

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第4期 Vol.33 No.4 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 4 期 2013 年 2 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法 王晓学,沈会涛,李叙勇,等 (1019)
- 植物叶片水稳定同位素研究进展 罗伦,余武生,万诗敏,等 (1031)
- 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展 陈利顶,孙然好,刘海莲 (1042)
- 城市生物多样性分布格局研究进展 毛齐正,马克明,邬建国,等 (1051)
- 基于福祉视角的生态补偿研究 李惠梅,张安录 (1065)

个体与基础生态

- 土著菌根真菌和混生植物对羊草生长和磷营养的影响 雷垚,郝志鹏,陈保冬 (1071)
- 干旱条件下 AM 真菌对植物生长和土壤水稳定性团聚体的影响 叶佳舒,李涛,胡亚军,等 (1080)
- 转 *mapk* 双链 RNA 干扰表达载体黄瓜对根际土壤细菌多样性的影响 ... 陈国华,弭宝彬,李莹,等 (1091)
- 北京远郊区臭氧污染及其对敏感植物叶片的伤害 万五星,夏亚军,张红星,等 (1098)
- 茅苍术叶片可培养内生细菌多样性及其促生潜力 周佳宇,贾永,王宏伟,等 (1106)
- 低温对蝶蛹金小蜂卵成熟及其数量动态的影响 夏诗洋,孟玲,李保平 (1118)
- 六星黑点豹蠹蛾求偶行为与性信息素产生和释放的时辰节律 刘金龙,荆小院,杨美红,等 (1126)
- 氟化物对家蚕血液羧酸酯酶及全酯酶活性的影响 米智,阮成龙,李姣蓉,等 (1134)
- 不同温度对脊尾白虾胚胎发育与幼体变态存活的影响 梁俊平,李健,李吉涛,等 (1142)

种群、群落和生态系统

- 生态系统服务多样性与景观多功能性——从科学理念到综合评估 吕一河,马志敏,傅伯杰,等 (1153)
- 不同端元模型下湿地植被覆盖度的提取方法——以北京市野鸭湖湿地自然保护区为例 崔天翔,官兆宁,赵文吉,等 (1160)
- 基于光谱特征变量的湿地典型植物生态类型识别方法——以北京野鸭湖湿地为例 林川,官兆宁,赵文吉,等 (1172)
- 浮游植物群落对海南小水电建设的响应 林彰文,林生,顾继光,等 (1186)
- 菹草种群内外水质日变化 王锦旗,郑有飞,王国祥 (1195)
- 南方红壤区 3 种典型森林恢复方式对植物群落多样性的影响 王芸,欧阳志云,郑华,等 (1204)
- 人工油松林恢复过程中土壤理化性质及有机碳含量的变化特征 胡会峰,刘国华 (1212)
- 不同区域森林火灾对生态因子的响应及其概率模型 李晓炜,赵刚,于秀波,等 (1219)

景观、区域和全球生态

- 快速城市化地区景观生态安全时空演化过程分析——以东莞市为例 杨青生,乔纪纲,艾彬 (1230)
- 海岸带生态系统健康评价中能质和生物多样性的差异——以江苏海岸带为例 唐得昊,邹欣庆,刘兴健 (1240)
- 干湿交替频率对不同土壤 CO₂ 和 N₂O 释放的影响 欧阳扬,李叙勇 (1251)

西部地区低碳竞争力评价..... 金小琴,杜受祜 (1260)

基于 HEC-HMS 模型的八一水库流域洪水重现期研究 郑 鹏,林 韵,潘文斌,等 (1268)

基于修正的 Gash 模型模拟小兴安岭原始红松林降雨截留过程 柴汝杉,蔡体久,满秀玲,等 (1276)

长白山北坡不同林型内红松年表特征及其与气候因子的关系..... 陈 列,高露双,张 赞,等 (1285)

资源与产业生态

河西走廊绿洲灌区循环模式“农田-食用菌”生产系统氮素流动特征 李瑞琴,于安芬,赵有彪,等 (1292)

施肥对旱地花生主要土壤肥力指标及产量的影响..... 王才斌,郑亚萍,梁晓艳,等 (1300)

耕作措施对土壤水热特性和微生物生物量碳的影响..... 庞 绪,何文清,严昌荣,等 (1308)

