$,1 月份最低,8 月份最高。海水表层水温为周期性变化参数,与时间相关,通过回归分析,建立温度($^{\circ}\text{C}$)与时间(月)的关系曲线方程:

$$T = 10.86 - 11.18 \times \sin((2 \times \pi \times \text{month} + 2.27)/12)$$

$$R^2 = 0.982, df = 36; P < 0.01$$

采用此方程估算年最低温度为 -0.32°C ,出现在 2 月份;最高温度为 22.04°C 出现在 8 月份,年平均温度为 10.87°C ,预测值与实测调查值基本一致。

实验海域的 pH 均值介于 $7.97 \sim 8.22$ 之间,3 月份 pH 最高,9 月份最低;盐度介于 $29.1 \sim 33.9$ 之间,平均为 32.4 ± 1.3 ,最高值出现在 2 月,最低值出现在 8 月。6 月份进入丰水期,降雨和陆上径流带来较多淡水,导致盐度降低。叶绿素 a 浓度介于 $0.7 \sim 11.0 \mu\text{g/L}$ 之间,平均值为 $3.6 \pm 2.7 \mu\text{g/L}$,叶绿素 a 的浓度表现为双峰型,1—3 月份和 6—8 月份为高值时期,春季和秋季叶绿素 a 浓度较低,表明春季和秋季是实验海区虾夷扇贝摄食最旺盛的时段。

2.2 虾夷扇贝生物学性状

调查期内,3 龄贝、2 龄贝和 1 龄贝不同养殖密度周年壳长生长都没有显著差异($P > 0.05$) (图 1-a、1-c、1-e)。1 龄贝和 2 龄贝壳长增长较快,1 龄贝壳长增长最快,年均增长 29.53 mm ; 2 龄贝壳长年均增长 23.50 mm ; 3 龄贝壳长增长较慢,年均增长 15.47 mm 。(图 2)。2 龄贝和 1 龄贝在每年的 9—11 月份和 4—7 月份壳长增长较快。除了水温较低的 1—2 月份,3 龄贝壳长增长相对均匀。

壳长增长实验数据与投放月份存在很好的相关性(图 2),呈现幂指数趋势,以幂指数回归分析,得到壳长与投放月份的关系式:

$$Y = 22.329 \times X^{0.3892} \quad R^2 = 0.9678,$$

$$df = 1\ 603, P < 0.01$$

式中, X 表示投放后的月份, 如当年 8 月对应的 X 为 1, 9 月对应的 X 为 2, 依次类推, Y 表示壳长 (mm)。

虾夷扇贝湿重增长 调查期内, 3 龄贝、2 龄贝和 1 龄贝不同养殖密度湿重增长都没有显著差异 ($P > 0.05$) (图 1-b、1-d、1-f)。3 龄贝和 2 龄贝湿重增长较快, 3 龄贝的年均湿重增长量约 54.07 g, 2 龄贝的年均湿重增长量约 37.80 g, 1 龄贝的年均湿重增长量约 14.69 g (图 3)。3 龄

贝在 2—4 月份湿重快速增长, 主要来自性腺发育带来湿重增加, 5 月产卵排精后, 湿重降低。

湿重增长实验数据与投放月份存在很好的相关性 (图 3), 呈现幂指数趋势, 以幂指数回归分析, 得到湿重与投放月份的关系式:

