

文章编号: 1674 - 5566(2016)06 - 0918 - 09

DOI:10.12024/j.sou.20150901542

贻贝养殖海域表层水温季节变化及其对紫贻贝生长的影响

林 军^{1,2}, 邓明星¹, 章守宇¹, 闫 庆¹

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 国际海洋研究中心, 上海 201306)

摘 要: 为获知贻贝浮筏养殖海域表层(3 m)水温的季节变化规律及其对紫贻贝生长的影响, 实测多年枸杞岛贻贝养殖场表层水温, 并在一个养殖周期内分 7 航次采集紫贻贝样获取体质量、壳长等数据。结果显示, 观测期内最高、最低表层水温分别为 29.2 °C 和 4.6 °C。夏季表层水温日变幅可超过 4 °C, 而春季与秋季低于 2 °C。紫贻贝体质量与月龄的多项式回归方程为: $W = 0.000 6M^4 + 0.006 4M^3 - 0.132 6M^2 + 0.859 9M + 0.656 8$ ($R^2 = 0.999 1$)。紫贻贝壳长与月龄的多项式回归方程为: $L = 0.000 8M^4 + 0.057 7M^3 - 1.099 7M^2 + 7.536 6M + 20.044$ ($R^2 = 0.998 9$)。紫贻贝生长速率与水温呈指数关系, 其表达式为 $R_w = 0.102 8e^{0.119 57T}$ ($R^2 = 0.741 3$), 将翌年 3 月前后紫贻贝的生长速率与水温之间指数关系分段计算时相关性更高, 秋冬季为 $R_{w2} = 0.148 8e^{0.068 37T}$ ($R^2 = 0.936 0$), 春夏季为 $R_{w3} = 0.118 8e^{0.128 97T}$ ($R^2 = 0.993 2$)。紫贻贝壳长生长速率与水温呈指数关系, 其表达式为 $R_l = 0.548 3e^{0.104 37T}$ ($R^2 = 0.952 9$)。不同年份之间, 枸杞岛贻贝养殖场表层水温存在明显差异。春夏季是紫贻贝生长关键时期, 春夏季持续相对低温可影响紫贻贝的产量。对养殖海域的水温进行实时观测, 可获取水温变化动态, 以及时调整紫贻贝的养殖策略。

关键词: 水温; 季节变化; 贻贝养殖; 生态影响

中图分类号: S 968.3 **文献标志码:** A

贻贝 (*Mytilus* sp.) 俗称“青口”、“海红”, 其干制品称为“淡菜”, 是营养丰富的优质海产品, 且具有很好的药用和保健功效^[1-2]。世界上许多国家和地区, 如北欧、加拿大、澳大利亚和新西兰等^[3-6], 都有大规模养殖贻贝以满足人们对海产蛋白质的需求。我国是最大的贻贝生产国和出口国, 出产紫贻贝 (*Mytilus edulis*)、厚壳贻贝 (*Mytilus coruscus*)、翡翠贻贝 (*Perna viridis*) 等多种贻贝。其中, 紫贻贝肉质鲜美, 并以其适应能力强、养殖技术简单成熟、产量较高等优点^[7], 成为我国重要的贻贝养殖品种之一^[8], 在我国辽宁省、山东省和浙江省等沿海省份大量养殖^[9-10], 其年产量占全球一半左右^[11]。

贻贝是水生变温动物, 其生长与水温有着密切的关系。水生变温动物都有其增重最快的适宜温度^[12-14]。适宜的水温会加快贻贝的新陈代谢, 促进贻贝的生长; 过高或过低的水温则会减

缓贻贝的生长, 甚至导致其死亡。除了受水温的直接影响外, 因贻贝以滤食海水中的浮游生物和有机碎屑为生, 而水温是影响浮游生物量季节变化的重要因子, 间接影响着贻贝的生长。

我国普遍采用浮筏吊养的方式将贻贝养殖在表层水域^[15]。此养殖方式具有成本低廉、管理方便的优点, 同时也是一种开放的养殖方式。贻贝养殖在开放的自然海域中, 导致其所处的水温环境与季节更替有着很大关系。因此, 对贻贝养殖海域的表层水温进行长期观测, 探明表层水温季节变化对贻贝生长的影响具有重要的科学意义。本文以浙江嵊泗枸杞岛贻贝养殖场为例, 通过对养殖场表层水温进行多年观测获取的水温数据, 以分析枸杞岛贻贝养殖场表层水温的季节变化规律与年际差异; 通过定期测量一个养殖周期内紫贻贝体重数据, 对紫贻贝的生长曲线进行了拟合, 给出了相应的生长方程, 并以此分析水

收稿日期: 2015-09-05 修回日期: 2015-12-17

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费(201303047)

作者简介: 林 军(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为海洋环境与生态动力学和海洋生物学等。E-mail: jlin@shou.edu.cn

通信作者: 章守宇, E-mail: syzhang@shou.edu.cn

温对紫贻贝生长率的影响,以期为枸杞岛的贻贝养殖生产方式改良等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

枸杞岛位于长江口东南侧外海、浙江省嵊泗县马鞍列岛东部海域,附近海域水体肥沃、水流通畅^[16-17],适合贻贝人工养殖。枸杞岛拥有万亩贻贝养殖区,有着“贻贝之乡”的美誉。经过 40 多年的发展,贻贝养殖业已经成为当地重要的产业。至 2014 年底,全县贻贝养殖面积达 2.24 万亩,养殖产量及产值分别达 8.26 万吨和 1.82 亿元。