基于改进 SPA 法的耕地占补平衡生态安全评价 施开放,刁承泰,孙秀锋,等 (1317)

学术争鸣

基于生态-产业共生关系的林业生态安全测度方法构想 张智光 (1326)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿须知 (I)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 318 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-02



封面图说: 石羊河——石羊河流域属大陆性温带干旱气候,气候特点是:日照充足、温差大、降水少、蒸发强、空气干燥。石羊河源出祁连山东段,河系以雨水补给为主,兼有冰雪融水成分。上游的祁连山区降水丰富,有雪山冰川和残留林木,是河流的水源补给地。中游流经河西走廊平地,形成武威和永昌等绿洲,下游是民勤,石羊河最后消失在腾格里沙漠中。随着石羊河流域人水矛盾的不断加剧,水资源开发利用严重过度,荒漠化日趋严重,民勤县的生态环境已经相当恶化,继续下去将有可能变成第二个“罗布泊”。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201204070485

梁俊平, 李健, 李吉涛, 刘萍, 赵法箴, 刘德月, 戴芳钰. 不同温度对脊尾白虾胚胎发育与幼体变态存活的影响. 生态学报, 2013, 33(4): 1142-1152.
Liang J P, Li J, Li J T, Liu P, Zhao F Z, Liu D Y, Dai F Y. Effects of water temperature on the embryonic development, survival and development period of larvae of ridgetail white prawn (*Exopalaemon carinicauda*) reared in the laboratory. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1142-1152.

不同温度对脊尾白虾胚胎发育与幼体变态存活的影响

梁俊平^{1,2}, 李 健^{2,*}, 李吉涛², 刘萍², 赵法箴², 刘德月², 戴芳钰²

(1. 中国海洋大学, 青岛 266003; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

摘要: 选用实验室内人工控制交尾的脊尾白虾, 研究了不同温度对脊尾白虾胚胎发育及幼体变态、存活的影响。结果表明, 在盐度为 31 的条件下, 脊尾白虾胚胎发育的生物学零度为 12.18℃, 有效积温为 3828.27℃·h。在 15.3—28.1℃ 范围内, 胚胎发育时间随着温度升高而呈双曲线性缩短, 而胚胎发育速度随着温度的升高而呈直线性加快, 但当温度超过 30℃ 时, 胚胎无法正常完成发育。脊尾白虾幼体变态发育速度随着温度的升高而加快, 18、20、22、24、26、28℃ 各实验组开始出现仔虾的时间依次为 17、14、11、9、8 和 8 d, 各组 90% 以上幼体变态为仔虾的时间依次为 21、18、15、14、11 和 11 d。各实验组在幼体变态过程中存活率都呈明显的阶梯式下降趋势, 且 28℃ 组的存活率下降最快, 但当存活幼体全部变为仔虾时, 各实验组间的存活率并无显著性差异 ($P>0.05$)。18℃ 组仔虾干质量明显高于其它各组 ($P<0.05$), 28℃ 组仔虾干质量最低, 但与 20、22、24、26℃ 组无显著性差异 ($P>0.05$)。因此在脊尾白虾育苗中, 幼体孵化温度不应低于 12℃, 最高不超过 28℃ 为宜; 幼体培育温度, 建议控制在 22—26℃ 为最佳。

关键词: 脊尾白虾; 水温; 胚胎发育; 幼体变态

Effects of water temperature on the embryonic development, survival and development period of larvae of ridgetail white prawn (*Exopalaemon carinicauda*) reared in the laboratory

LIANG Junping^{1,2}, LI Jian^{2,*}, LI Jitao², LIU Ping², ZHAO Fazhen², LIU Deyue², DAI Fangyu²

1 Ocean University of China, Qingdao 266003, China

2 Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: The shrimp, *Exopalaemon carinicauda*, commonly known as the ridgetail white prawn, is an important local fishery resource that has been targeted for aquaculture throughout China. This species makes up one third of the gross output of polyculture ponds in China; however, the artificial rearing of *E. carinicauda* needs to be improved. Water temperature plays an important role in the timing of embryo and larval development. Thus, the purpose of the present study was to determine the effects of temperature on the egg incubation period, survival and development period of *E. carinicauda* larvae reared in the laboratory. The number of days from spawning to hatching and mean rearing temperature were determined from 25 females. The egg incubation period decreased exponentially from 41 to 10 days with increasing mean temperatures of 15.3 to 28.1℃, but at 30℃, embryonic development could not be completed. The relationship between mean temperature (T) and egg incubation period was analyzed using the equation $T = KV + C$, based on heat summation theory. The lower critical temperature for embryonic development represented by parameter C was 12.18℃, and the sum of effective temperature for embryonic development was 3828.27℃·h. The larvae from each female were reared in 1.5 L beakers at