$$Y = 0.885\ 1 \times X^{1.278\ 1} \quad R^2 = 0.961\ 6,$$

$$df = 1\ 603, P < 0.01$$

式中, X 表示投放后的月份数, 如当年 8 月对应的 X 为 1, 9 月对应的 X 为 2, 依次类推, Y 表示壳长 (mm)。

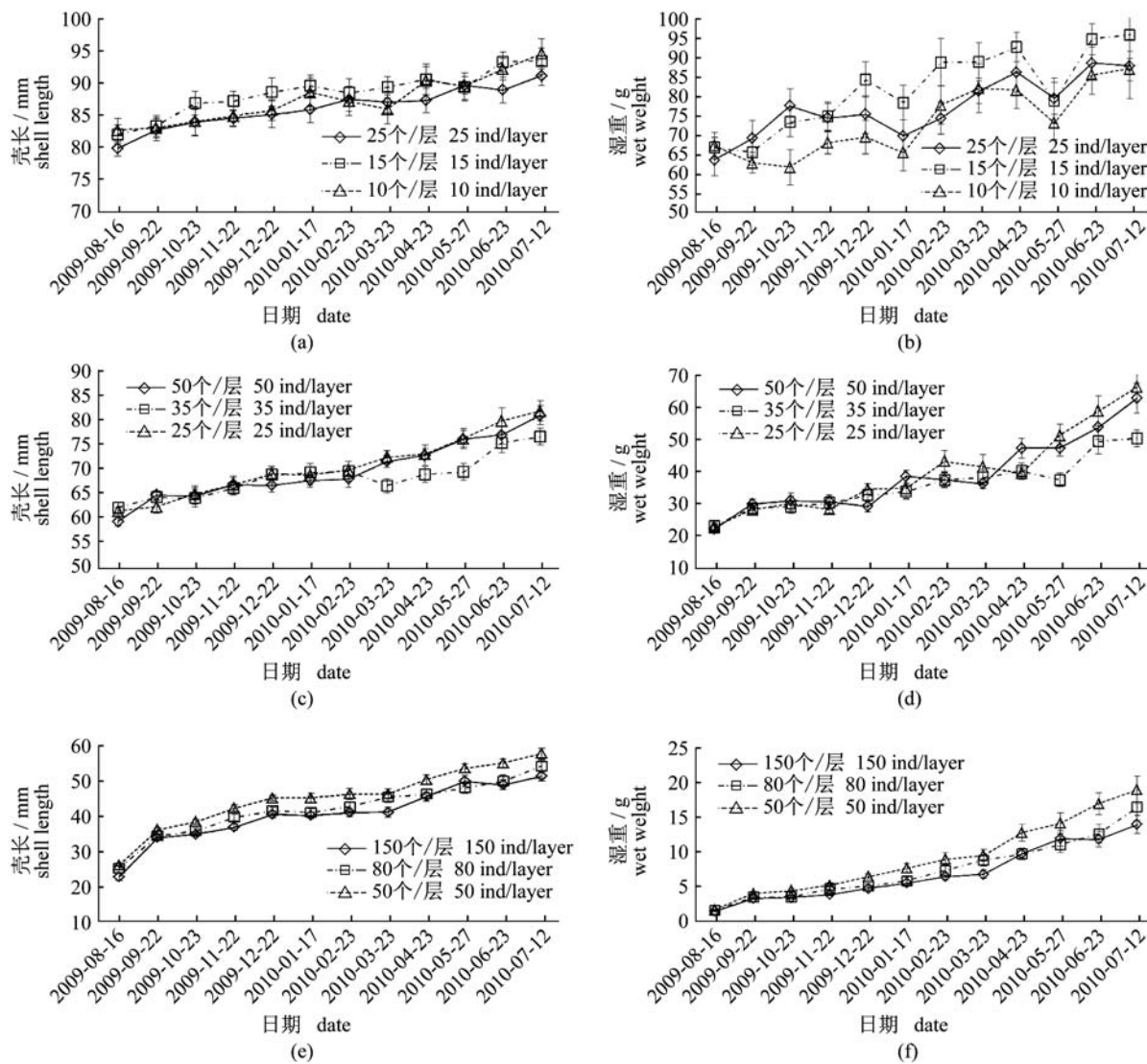


图 1 浮筏养殖虾夷扇贝周年壳长与湿重

a. 3 龄贝壳长; b. 3 龄贝湿重; c. 2 龄贝壳长; d. 2 龄贝湿重; e. 1 龄贝壳长; f. 1 龄贝湿重

Fig. 1 The anniversary growth of shell length and wet weight of *Patinopecten yessoensis* in raft culture

a. shell length of third-year scallop; b. wet weight of third-year scallop; c. shell length of second-year scallop; d. wet weight of second-year scallop; e. shell length of first-year scallop; f. wet weight of first-year scallop