1.2 水温长期连续观测

水温长期观测使用了美国 Onset HOB0 制造的温度数据记录仪,型号为 UTBI-001 TidbiT V2,量程为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,分辨率为 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。观测频率设置为 1 h 记录一次水温数据。温度数据记录仪置于水下 3 m 处的贻贝养殖苗绳上。观测点 SS 位于枸杞岛南部贻贝养殖场,观测点 SN 位于枸杞岛北部贻贝养殖场(图

1)。于 2003 年 - 2007 年对 SS 站点进行水温观测;并于 2010 年 10 月 - 2011 年 7 月对站点 SS 和站点 SN 的表层水温进行了同步观测。由于受台风影响,造成温度记录仪的丢失,导致 2011 年 7 月中旬至 2011 年 8 月部分的水温数据缺失。

1.3 紫贻贝生长参数测定

枸杞岛北部贻贝养殖场拥有当地最大紫贻贝养殖区,在该养殖区内设置 9 个紫贻贝采样站点(图 1)。紫贻贝的养殖周期约为 1 年。在一个养殖周期内,对各站点紫贻贝进行 7 次采样,采样时间分别为 2010 年 9 月(放苗阶段)、2010 年 11 月(秋季)、2011 年 2 月(冬季)、2011 年 4 月与 2011 年 5 月(春季)、2011 年 6 月(夏季)、2011 年 8 月(收获阶段)。首次采样选取当地养殖专业合作社购买的同一批次紫贻贝苗种中的 40 个作为样品,测量体质量、壳长并取平均值作为放苗初始值。其余 6 次紫贻贝样品至养殖现场各站点采集,采样时随机选取 3 挂紫贻贝进行采样,自上而下于 0.5、1、1.5 m 处分别取宽度约 10 cm 紫贻贝样品^[18-20],带回实验室测量体质量、壳长。

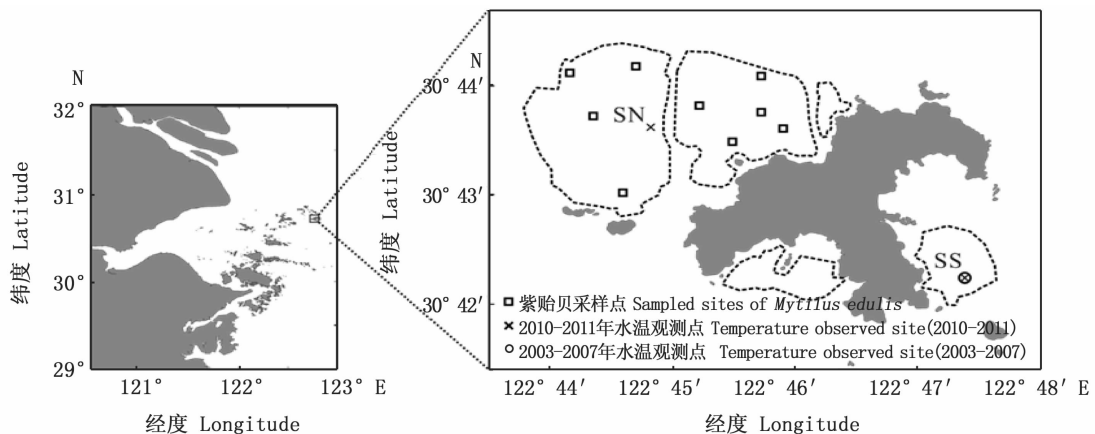


图 1 紫贻贝采样及水温观测站点

Fig. 1 Sites of blue mussel sampling and water temperature observation

1.4 数据处理

在 MATLAB 软件中对水温数据进行统计分析,得出多年水温极值、年平均水温、月平均水温等数据。在 MATLAB 下调用巴特沃斯(BUTTERWORTH)滤波器函数,设计高通滤波器与低通滤波器对水温进行滤波处理,分别提取高频成分与低频成分。

巴特沃斯高通滤波器和低通滤波器的 Matlab

代码分别为:

$$[B, A] = \text{BUTTER}(N, W_n, 'high'),$$

$$[B, A] = \text{BUTTER}(N, W_n, 'low')$$

式中: N 为数据点数; W_n 为截止频率,文中所用数据时间单位为天,取 $W_n = 0.6$ 用于截止半日周期的数据;‘high’为截取高于 W_n 频率的水温数据;‘low’为截取低于 W_n 频率的水温数据。

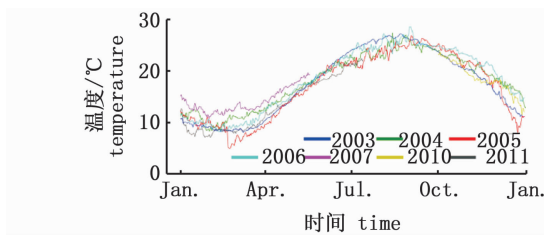
对紫贻贝生物学数据进行统计分析,得出每

次采集的紫贻贝样品平均体质量。在 MATLAB 下用 4 次多项式模型对一个养殖周期内紫贻贝体重的生长规律进行拟合^[21],并计算出每月中旬紫贻贝生长速率。通过对生长速率与月平均水温进行回归分析,得到枸杞岛海域水温与养殖贻贝生长速率的关系。

2 结果

2.1 南部养殖场水温年际差异

南部贻贝养殖场表层水温时间序列如图 2 所示。使用 Butterworth 低通滤波器和高通滤波器对南部贻贝场表层水温进行滤波处理获取水温季节和日变化时间序列,滤波结果见图 3。不同年份之间南部养殖场表层水温存在明显差异,其中冬季与春季表层水温差异最为明显。比较



突出的年份有 2005 年、2007 年。2005 年 2 月期间,表层水温有一次明显的骤降过程,短时间内温差近 5 °C,是观测期间表层水温变化幅度最大的一次。水温骤降之后,2005 年春季枸杞岛南部养殖场表层水温持续偏低。2007 年 1 月 - 2007 年 5 月表层水温明显高于其他年份,与 2005 年相比,对应时间最大水温差约 7 °C。