基金项目: 主要养殖甲壳类良种培育课题 (2012AA10A409); 国家虾产业技术体系 (CARS-47); 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (201103034); 中国水产科学研究院基本科研业务费 (2013A0701)

收稿日期: 2012-04-07; 修订日期: 2012-12-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Lijian@ysfri.ac.cn

six temperatures (18, 20, 22, 24, 26 and 28°C) and fed *Artemia* sp. nauplii. The number of days from hatching to the attainment of each larval stage decreased with increasing temperature, the period over which 90% of larvae from the T_{18} — T_{28} groups developed into juvenile shrimps was 21, 18, 15, 14, 11 and 11 days, respectively. The survival rates of larvae decreased with development time. In particular, the survival rate of the T_{28} group decreased sharply over time. The survival rates, however, from incubation to juvenile shrimp showed no significant differences ($P>0.05$) between the six groups. The individual dry weight of post-larva from the T_{18} group was the highest of all of the six groups ($P<0.05$), and the individual dry weight of post-larva from the T_{28} group was the lowest, but there was no significant difference ($P>0.05$) between the five groups from the T_{20} group to the T_{28} group. To conclude, water temperatures between 12.18°C and 28°C were most suitable for embryonic development, and temperatures from 22°C to 26°C were most suitable for rearing *E. carinicauda* larvae.

Key Words: *Exopalaemon carinicauda*; water temperature; embryonic development; larval development

脊尾白虾(*Exopalaemon carinicauda*)又名白虾、小白虾和迎春虾等,隶属节肢动物门(Arthropoda)、甲壳纲(Crustacea)、十足目(Decapoda)、长臂虾科(Palaemonidae)、白虾属(*Exopalaemon*),主要分布于我国整个大陆沿岸和朝鲜半岛西岸的浅海低盐水域,以渤海和黄海产量最高,是我国特有的3种经济虾类之一,其产量仅次于中国对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)和中国毛虾(*Acetes chinensis*)^[1-2]。由于其具有繁殖能力强、生长速度快、生长季节长和环境适应性广等优点,近年来,随着沿海滩涂的开发,养殖面积也迅速扩大,据不完全统计,目前全国脊尾白虾养殖面积达1万余公顷,已成为池塘单养和其它种类混养的重要经济虾类^[3-6],年平均效益可达1—2万元/hm²^[7-9]。脊尾白虾具有良好的养殖前景,但目前的池塘养殖主要依靠捕捞海区天然虾苗或投放抱卵亲虾自行繁殖苗种^[8,10-11],严重制约了规模化人工养殖的发展。因此,在我国沿海地区进行规模化生态养殖脊尾白虾,首先必须突破脊尾白虾全人工苗种培育技术难关。

在虾蟹类育苗中,温度是关键因子之一,特别是对胚胎及幼体发育有重要的作用^[12]。在罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)、凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)、中国对虾(*F. chinensis*)、长毛对虾(*Fenneropenaeus Penicillatus*)、红螯光壳螯虾(*Cherax quadricarinatus*)、克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)和锯缘青蟹(*Scylla serrata*)^[13-19]等多种养殖虾蟹类中,均详细研究了温度对受精卵孵化及幼体变态发育的影响。而目前关于脊尾白虾胚胎及幼体变态受温度影响的研究较少,仅见20世纪80年代末王绪峨^[20]对受精卵孵化做了初步的研究,为脊尾白虾胚胎形态及早期发育奠定了一定的基础。本文将探究脊尾白虾胚胎发育生物学零度和有效积温,以及幼体变态发育的最适温度,以期丰富对脊尾白虾早期个体发育的认识,为脊尾白虾人工繁育技术的建立提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用脊尾白虾捕自莱州湾,体长41.98—64.81 mm,体重1.24—4.04 g,暂养于200 L(80 cm×50 cm×50 cm)PVC水族箱内,水温(12.4±0.3)°C,充气。投喂冷冻大卤虫,8:00和18:00各1次。每天定时吸污换水。