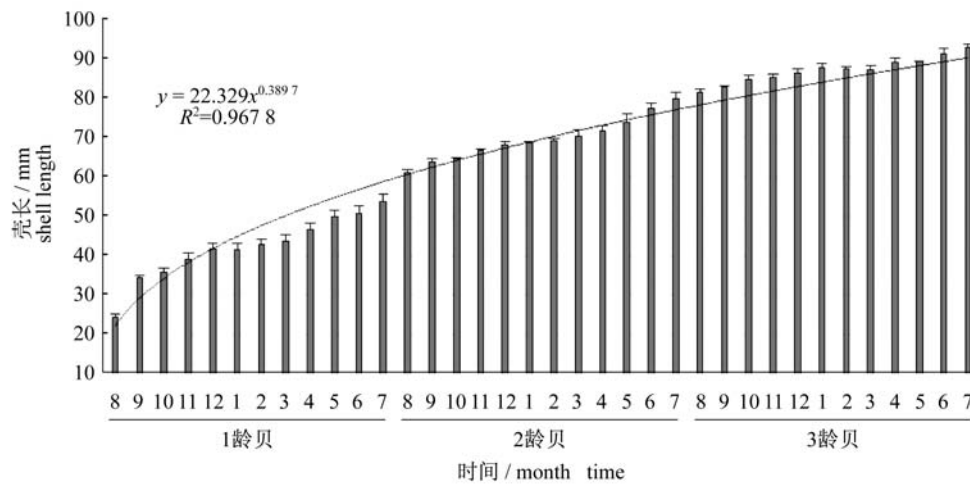


图2 实验海域虾夷扇贝调查样本壳长生长

Fig. 2 The shell length growth of survey samples in experimental sea area

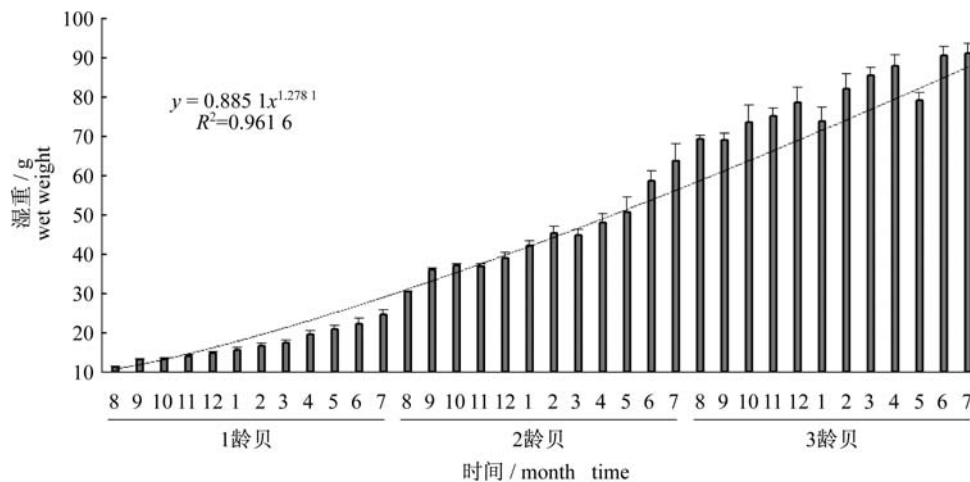


图3 实验海域虾夷扇贝调查样本湿重增长

Fig. 3 The wet weight growth of survey samples in experimental sea area

虾夷扇贝死亡率 3龄贝各养殖密度梯度之间累计死亡率都没有显著差异($P > 0.05$)。虾夷扇贝养殖密度为25个/层的年累计死亡率为77.78%,养殖密度为15个/层的年累计死亡率为76.30%,养殖密度为10个/层的年累计死亡率为83.33%。8—11月,3龄贝的死亡率较高,11—4月,3龄贝的死亡率较低(图4-a)。

2龄贝各养殖密度梯度之间累计死亡率都没有显著差异($P > 0.05$)。虾夷扇贝养殖密度为50个/层的年累计死亡率为91.78%,养殖密度为35个/层的年累计死亡率为90.79%,养殖密度为25个/层的年累计死亡率为88.89%。8—10月,2龄贝的死亡率高,10—5月,死亡率最低,5—7月死亡率略有上升(图4-b)。

养殖密度为150个/层的1龄贝累计死亡率与

养殖密度为80个/层和50个/层的1龄贝有显著差异($P < 0.05$)。养殖密度过大,导致了1龄贝养殖密度为150个/层的年累计死亡率为80.67%;养殖密度为80个/层的年累计死亡率为56.11%,养殖密度为50个/层的年累计死亡率为56.67%。1龄贝死亡率出现两低两高特点,在水温由高转低的8—11月和在水温最低的2—4月死亡率高,11—2月和5—7月份死亡率较低(图4-c)。