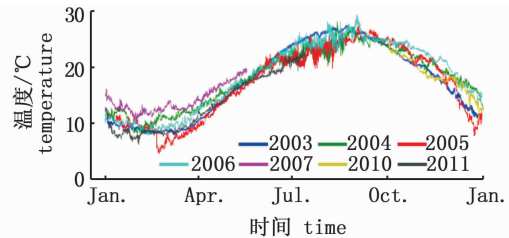


图 2 南部贻贝养殖场水温时间序列
Fig. 2 Water temperature time-series of site in the southern mussel farms

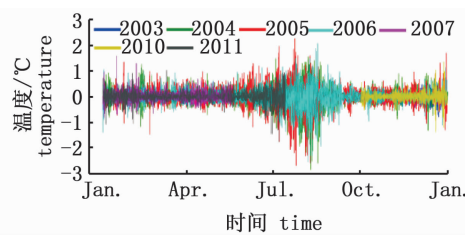


图 3 水温时间序列低通滤波(左图)和高通滤波(右图)

Fig. 3 Low-pass filtered and high-pass filtered time-series of the water temperature

对 2003 年 1 月 - 2007 年 5 月与 2010 年 10 月 - 2011 年 7 月中旬南部养殖场的水温数据进行统计分析(表 1)。枸杞岛南部养殖场历年最高水温为 29.2 °C,最低水温为 4.6 °C。多年平均水温为 17.8 °C;多年极值变幅为 24.6 °C。多年平均最高水温为 28.1 °C,多年平均最低水温为 7.1 °C。多年最低水温相差为 3.3 °C,多年最高水温相差 1.8 °C,多年平均水温相差 1.4 °C。2003 年最低水温出现在 3 月,2004 年 - 2006 年最低水温均出现在 2 月;2003、2004 年最高水温均出现在 8 月,2005、2006 年最高水温均出现在 9 月。

2.2 水温的年内变化规律

贻贝养殖场表层水温存在明显的季节性变化。春夏季水温逐渐升高,秋冬季水温逐渐降低。夏季表层水温日变幅最大,尤其是在 7 月与 8 月,水温日变幅可超过 4 °C;冬季次之,水温日变幅约在 2 °C - 3 °C 以内;春季与秋季水温日变

幅低于 2 °C。

表 1 贻贝养殖场水温年极值统计表

Tab. 1 Yearly extreme temperature of the southern mussel farms

年份 year	最低水温 minimum temperature	最高水温 maximum temperature	平均水温 mean temperature
2003	7.9	27.5	17.5 ± 6.5
2004	8.1	28.2	18.2 ± 5.3
2005	4.6	27.4	17.1 ± 6.4
2006	7.7	29.2	18.5 ± 6.1
2003 - 2006	4.6	29.2	17.8 ± 6.1

对 2003 - 2011 年贻贝养殖场水温数据进行统计,计算出各个月份的月平均水温数据,如表 1 所示。南部养殖场表层月平均水温变化的整体趋势相同,均先后经历水温降低、水温回升、水温再次降低 3 个阶段,但各阶段对应的时间并不完全相同。其中,2003 年、2004 年和 2006 年月平均

水温最高的月份出现在 8 月,分别为 26.6 °C、25.1 °C 和 25.9 °C;月平均水温最低的月份出现在 2 月,分别为 8.6 °C、9.9 °C 和 9.0 °C。2005 年平均水温最高的月份与平均水温最低的月份较 2003、2004 和 2006 年均向后推迟一个月,分别为 25.5 °C 和 7.9 °C。不同年份之间冬季、春季月平均水温相差较大,其中 2005 年 3 月与 2007 年 3 月的月平均水温相差最大,为 4.2 °C。2003 - 2007 年期间,2005 年春夏季月平均水温相对于其

他年份均偏低。

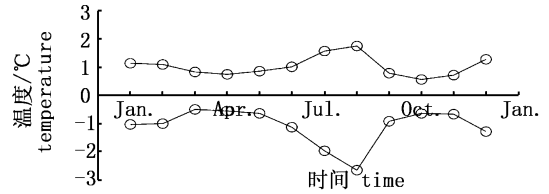


图 4 2003 年 - 2011 年表层水温日变幅月平均值
Fig. 4 The monthly mean daily variation of surface water temperature from 2003 to 2011

表 2 2003 - 2011 年枸杞岛贻贝养殖场月平均水温
Tab. 2 Monthly mean temperature of the south mussel farms from 2003 to 2011 °C