沙滤自然海水,盐度31.2,pH值8.2,NH₃-N_m和NO₂⁻-N浓度分别低于0.05 mg/L和0.02 mg/L。

1.2 实验方法

1.2.1 受精卵孵化温度分组

挑选多对性成熟的雌、雄脊尾白虾放入60 L(50 cm×40 cm×30 cm)PVC水族箱,每个水族箱内各放1对,每天8:00和18:00各投饵1次,定时换同温度海水1/5。准确记录雌雄虾交尾时间,交尾后将雄虾移出,温度设置及其变化范围如表1所示,其中12°C组为自然水温,其它温度组采用加热棒加温,以0.5°C/h升温,直至设置所需温度。每天记录各实验组的温度,直至I期溞状幼体(Z_1)孵出。

表 1 脊尾白虾受精卵孵化温度设置

Table 1 The different water temperature levels of egg incubation of *Exopalaemon carinicauda*

温度范围/℃ Range	平均温度/℃ Average	温度范围/℃ Range	平均温度/℃ Average	温度范围/℃ Range	平均温度/℃ Average
12.0—18.1	15.7±1.75	20.2—22.2	21.7±1.54	25.0—26.5	26.2±0.57
12.4—17.8	15.3±1.96	21.0—22.4	21.9±0.43	25.6—26.3	25.8±0.69
12.4—17.9	15.5±1.80	21.9—22.2	22.0±0.58	27.6—28.1	27.9±0.89
18.8—19.6	19.0±0.67	22.1—24.3	23.9±0.66	27.1—28.6	28.0±0.69
18.0—20.1	19.2±1.61	22.2—24.6	24.0±0.76	27.3—28.3	28.1±0.98
18.5—20.0	19.5±0.61	23.6—24.1	24.1±0.45	30.1—31.1	30.6±0.41
19.0—20.1	19.6±0.53	23.3—25.0	24.6±0.36	29.8—31.3	31.0±0.52
19.6—20.6	20.0±0.47	24.9—25.5	25.2±0.36	29.9—31.0	30.1±0.39
19.5—20.5	20.1±0.49				

1.2.2 幼体发育分组

设置 18、20、22、24、26 和 28 ℃ 6 个温度梯度,每个温度组设 3 个重复。将刚刚孵化出活力好的蚤状幼体随机分布在 1.5 L 烧杯内,水体为 1 L,密度为 20 个/L,采用水浴加热,以 1 ℃/h 升温到设定温度,微充气。所有幼体均由同一亲虾所孵化。

蚤状幼体投喂卤虫无节幼体,每天 3 次,分别为 9:00、14:00 和 19:00。每天上午投喂前换同温度海水 1/5,并记录各发育阶段的幼体数量。

1.2.3 幼体发育指数和存活率的计算

幼体发育指数(Larval stage index, *LSI*) 根据文献^[21]计算脊尾白虾幼体发育指数,以表示幼体变态发育的快慢,幼体发育指数越大,则表示幼体变态越快。计算公式如下:

$$LSI = \frac{Z_1 \times 1 + Z_2 \times 2 + Z_3 \times 3 + Z_4 \times 4 + Z_5 \times 5 + Z_6 \times 6 + P \times 7}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + P}$$

式中, Z_1 、 Z_2 、 $\dots$ 、 Z_6 分别表示脊尾白虾蚤状幼体各期存活的数量, P 表示变态为仔虾的数量;且从蚤状幼体到仔虾各期分别赋予一个值,即 1、2、3、4、5、6、7,表示幼体的发育阶段。

幼体存活率(*SR*) 根据文献^[22]计算幼体存活率,表示幼体在各个发育阶段的存活情况,计算公式如下:

$$SR = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + P}{20} \times 100\%$$