2.3 养殖密度估算

浮筏养殖笼中虾夷扇贝个体湿重 M (g)、总重 B (g)与养殖密度(枚/层)的关系:

$$M = 304.85 \times N^{-0.958}, \quad R^2 = 0.8241,$$

$$df = 134, \quad P < 0.01$$

$$B = 304.85 \times N^{0.042}$$

式中, M 为个体湿重(g), B 为虾夷扇贝的生物总

量(g), N 为养殖笼内每层养殖的虾夷扇贝数量。

自然稀疏模型确定的虾夷扇贝浮筏养殖密度3龄贝为4~5个/层;2龄贝为8~16个/层,1龄

贝为29~124个/层(表2)。由当年秋季到第2年夏季,1龄贝和2龄贝养殖密度快速下降,春季是3龄贝养殖密度最小的时期。

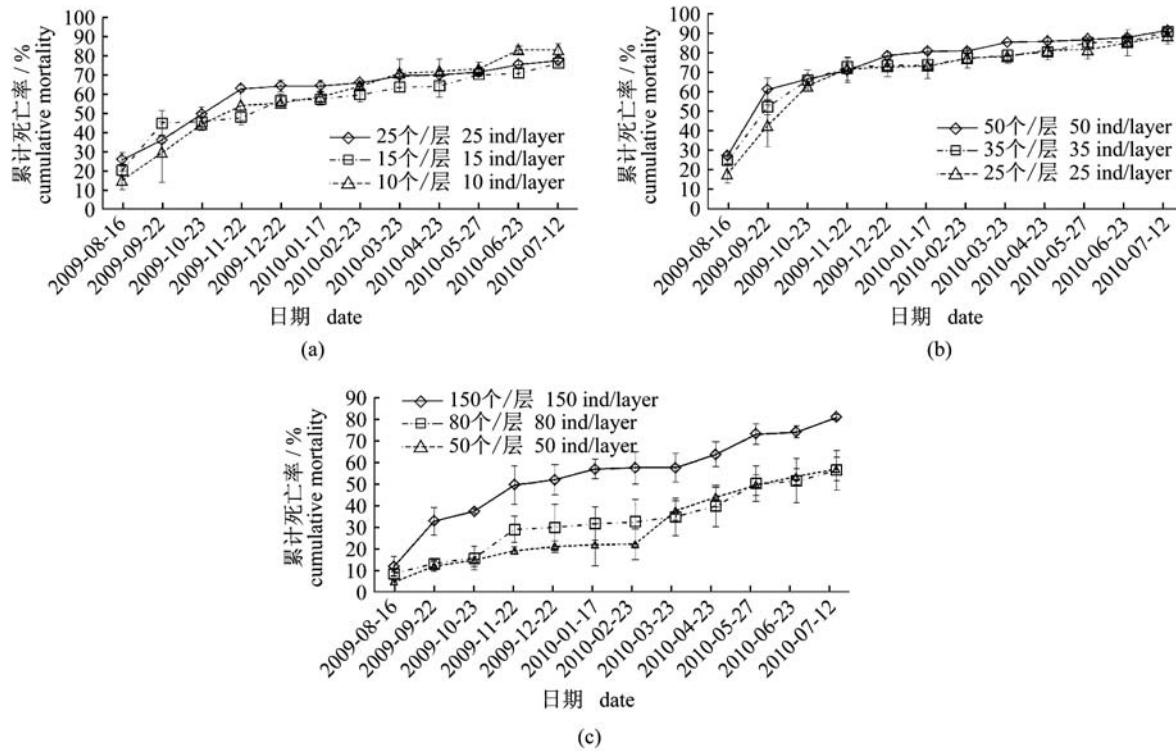


图4 实验海域虾夷扇贝调查样本累计死亡率

a. 3龄贝; b. 2龄贝; c. 1龄贝

Fig. 4 The cumulative mortality of survey samples in experimental sea area

a. the third-year scallop; b. the second-year scallop; c. the first-year scallop

表2 自然稀疏模型养殖密度评估
Tab. 2 The density assessment of raft culture in self-thinning model