年份 year	SS 站点					SN 站点		平均水温 mean temperature	最大年较差 maximum annual range	
	2003	2004	2005	2006	2007	2010	2011			
Jan.	9.6 ± 0.5	11.0 ± 1.3	10.4 ± 0.8	10.3 ± 0.6	12.9 ± 1.1		8.5 ± 1.3	8.5 ± 1.0	10.5 ± 1.3	4.0
Feb.	8.6 ± 0.3	9.9 ± 1.0	8.1 ± 1.8	9.0 ± 0.5	12.1 ± 0.5		8.3 ± 0.4	8.3 ± 0.3	9.4 ± 1.2	4.0
Mar.	9.0 ± 0.6	11.7 ± 0.6	7.9 ± 0.9	10.3 ± 1.0	13.1 ± 0.6		9.3 ± 0.8	9.1 ± 0.6	10.2 ± 1.6	4.2
Apr.	12.6 ± 1.3	14.5 ± 1.0	12.2 ± 1.6	14.0 ± 0.9	15.9 ± 1.1		10.7 ± 2.2	12.9 ± 0.9	13.7 ± 1.3	3.7
May	17.4 ± 1.2	17.8 ± 1.1	16.7 ± 1.4	17.9 ± 1.0	18.5 ± 0.64		16.9 ± 0.9	16.8 ± 0.8	17.6 ± 1.0	1.8
Jun.	21.9 ± 1.4	21.2 ± 0.9	20.9 ± 0.9	21.3 ± 1.2				19.5 ± 0.9	21.0 ± 1.1	2.4
Jul.	25.2 ± 0.7	22.9 ± 1.0	22.3 ± 1.3	24.3 ± 0.7				21.6 ± 0.4	23.7 ± 1.3	2.9
Aug.	26.6 ± 0.3	25.1 ± 1.5	24.3 ± 0.9	25.9 ± 1.1					25.5 ± 1.0	2.3
Sep.	25.1 ± 0.8	24.6 ± 0.5	25.5 ± 0.6	25.4 ± 1.1					25.1 ± 0.4	0.9
Oct.	21.8 ± 1.1	22.6 ± 0.6	23.2 ± 1.4	24.0 ± 0.5		21.9 ± 3.3	21.9 ± 0.8		22.7 ± 1.1	2.2
Nov.	18.5 ± 1.4	19.9 ± 0.9	20.1 ± 1.6	21.6 ± 0.9		18.2 ± 0.6	18.2 ± 0.5		19.7 ± 1.4	3.1
Dec.	13.3 ± 1.6	16.6 ± 1.4	12.7 ± 2.9	16.6 ± 1.5		15.6 ± 2.0	15.6 ± 1.7		15.0 ± 2.1	3.9

2.3 南北贻贝场水温比较

枸杞岛南部与北部养殖场表层水温时间序列如图 5 所示。同步观测期间,南部养殖场与北部养殖场表层水温变化的趋势几乎完全相同,且同一月份南部养殖场表层水温通常稍高于北部养殖场,表层月平均水温最大温差仅在 0.4 °C 以内。

2.4 贻贝生长与水温的关系

一个养殖周期内,紫贻贝平均体质量增长了 10.32 g,壳长增长了 37.53 mm。紫贻贝体质量增长最快的阶段出现在夏季,7、8 月紫贻贝体质量平均月增长可达 2.52 g。紫贻贝壳长增长最快的阶段出现在夏季与秋季,壳长平均月增量均超过 5 mm(表 3)。

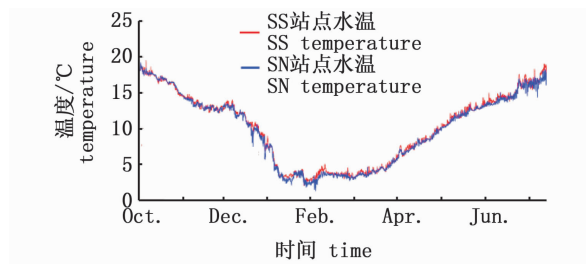


图 5 2010 年 10 月 - 2011 年 7 月 SS 与 SN 站点水温时间序列
Fig. 5 Temperature time-series of the Site SS and SN from Oct. 2010 to Jul. 2011

表 3 紫贻贝体质量、壳长生长规律

Tab. 3 The weight and shell length growth regulation of blue mussel

时间 time	月龄/月 monthly age	体质量/g weight	壳长/mm shell length
2010. 9	0	0.65 ± 0.16	20.10 ± 1.83
2010. 11	2	1.93 ± 0.55	30.99 ± 2.65
2011. 2	5	2.76 ± 0.54	38.40 ± 2.77
2011. 4	7	3.70 ± 0.68	40.10 ± 2.55
2011. 5	8	4.87 ± 0.91	42.20 ± 2.30
2011. 6	9	5.93 ± 0.96	46.38 ± 3.10
2011. 8	11	10.97 ± 1.62	57.62 ± 3.18

根据一个生长周期内紫贻贝体质量、壳长的变化规律,分别拟合了紫贻贝体质量、壳长与月龄的多项式回归方程。紫贻贝体质量与月龄多项式回归方程为:

$$W = 0.0006M^4 + 0.0064M^3 - 0.1326M^2 + 0.8599M + 0.6568, R^2 = 0.9991 \quad (1)$$

紫贻贝壳长与月龄多项式回归方程为:

$$L = 0.0008M^4 + 0.0577M^3 - 1.0997M^2 + 7.5366M + 20.044, R^2 = 0.9989 \quad (2)$$

式中: W 为体质量(g); L 为壳长(mm); M 为月龄(month); R 为相关系数。对紫贻贝体质量与月龄的多项式回归方程进行求导,得到紫贻贝体质量生长速率与月龄关系的方程:

$$R_w = 0.0024M^3 + 0.0192M^2 - 0.2652M + 0.8599 \quad (3)$$

对紫贻贝壳长与月龄的多项式回归方程进行求导,得到紫贻贝壳长生长速率与月龄关系的方程:

$$R_L = 0.0032M^3 + 0.1731M^2 - 1.0997M + 7.5366 \quad (4)$$

式中: R_w 为体重生长速率(g/month); R_L 为壳长

生长速率(mm/month); M 为月龄(month)。

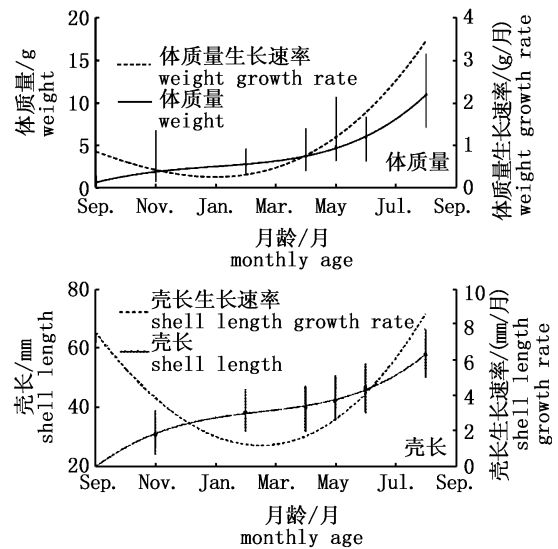


图6 体质量和壳长生长速率随时间的变化

Fig. 6 Growth rate variation with time

根据方程(3)、方程(4),得到紫贻贝体质量和壳长每日生长速率,并计算出紫贻贝每月的平均体质量生长速率和平均壳长生长速率,见表4。

表4 紫贻贝生长速率
Tab.4 The growth rate of blue mussel

时间 time	2010.10 -2011.8月平均水温/℃ monthly mean temperature from October 2010 to August 2011	体质量生长速率/(g/month) weight growth rate	壳长生长速率/(mm/month) shell length growth rate
10月	21.9 ± 0.8	0.730	5.54
11月	18.2 ± 0.5	0.519	3.94
12月	15.6 ± 1.7	0.360	2.65
翌年1月	8.5 ± 1.0	0.274	1.77
翌年2月	8.3 ± 0.3	0.277	1.31
翌年3月	9.1 ± 0.6	0.389	1.29
翌年4月	12.9 ± 0.9	0.617	1.74
翌年5月	16.8 ± 0.8	0.977	2.66
翌年6月	19.5 ± 0.9	1.483	4.08
翌年7月	21.6 ± 0.4	2.151	6.02
翌年8月	25.5 ± 1.0	2.994	7.86

注:由于2011年8月水温数据缺失,此处采用多年月平均水温数据

Note: For the absence of observed data in August 2011, the annually mean water temperature was displaced here

从整个养殖周期来看,紫贻贝体质量生长速率、壳长生长速率和水温均呈现先降后增的变化趋势。当温度升高时,紫贻贝体质量、壳长生长速率均加快;反之,当温度降低时紫贻贝生长速率随之降低。鉴于南部、北部贻贝养殖场水温差异较小,本文将北部贻贝场紫贻贝生长速率与对应月份贻贝养殖场多年月平均水温进行回归分析。

紫贻贝体质量生长速率与水温呈指数关系,其表达式为:

$$R_w = 0.1218e^{0.1062T}, R^2 = 0.7413 \quad (5)$$

式中: R_w 为紫贻贝生长速率(g/month), T 为温度(℃), R 为相关系数。10月至翌年2月,紫贻贝体质量生长速率随温度降低呈现逐步减缓的趋势,这一阶段紫贻贝生长速率与水温呈指数关系,其表达式为:

$$R_{w1} = 0.1488e^{0.0683T}, R^2 = 0.9360 \quad (6)$$

式中: R_{w1} 为10月至翌年2月紫贻贝生长速率(g/month), T 为温度($^{\circ}\text{C}$), R 为相关系数。翌年3月至翌年的8月,紫贻贝生长速率随水温升高而迅速加快,这一阶段紫贻贝体重生长速率与温度同样呈指数关系,其表达式为:

$$R_{w2} = 0.1188e^{0.1289T}, R^2 = 0.9932 \quad (7)$$

式中: R_{w2} 为翌年3月至翌年8月紫贻贝体重生长速率(g/month), T 为温度($^{\circ}\text{C}$), R 为相关系数。

紫贻贝壳长生长速率与水温呈指数关系,其表达式为:

$$R_L = 0.5483e^{0.1043T}, R^2 = 0.9529 \quad (8)$$

式中: R_L 为紫贻贝壳长生长速率(mm/month), T 为温度($^{\circ}\text{C}$), R 为相关系数。

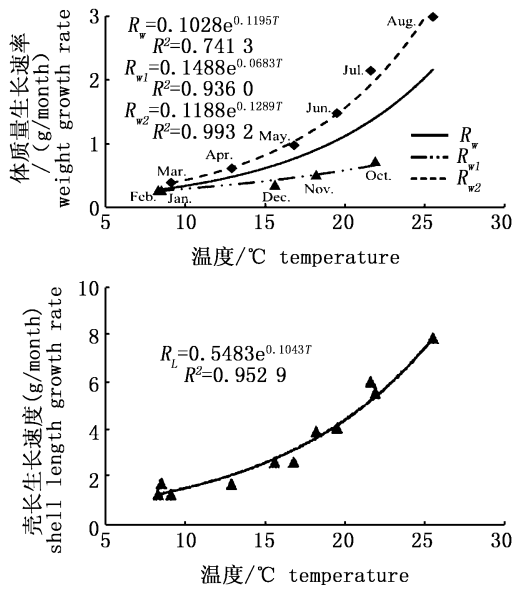


图7 体质量和壳长生长速率与水温的关系
Fig.7 The relationship between growth rate and water temperature

根据前文拟合所得水温与生长速率的关系,2006年与2007年春季紫贻贝生长速率要明显高于2005年,春季体质量生长速率最大相差约0.34 g/month,夏季体质量生长速率最大相差约0.62 g/month。