式中, Z_1 、 Z_2 、 $\dots$ 、 Z_6 分别表示脊尾白虾蚤状幼体各期存活的数量, P 表示变态为仔虾的数量,20 为放入幼体的初始数量。

1.2.4 个体干质量的测定

出现仔虾的第一天,从每个烧杯中取出 3—5 只仔虾放在 20 目的滤网上,用自来水冲洗后,用滤纸吸干水分,转移到已称重的锡箔制成的小杯子里,然后放入电热鼓风干燥箱内,在 60 ℃ 下烘干 6 h。烘干后在万分之一的电子天平上称量样品和杯子总重。仔虾个体干质量计算公式如下:

$$\text{个体干质量} = \frac{\text{总质量} - \text{锡箔杯重}}{\text{仔虾数}}$$

1.2.5 有效积温的计算

脊尾白虾受精卵孵化有效积温可通过以下双曲线公式计算^[23-24]:

$$K = N(T - C) \quad (1)$$

式中, K 为脊尾白虾受精卵完成发育所需要的有效积温(时度,℃·h); N 为发育历期,即孵化出蚤状幼体所需要的时间(h); T 为发育期的平均温度(℃); C 为发育起点温度,即生物学零度(℃)。

将方程(1)可转换成:

$$T = KV + C \quad (2)$$

式中, V 为发育所需要时间的倒数($1/N$), 即发育速度。

在 n 种实验温度($T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$)下, 分别观察和记录相应的发育时间 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$, 将 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ 换算成 $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$, 根据以下公式便可求出 C 和 K 值^[24]。

$$C = \frac{\sum V^2 \cdot \sum T - \sum V \cdot \sum VT}{n \cdot \sum V^2 - (\sum V)^2} \quad (3)$$

$$K = \frac{n \cdot \sum VT - \sum V \cdot \sum T}{n \cdot \sum V^2 - (\sum V)^2} \quad (4)$$

1.2.6 显著性检验

实验数据采用 SPSS 软件统计分析。所有组间数据在进行显著性差异比较之前都用 Kolmogorov-Smirnow Test 在 5% 水平下检验均匀性。如果均匀性不好, 则将数据化为对数或平方根后再用单因子方差分析(one way ANOVA)进行比较, Duncan multiple range test 用来检验显著性差异($P < 0.05$)。结果为百分数的先化为小数, 然后开平方再转换成反正弦函数做统计分析。

2 实验结果

2.1 不同温度对脊尾白虾胚胎发育的影响

脊尾白虾胚胎发育时间或发育速度与温度的关系如表 2, 由表 2 数据可得到脊尾白虾胚胎发育的生物学零度和有效积温分别为 $12.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $3828.27\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ 。在 $15.3\text{—}28.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内胚胎发育时间随着温度的升高而呈双曲线性缩短, 其关系可用一幂函数方程 $H = 570880T^{-2.3434}$ ($R^2 = 0.9906$) 表示(图 1), 胚胎发育速度随着温度的升高而呈直线性加快(图 1)。但当温度超过 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 胚胎发育受到抑制, 受精卵大部分脱离母体腹部, 不能顺利孵化出溞状幼体。

表 2 脊尾白虾胚胎发育时间与温度的关系

Table 2 Relationship between development time and water temperature in the embryonic development of *Exopalaemon carinicauda*

平均温度/ $^{\circ}\text{C}$ Average	孵化时间/h Incubation duration	发育速度 Rate of embryonic development	平均温度/ $^{\circ}\text{C}$ Average	孵化时间/h Incubation duration	发育速度 Rate of embryonic development
15.3±1.96	984	0.001016	24.0±0.76	336	0.002976
15.5±1.80	936	0.001068	24.1±0.45	336	0.002976
15.7±1.75	888	0.001126	24.6±0.36	312	0.003205
19.0±0.67	648	0.001543	25.2±0.36	288	0.003472
19.2±1.61	552	0.001812	26.2±0.57	264	0.003788
19.5±0.61	528	0.001894	25.8±0.69	264	0.003788
19.6±0.53	480	0.001960	27.9±0.89	240	0.004167
20.0±0.47	504	0.001984	28.0±0.69	240	0.004167
20.1±0.49	504	0.001984	28.1±0.98	240	0.004167
21.7±1.54	432	0.002315	30.6±0.41	—	—
21.9±0.43	408	0.002451	31.0±0.52	—	—
22.0±0.58	408	0.002451	30.1±0.39	—	—
23.9±0.66	336	0.002976			

2.2 不同温度对脊尾白虾幼体变态发育的影响

各温度组幼体发育指数如表 3 所示, 从孵化后第 2 天开始, 不同温度组间就呈现出一定的差异, $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组变态发育最快, 均显著快于其它组($P < 0.05$)。幼体孵化后第 15 天时, $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两组发育指数均