	秋(9~11月) autumn	冬(12~2月) winter	春(3~5月) spring	夏(6~8月) summer
1龄贝 first-year scallop	124.44	67.10	49.30	29.25
2龄贝 second-year scallop	15.56	10.98	10.30	7.73
3龄贝 third-year scallop	5.14	4.95	4.28	5.01

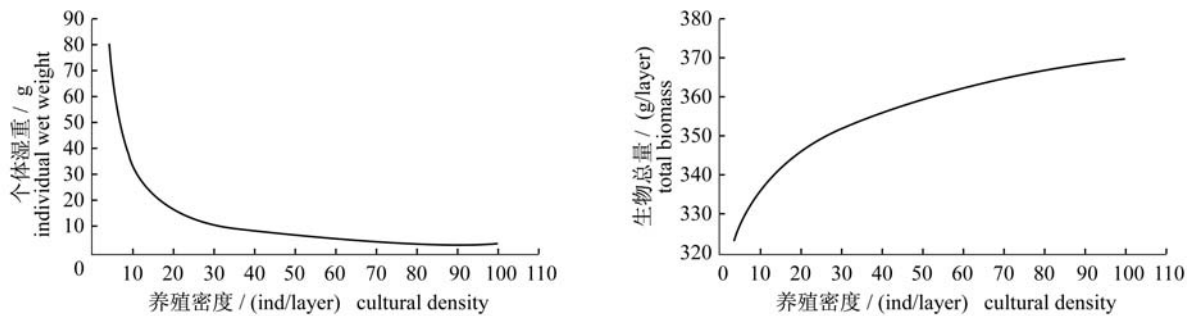


图5 个体湿重(M)、生物总量(B)与养殖密度(N)预测曲线

Fig. 5 The prediction curve among individual wet weight, total biomass and cultural density

3 讨论

养殖的虾夷扇贝在开放海域生长状况受到自然因素和人为因素的影响^[19],自然因素主要指环境条件,如水温、盐度和饵料生物等,人为因素主要包括养殖方式和管理模式,如养殖密度、分苗时间和浮筏间距等。虾夷扇贝属于冷水性双壳贝类,适宜的生长温度是5~20℃。有关虾夷扇贝生长温度限制的研究,张福绥院士早在1984年就撰文讨论虾夷扇贝在我国北方试养的情况,推断虾夷扇贝生长水温下限可能位于1.5~2℃,大连沿岸虾夷扇贝冬季会有一段时间停止生长^[20]。李华琳等^[3]研究2007年大连虾夷扇贝人工苗种(1龄贝)壳高生长,由于缺少1月份数据,没有较好体现出扇贝低水温生长状况。本研究采用壳长数据,分析了1、2、3龄贝的生长数据,基本结果为1—3月份水温处于-0.2~2.5℃,1、2龄贝壳长生长缓慢,1龄贝壳长生长2.12 mm,2龄贝壳长生长1.64 mm,3龄贝生长停滞,表明壳长生长停滞只是发生在3龄贝上,而1龄贝和2龄贝还是有一定程度的壳长生长。从湿重增长来看,虾夷扇贝的湿重在低温期增长还是较明显的,1龄贝增长2.01 g,2龄贝增长7.21 g,3龄贝增长12.82 g,尤其2龄贝和3龄贝增长明显。湿重的增长主要来源于虾夷扇贝的性腺发育^[21],在水温到达2.6℃就进入性腺成熟期,每年4—5月就进入虾夷扇贝繁殖季节。

大多学者采用壳高作为测量虾夷扇贝生长的指标。本研究之所以采用壳长数据主要基于以下2个原因:一是虾夷扇贝的壳顶在生产管理过程中很容易受损,导致测量壳高误差较大,相反贝壳前后缘受损较小,测量结果更能代表扇贝壳的生长情况;二是本研究虾夷扇贝的壳长和壳高呈极显著线性相关关系(壳高=1.0165×壳长, $R^2=0.9895$, $df=1612$, $P<0.01$),使用壳长数据可以与其它文献数据进行比较。

一般认为,贝类养殖密度过大,死亡率较高^[7-8]。但是何毛贤^[19]对马氏珠母贝(*Pinctada martensi*)和萧云朴等^[22]对虾夷扇贝的研究结果表明,养殖密度对死亡率(存活率)无显著影响($P>0.05$)。本研究结果显示,2龄贝、3龄贝各养殖密度与累计死亡率之间没有显著差异($P>0.05$),1龄贝养殖密度与累计死亡率之间出现显