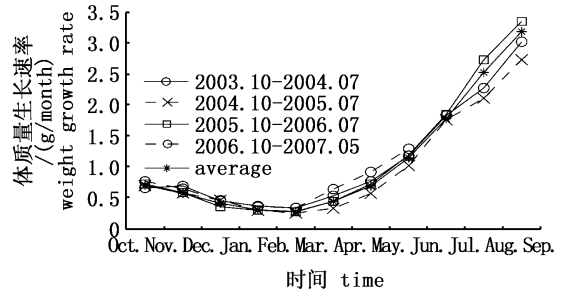


图8 紫贻贝体质量生长速率年间差异
Fig.8 The difference of weight growth rate in different years

3 讨论

3.1 枸杞岛紫贻贝养殖的区位优势

PAZ-ANDRATE 指出西班牙的紫贻贝在 $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 的水温下更适合生长^[22]; CHRISTINA KITTNER 研究发现在一定温度范围内,紫贻贝的滤水率与温度($4.6 \sim 20^{\circ}\text{C}$)之间呈线性关系,水温越高紫贻贝滤水率越高^[23];本文研究表明枸杞岛养殖的紫贻贝在水温较低的冬季生长极其缓慢,而在水温较高的春夏季生长较快。这些研究结果均表明较低的水温可限制紫贻贝的生长。枸杞岛表层海水温度在 10°C 以下仅约2个月, 5°C 以下鲜有发生。胶州湾和烟台是我国传统紫贻贝海域。胶州湾水温 10°C 以下约4.5个月, 5°C 以下约2.5个月;烟台水温 10°C 以下约5.5个月, 5°C 以下约3个月^[24]。相比这些海域,枸杞岛海域表层海水低温期较短,紫贻贝缓慢生长时期较短,较我国北方海域更为适合进行紫贻贝的养殖。枸杞岛夏季最高的平均水温为 25.5°C ,同样较南方低纬度海区是个区位优势。

3.2 紫贻贝生长的季节差异

一个养殖周期内紫贻贝的体质量与壳长增长速率先减缓后加快,与水温的变化趋势相近。不同的季节水温对紫贻贝壳长增长速率的影响相近,而对紫贻贝体质量增长速率的影响却存在差异。紫贻贝通过利用海水中的 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 离子形成以 CaCO_3 为主要成分的外壳,而海水中 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 离子变化并不大,导致紫贻贝外壳的生长主要受自身新陈代谢影响。在相同的水温环境下,季节变化对紫贻贝壳长生长率的影响相

近。与紫贻贝形成外壳的机制不同,紫贻贝软体部滤食水体中的硅藻、部分赤潮种和有机碎屑,导致其软体部形成受限于紫贻贝个体大小(口器大小)、饵料丰度等。水温可影响紫贻贝新陈代谢,亦可影响水体中浮游植物的生长与繁殖,间接影响紫贻贝生长。根据林军^[26]的长江口甲藻、硅藻温度生长限制函数,结合枸杞岛多年月平均水温结果,绘制出甲藻、硅藻生长限制随水温变化的关系曲线(图9)。可见在不同季节,硅藻、甲藻的生长受到不同程度限制。冬季较低的水温使硅藻、甲藻的生长受到很大限制,使紫贻贝饵料短缺,不利紫贻贝生长;春夏季水温较高,硅藻、甲藻的生长受水温限制较小,紫贻贝饵料丰富,利于紫贻贝生长。秋冬季节紫贻贝受限于个体大小与饵料来源,加之滤食能力有限且只能利用粒径较小的有机颗粒,其软体部生长缓慢;春夏季节随着紫贻贝生长与饵料逐渐丰富,其滤食及对有机颗粒利用能力增强,其软体部可快速生长。

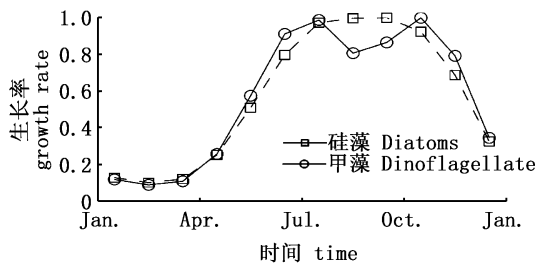


图9 温度对甲藻、硅藻生长的限制

Fig. 9 Growth rate limited by temperature

个体变大与饵料丰度提高是导致在相同的水温环境下,翌年3月之后紫贻贝体质量生长速率明显高于3月之前。这也说明紫贻贝在翌年3月的时候发生生长转折。邹李昶等提出枸杞岛海域养殖紫贻贝的生长转折点为4月,4月之前生长缓慢,4月之后生长加速^[27],与本文结果相差一个月左右,但均表明春夏季是紫贻贝体质量保持高速增长的重要季节。

3.3 水温年际差异对紫贻贝生长的影响

统计结果显示,不同年份月平均水温有一定差异,其中以冬季和春季最为明显,月平均水温最大年温差大于3℃的月份均出现在冬季与春季。秋冬季紫贻贝生长缓慢,体重生长差异较小,而春夏季是紫贻贝生长的关键时期,在这一

时期水温偏低会影响紫贻贝的最终产量。该海域观测结果显示,2003-2007年期间,2005年春夏季月平均水温相对于其他年份均偏低,是春夏季水温偏低的典型年份。春夏季偏低的水温一方面可直接减缓紫贻贝的新陈代谢速率影响紫贻贝生长,另一方面也可抑制浮游植物生长与繁殖,限制紫贻贝饵料来源,间接影响紫贻贝生长。有研究表明2005年春季水温偏低可能是引起原甲藻等赤潮推迟发生的主要原因^[28],这会造成紫贻贝饵料量偏低,并最终导致紫贻贝的产量偏低。

当春夏季表层水体的持续偏低温时,建议适当延迟贻贝收获时间以弥补紫贻贝产量的下降。以2005年为例,根据前文拟合的水温与紫贻贝体质量生长的关系,发现按正常时间收获,该年出产紫贻贝个体会比在多年平均水温环境下出产个体轻约1.26g,如果推迟收割时间,根据2005年9月平均水温环境下的估算,至少需要继续养殖约12d才能弥补这部分差异。笔者建议对养殖海域的水温进行实时观测,以获取水温动态变化的情况,警惕春夏季水温偏低现象的影响。