高于 6.90, 显著高于 18 °C 和 20 °C 两组 ($P < 0.05$)。18—28 °C 各组开始出现仔虾的时间依次为 17、14、11、9、8d, 各组 90% 以上幼体变态为仔虾的时间依次为 21、18、15、14、11、11d。

2.3 不同温度对脊尾白虾幼体发育成活率的影响

不同组别的幼体在实验期间的存活率见表 4, 各实验组在变态过程中存活率都呈明显的阶梯式下降趋势, 其中 T_{28} 组的存活率下降最快。到各组幼体全部变为仔虾时, T_{24} 组的存活率最高为 92.00%, 其次为 T_{18} 、 T_{22} 和 T_{26} 的 88.00%, T_{20} 为 86.67%, T_{28} 组存活率最低为 85.11%, 但 6 组间的存活率无显著性差异 ($P > 0.05$)。

2.4 不同温度对脊尾白虾仔虾体质量的影响

不同实验组仔虾个体干质量见图 2, T_{18} 仔虾的干质量最大为 0.85 mg, 与其它组差异显著 ($P < 0.05$); T_{20} — T_{28} 各组仔虾的干质量分别为 0.62、0.67、0.64、0.56 和 0.51 mg, T_{28} 仔虾的干质量最小, 但该 5 组间无显著性差异 ($P > 0.05$)。

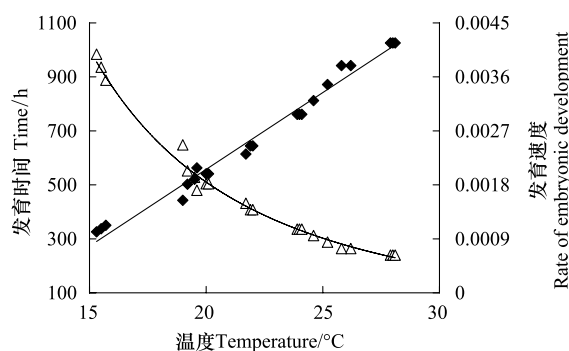


图 1 胚胎发育时间及其发育速度与温度的关系

Fig. 1 Relationship between time or rate and mean water temperature for embryonic development of *Exopalaemon carinicauda*

表 3 不同温度下脊尾白虾幼体发育指数

Table 3 Effect of temperature on the larval stage index of *Exopalaemon carinicauda*

孵化后天数/d The days after incubation	幼体发育指数 Larval stage index					
	18 °C	20 °C	22 °C	24 °C	26 °C	28 °C
1	1.00±0.00a	1.00±0.00a	1.00±0.00a	1.00±0.00a	1.00±0.00a	1.00±0.00a
2	1.00±0.00a	1.00±0.00a	1.00±0.00a	1.00±0.00a	1.80±0.11b	2.00±0.00c
3	1.51±0.12a	1.99±0.02b	2.00±0.00b	2.00±0.00b	2.00±0.00b	2.00±0.00b
4	2.00±0.00a	1.99±0.02a	2.00±0.00a	2.96±0.04b	3.00±0.00b	3.00±0.00b
5	2.00±0.00a	2.84±0.08b	3.00±0.00c	3.00±0.00c	3.81±0.06d	3.97±0.02e
6	2.19±0.05a	3.00±0.00b	3.00±0.00b	3.94±0.05c	4.09±0.08c	4.53±0.08d
7	3.00±0.00a	3.00±0.00a	3.97±0.05b	4.00±0.00b	4.83±0.18c	5.86±0.10d
8	3.00±0.00a	3.96±0.07b	4.00±0.00b	5.14±0.30c	5.88±0.19d	6.04±0.05d
9	3.00±0.00a	3.99±0.02b	4.27±0.27b	5.94±0.06c	6.17±0.11c	6.68±0.08d
10	3.22±0.16a	4.00±0.00b	5.86±0.09c	6.09±0.04c	6.70±0.18d	6.89±0.02d
11	3.93±0.12a	4.94±0.18b	5.97±0.05c	6.56±0.08d	6.92±0.08e	6.98±0.03e
12	4.00±0.00a	5.06±0.09b	6.16±0.08c	6.90±0.09d	6.97±0.05d	7.00±0.00d
13	4.04±0.04a	5.13±0.15b	6.48±0.14c	6.90±0.09d	7.00±0.00d	
14	4.52±0.27a	5.24±0.19b	6.82±0.15c	6.96±0.04c		
15	5.49±0.07a	5.62±0.18a	6.91±0.09b	6.99±0.02b		
16	5.55±0.05a	6.62±0.30b	6.93±0.07c	6.99±0.02c		
17	5.61±0.08a	6.85±0.07b	7.00±0.00c	7.00±0.00c		
18	5.64±0.09a	6.95±0.08b				
19	6.08±0.31a	6.95±0.08b				
20	6.77±0.27a	6.95±0.08b				
21	6.94±0.06a	7.00±0.00a				
22	6.97±0.03					
23	7.00±0.00					