著差异($P<0.05$)。养殖密度是影响死亡率的主要因素在1龄贝的密度梯度实验中得到很好的体现,如150个/层的死亡率约是其余2个密度梯度的2.5倍。研究发现,2龄贝和3龄贝高死亡率(>10%)集中在8—10月份,8月份水温最高,超出其耐受范围,摄食量低,死亡率增大;然后随着水温降低,扇贝开始大量摄食,叶绿素a(代表饵料生物量)由8月的4.66 μg/L降低到9—12月份的不足1 μg/L。由于浮筏养殖阻挡水流,再加上附着生物,实际上养殖笼中的叶绿素a浓度相对更低,直接限制扇贝获得足够的饵料生物,因此,虾夷扇贝高死亡率是环境因素和养殖方式共同作用的结果。在这种养殖模式下,3龄贝养殖密度10个/层已经超出极限。

自然稀疏现象是自然界存在的普遍规律,是群落生长的自我调节机能之一,已应用到许多密集型动植物种内竞争,种群动力学和群落结构的研究^[23]。但是在国内,自然稀疏效应对浮筏养殖虾夷扇贝的影响研究却鲜有报道。尽管国内外学者已经总结出扇贝大规模死亡的很多原因,但养殖密度过大,超过养殖环境容量是最直接的原因。为了避免初始投苗或分笼等人为造成的养殖密度与质量的误差,使计算结果能够更符合养殖实际情况,本研究选择浮筏养殖虾夷扇贝梯度实验中无死亡率或死亡率较低的月份的实验样本,分析浮筏养殖笼中虾夷扇贝个体湿重M(g)、总重B(g)与养殖密度(个/层)的关系,计算结果显示,根据养殖密度计算结果,秋季1龄贝养殖密度可为125个/层,但是到了冬季就要减少到67个/层,根据当地“秋动春不动”分苗做法,秋季分苗的密度可以介于冬季和春季之间,建议养殖密度为50~55个/层;养殖过程中及时降低养殖密度,2龄贝养殖密度控制在10~15个/层,才能保证较好的成活率;对于3龄贝要做到4~5个/层的养殖密度等待收获。

参考文献:

- [1] 王庆成. 虾夷扇贝的引进及其在我国北方培养前景[J]. 水产科学, 1984, 3(4): 24-27.
- [2] 高悦勉, 李国喜, 赵银丽. 大连沿海虾夷扇贝养殖群体遗传结构的研究[J]. 大连水产学院学报, 2004, 19(2): 142-145.
- [3] 李华琳, 李文姬, 张明, 等. 虾夷扇贝天然苗种与人工苗种养殖对比试验[J]. 水产科学, 2008, 27