4 结论

枸杞岛海域表层海水低温期较短,相对传统的北方紫贻贝养殖海域有明显优势。该海域不同年份水温变化规律大致相同,呈秋冬季下降、春夏季上升的趋势。同一月份不同年份之间的水温存在明显差异,其中冬季与春季尤为突出。3月是枸杞岛养殖海域一个养殖周期内紫贻贝的生长转折点,3月之前紫贻贝生长较为缓慢,体质量生长速率与水温关系为 $R_{m1} = 0.1488e^{0.06837}$ ($R^2 = 0.9360$),3月之后紫贻贝生长较为迅速,体质量生长速率与水温关系为 $R_{m2} = 0.1188e^{0.12897}$ ($R^2 = 0.9932$)。春夏季是紫贻贝保持高速增长的重要季节,建议对养殖海域的水温进行实时观测,获取水温变化动态,警惕春夏季水温偏低现象对紫贻贝产量的影响,以及时调整紫贻贝的养殖策略。

感谢上海海洋大学陈清满提供的部分紫贻贝生物学数据和浙江海洋水产研究所王伟定研究员提供的部分枸杞岛表层水温数据。

参考文献:

- [1] 李江滨, 黄迪南. 贻贝的药用价值研究进展[J]. 水产科学, 2004, 23(11): 43-44.
- LI J B, HUANG D N. A review: pharmaceutical values of mussel[J]. Fisheries Science, 2004, 23(11): 43-44.
- [2] 苏秀榕, 李太武, 丁明进. 紫贻贝和厚壳贻贝营养成分的研究[J]. 中国海洋药物, 1998(2): 30-32.
- SU X R, LI T W, DING M J. Studies on the nutritive contents of the mussel *Mytilus edulis* and *Mytilus coruscus* [J]. Chinese Journal of Marine Drugs, 1998(2): 30-32.
- [3] HICKMAN R W. Sources of seed for green mussel farming in New Zealand [J]. Cuad Area Cienemar Semin Estud Galegos, 1992(6): 60-68.
- [4] LASIAK T A, UNDERWOOD A J, HOSKIN M. An experimental assessment of the potential impacts of longline mussel farming on the infauna in an open coastal embayment [J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2006, 16(3): 289-300.
- [5] LINDAHL O, HART R, HERNROTH B, et al. Improving marine water quality by mussel farming: a profitable solution for Swedish society [J]. Ambio, 2005, 34(2): 131-138.
- [6] TROTTEY A, ROY S, TAMIGNEAUX E, et al. Influence of suspended mussel farming on planktonic communities in Grande-Entrée Lagoon, Magdalen Islands (Québec, Canada) [J]. Aquaculture, 2008, 276(1/4): 91-102.
- [7] 孟庆良. 贻贝养殖与加工技术 [J]. 齐鲁渔业, 2005, 22(9): 6.
- MENG Q L. Mussel farming and processing technology [J]. Shandong Fisheries, 2005, 22(9): 6.
- [8] 刘庆余. 紫贻贝养殖的环境容纳量问题 [J]. 水产科学, 1993, 12(9): 15-17.
- LIU Q Y. Environmental capacity of Mussel (*Mytilus edulis*) farming [J]. Fisheries Science, 1993, 12(9): 15-17.
- [9] 宋传文, 闫喜武, 桑士田, 等. 紫贻贝生长性状的遗传力估计 [J]. 水产学报, 2013, 37(2): 201-206.
- SONG C W, YAN X W, SANG S T, et al. Estimates for the heritability of growth of *Mytilus edulis* [J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(2): 201-206.
- [10] 李宏俊, 梁瑜, 邢坤, 等. 紫贻贝 EST-SNP 的筛选及多态性检测 [J]. 水产学报, 2011, 35(3): 348-355.
- LI H J, LIANG Y, XING K, et al. Development of single nucleotide polymorphism markers for blue mussel (*Mytilus galloprovincialis*) using expressed sequence tags [J]. Journal of fisheries of China, 2011, 35(3): 348-355.
- [11] 毛玉英, 陈玉新, 冯志哲. 紫贻贝营养成份分析 [J]. 上海水产大学学报, 1993, 2(4): 220-223.
- MAO Y Y, CHEN Y X, FENG Z Z. Analysis of nutritive composition in *Mytilus edulis* [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 1993, 2(4): 220-223.
- [12] 崔绍荣, 苗欣, 章开训. 水生变温动物最优养殖水温的快速测定 [J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 165-167.
- CUI S R, MIAO X, ZHANG K X. The speedy test to identify optimal growth temperature for aquatic-poikilothermal animals [J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(2): 165-167.
- [13] 陈勇, 高峰, 刘国山, 等. 温度、盐度和光照周期对刺参生长及行为的影响 [J]. 水产学报, 2007, 31(5): 687-691.
- CHEN Y, GAO F, LIU G S, et al. The effects of temperature, salinity and light cycle on the growth and behavior of *Apostichopus japonicus* [J]. Journal of Fisheries of China, 2007, 31(5): 687-691.
- [14] 黄宁宇, 夏连军, 么宗利. 养殖密度和温度对白斑狗鱼在设施养殖中生长的影响 [J]. 水产学报, 2006, 30(1): 76-80.
- HUANG N Y, XIA L J, YAO Z L. The influence of stocking density and water temperature on growth in juvenile *Esox lucius* raised in greenhouse [J]. Journal of Fisheries of China, 2006, 30(1): 76-80.
- [15] 刘镇昌, 张玉莲, 刘全良. 我国贻贝养殖技术装备的现状、问题与发展方向 [J]. 渔业现代化, 2005(4): 5-7.
- LIU C Z, ZHANG Y L, LIU Q L. Present situation, problems and development direction of mussel farming technology and equipment in China [J]. Fishery Modernization, 2005(4): 5-7.
- [16] 林军, 章守宇. 枸杞岛养殖海域流场环境改造的数值模拟 [J]. 上海水产大学学报, 2003, 12(2): 140-145.
- LIN J, ZHANG S Y. A numerical simulation of environment improvement in the aquaculture sea area of Gouqi Island [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2003, 12(2): 140-145.
- [17] 章守宇, 汪振华, 林军, 等. 枸杞岛海藻场夏、秋季的渔业资源变化 [J]. 海洋水产研究, 2007, 28(1): 45-52.
- ZHANG S Y, WANG Z H, LIN J, et al. Variation of fisheries resources in summer and autumn in seaweed beds of Gouqi Island [J]. Marine Fisheries Research, 2007, 28(1): 45-52.
- [18] GANGNERY A, BACHER C, BUESTEL D. Assessing the production and the impact of cultivated oysters in the Thau Lagoon (Mediterranee, France) with a population dynamics model [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2001, 58(5): 1012-1020.
- [19] GAREN P, ROBERT S, BOUGRIER S. Comparison of growth of mussel, *Mytilus edulis*, on longline, pole and bottom culture sites in the Pertuis Breton, France [J]. Aquaculture, 2004, 232(1/4): 511-524.
- [20] VAN DER VEER H W, ALUNNO-BRUSCIA M. The DEBIB project: dynamic energy budgets in bivalves [J]. Journal of Sea Research, 2006, 56(2): 81-84.
- [21] 孔宁. 长牡蛎生长性状遗传参数估测及生长模型的建立 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- KONG N. Heritability estimates for growth-related traits and establishment of growth model in the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) [D]. Qingdao: Ocean University of