- (10):539-542.
- [4] 滕炜鸣,李文姬,张明,等. 虾夷扇贝脓胞病病原的分离、鉴定与致病性[J]. 水产学报,2012,36(6):937-943.
- [5] 李文姬,谭克非. 日本解决虾夷扇贝大规模死亡的启示[J]. 水产科学,2009,28(10):609-612.
- [6] 于治宝,石永波. 之七: 虾夷扇贝健康养殖须重视的几个关键因素[J]. 中国水产,2005(5):62-63.
- [7] 于佐安,李文姬,张明,等. 大连市长海县虾夷扇贝养殖海区浮游病毒的丰度[J]. 水产学报,2011,35(6):911-917.
- [8] 张继红,方建光,王诗欢. 大连獐子岛海域虾夷扇贝养殖容量[J]. 水产学报,2008,32(2):236-241.
- [9] 李春燕,丁君,常亚青,等. 虾夷扇贝微卫星标记的分离及其养殖群体的遗传结构分析[J]. 中国水产科学,2009,16(1):39-46.
- [10] 杜兵,张义钧,单毅春,等. 北黄海底层冷水团的变化特征及其对外长山岛海区养殖扇贝死亡的影响[J]. 海洋通报,1996,15(4):17-28.
- [11] Grant J, Cranford P, Hargrave B, *et al.* A model of aquaculture biodeposition for multiple estuaries and field validation at blue mussel (*Mytilus edulis*) culture sites in eastern Canada [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2005, 62(6):1271-1285.
- [12] Plew D R, Stevens C L, Spigel R H, *et al.* Hydrodynamic implications of large offshore mussel farms [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005,30(1):95-108.
- [13] Christensen P B, Glud R N, Dalsgaard T, *et al.* Impacts of longline mussel farming on oxygen and nitrogen dynamics and biological communities of coastal sediments [J]. *Aquaculture*, 2003, 218(1-4),567-588.
- [14] Radiarta I N, Saitoh S I, Miyazono A. GIS-based multi-criteria evaluation models for identifying suitable sites for Japanese scallop (*Mizuhopecten yessoensis*) aquaculture in Funka Bay, southwestern Hokkaido, Japan [J]. *Aquaculture*, 2008, 284(1-4):127-135.
- [15] Longdill P C, Healy T R, Black K P. An integrated GIS approach for sustainable aquaculture management area site selection [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2008, 51(8-9):612-624.
- [16] Bacher C, Grant J, Hawkins A J S, *et al.* Modelling the effect of food depletion on scallop growth in Sungo Bay (China) [J]. *Aquat Living Resource*, 2003,16(1):10-24.
- [17] Fréchette M. Hierarchical structure of bivalve culture systems and optimal stocking density [J]. *Aquaculture International*, 2010,18(1):99-114.
- [18] Guíñez R. A review on self-thinning in mussels [J]. *Revista de Biología Marínay Oceanografía*, 2005, 40(1):1-6.
- [19] 何毛贤,张红玉,袁涛. 养殖密度、水层和养殖地点对马氏珠母贝选育群体生长存活的影响[J]. 热带海洋学报,2009,28(6):68-71.
- [20] 张福绥,何义朝,马江虎,等. 虾夷扇贝的引种、育苗及试养[J]. 海洋科学,1984,1(5):38-45.
- [21] 高悦勉,田斌,于永刚,等. 大连塔河湾海区虾夷扇贝的性腺发育与繁殖规律[J]. 大连水产学院学报,2007,22(5):335-339.
- [22] 萧云朴,陈舜,伍德瀛,等. 养殖密度对虾夷扇贝在浙江南麂海区生长的影响[J]. 南方水产,2009,5(5):1-7.
- [23] Guíñez R, Castilla J C. An allometric tridimensional model of self-thinning for a gregarious tunicate [J]. *Ecology*, 2001, 82(8):2331-2341.

Effects of self-thinning in the sea of raft culture of *Patinopecten yessoensis*

LIU Shuxi¹, CUI Jinyuan², LIN Yong^{1*}

(1. National Marine Environmental Monitoring Center, Key Laboratory for Ecological Environment in Coastal Areas, State of Ocean Academy, Dalian 116023, China;

2. Department of Postgraduate, Dalian Fisheries University, Dalian 116023, China)

Abstract: A field experiment of different density of three shellfish ages was carried out in the sea of raft culture of *Patinopecten yessoensis* in Changhai County from August 2009 to July 2010 to study the self-thinning effect and to estimate the optimal culture density using the monthly data of the growth of shell length, wet weight growth and cumulative mortality. No statistical difference was found in the anniversary shell length growth ($P > 0.05$) in different density for the surveyed scallop samples of every shellfish age. The shell length of the first-year scallop grew fastest with an average annual growth 29.53 mm, followed by 23.50 mm for the second-year shell growth and 15.47 mm for the third-year shell. The anniversary of wet weight growth was not significantly different ($P > 0.05$) either, the wet weight growth of the first-year scallop, the second-year and the third-year scallop were 14.69, 37.80 and 54.07 g, respectively. The difference in cumulative mortality of different density groups for second-year and third-year shellfish was not statistically significant ($P > 0.05$) with the third-year shellfish mortality ranging from 76.30% to 83.33% and the second-year shellfish mortality rate ranging from 88.89% to 91.78%. The cumulative mortality of the first-year scallop with cultural density of 150 ind/layer was significantly different ($P < 0.05$) from that of the density of 80 ind/layer and 50 ind/layer. Based on self-thinning model, the suitable raft breeding density is 4 – 5 ind/layer in third-year scallop, 8 – 16 ind/layer in second-year, 29 – 124 ind/layer in first-year, respectively.

Key words: *Patinopecten yessoensis*; self-thinning; cultural density

Corresponding author: LIN Yong. E-mail: ylin@nmemc.gov.cn