- China, 2012.
- [22] PAZ-ANDRATE A, WAUGH G D. Raft cultivation of mussels is big business in Spain[J]. *World Fishing*, 1968, (3): 50-52.
- [23] KITTNER C, RIISGÅRD H U. Effect of temperature on filtration rate in the mussel *Mytilus edulis*: no evidence for temperature compensation[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 305: 147-152.
- [24] 张福绥, 何义朝, 李淑英, 等. 胶州湾贻贝的生长[J]. *水产学报*, 1981, 5(2): 133-146.
ZHANG F S, HE Y C, LI S Y, et al. Observations on the growth of mussels in Jiaozhou Wan[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1981, 5(2): 133-146.
- [25] 林军. 长江口外海域浮游植物生态动力学模型研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
LIN J. A modeling study of the phytoplankton dynamic off the Changjiang estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.
- [26] 邹李昶, 付英杰, 王志铮, 等. 两种养殖模式下紫贻贝生长转折期形态性状对体重的影响效应[J]. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2014, 33(3): 244-250.
ZOU L C, FU Y J, WANG Z Z, et al. The study of the effect of phenotypic and morphometric traits on body weight of *Mytilus edulis* Linnaeu of various regions in the stage of growth turning[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2014, 33(3): 244-250.
- [27] 朱德弟, 陆斗定, 王云峰, 等. 2005 年春初浙江近海的低温特征及其对大规模东海原甲藻赤潮发生的影响[J]. *海洋学报*, 2009, 31(6): 31-39.
ZHU D D, LU D D, WANG Y F, et al. The low temperature characteristics in Zhejiang coastal region in the early spring of 2005 and its influence on harmful algae bloom occurrence of *Prorocentrum donghaiense* [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(6): 31-39.

Seasonal variation of surface water temperature and its ecological impacts in a mussel aquaculture farm

LIN Jun^{1,2}, DENG Mingxing¹, ZHANG Shouyu¹, YAN Qing¹

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. International Center for Marine Studies, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To achieve the seasonal variation and its ecological impact on the growth rate of blue mussel, the surface (3 m beneath the sea surface) water temperature of the mussel farms around the Gouqi Island was observed for several years. Additionally, the weight and the shell length of blue mussel were also sampled and measured for seven times during a culture cycle. The results showed that the maximum and minimum surface temperature was 29.2 °C and 4.6 °C during the observation, respectively. The amplitude of daily temperature oscillation could be more than 4°C in the summer, and less than 2°C in the spring and autumn. Between the weight and the monthly age, a polynomial regression was found as $W = 0.0006M^4 + 0.0064M^3 - 0.1326M^2 + 0.8599M + 0.6568$ ($R^2 = 0.9991$). Meanwhile, the polynomial regression between the shell length and the monthly age was found as $L = 0.0008M^4 + 0.0577M^3 - 1.0997M^2 + 7.5366M + 20.044$ ($R^2 = 0.9989$). The regression relation between the weight growth rate and water temperature is exponential as $Rw = 0.1028e^{0.1195T}$ ($R^2 = 0.7413$). The correlation coefficient is higher when the regression relation between mussel growth rate and water temperature is recalculated by two parts. The exponential relationship is $Rw1 = 0.1488e^{0.0683T}$ ($R^2 = 0.9360$) from October to March of the next year, and $Rw2 = 0.1188e^{0.1289T}$ ($R^2 = 0.9932$) from April to August. The regression equation between the shell length growth rate and water temperature is exponential as $Rl = 0.5483e^{0.1043T}$ ($R^2 = 0.9529$). Surface water temperature in the mussel farms around the Gouqi Island varied significantly at the same time between different years. Spring and summer are the important seasons of mussels' growth, continuous relative lower temperature during these two seasons can affect mussel production greatly. The in situ observation of surface water temperature is recommended for the mussel aquaculture, and it could help to adjust culture tactics of blue mussel.

Key words: water temperature; mussel aquaculture farm; seasonal variation; ecological impacts