同一行中具有不同上标的数值表明存在显著性差异 ($P < 0.05$)

表 4 不同温度下脊尾白虾幼体存活率

Table 4 Effect of temperature on the survival rate of larvae of *Exopalaemon carinicauda*

孵化后天数/d The days after incubation	幼体存活率 Survival rate/%					
	18 °C	20 °C	22 °C	24 °C	26 °C	28 °C
1	100±0.00a	100±0.00a	100±0.00a	100±0.00a	100±0.00a	100±0.00a
2	100±0.00a	100±0.00a	100±0.00a	100±0.00a	100±0.00a	100±0.00a
3	100±0.00a	97.33±2.31a	100±0.00a	100±0.00a	100±0.00a	100±0.00a
4	100±0.00a	97.33±2.31a	100±0.00a	97.33±4.62a	100±0.00a	95.94±4.00a
5	100±0.00a	94.67±2.31b	100±0.00a	94.67±4.62b	96.00±4.00ab	93.22±2.41b
6	100±0.00a	94.67±2.31b	98.67±2.31a	93.33±2.31b	92.00±6.93b	91.89±0.19b
7	98.67±2.31a	94.67±2.31ab	98.67±2.31a	93.33±2.31b	89.33±8.33b	89.22±4.53b
8	98.67±2.31a	93.33±4.62ab	97.33±2.31ab	92.00±2.31b	89.33±8.33b	89.22±4.53b
9	98.67±2.31a	90.67±9.24ab	97.33±2.31ab	92.00±2.31b	89.33±8.33b	89.22±4.53b
10	98.67±2.31a	90.67±9.24b	94.67±2.31ab	92.00±2.31b	89.33±8.33b	85.11±2.52b
11	96.00±4.00a	90.67±9.24ab	93.33±2.31ab	92.00±2.31ab	89.33±8.33ab	85.11±2.52b
12	96.00±4.00a	90.67±9.24ab	92.00±4.00ab	92.00±2.31ab	89.33±8.33ab	85.11±2.52b
13	96.00±4.00a	88.00±10.58a	89.33±2.31a	92.00±2.31a	88.00±6.93a	
14	89.33±8.33a	88.00±10.58a	88.00±4.00a	92.00±2.31a		
15	88.00±8.00a	88.00±10.58a	88.00±4.00a	92.00±2.31a		
16	88.00±8.00a	86.67±10.07a	88.00±4.00a	92.00±2.31a		
17	88.00±8.00a	86.67±10.07a	88.00±4.00a	92.00±2.31a		
18	88.00±8.00	86.67±10.07				
19	88.00±8.00	86.67±10.07				
20	88.00±8.00	86.67±10.07				
21	88.00±8.00	86.67±10.07				
22	88.00±8.00					
23	88.00±8.00					

同一行中具有不同上标的数值表明存在显著性差异 ($P<0.05$)

3 讨论

3.1 脊尾白虾胚胎发育生物学零度和有效积温

脊尾白虾属于抱卵繁殖,当受精卵粘附在母体腹肢后,母体已不再向受精卵输送营养,而盐度、温度、溶氧、pH 值、重金属等环境因子则对胚胎发育有着重要的影响,因此在脊尾白虾育苗当中,应注重对水体环境因子的调控,特别是对温度的调控,对胚胎发育速度有着决定性作用。探明其胚胎发育的生物学零度及有效积温,可为人工控制幼体孵化提供理论依据,有计划地安排生产。本实验得到的脊尾白虾胚胎发育生物学零度为 12.18 °C,王桂忠等^[25-27]研究得出东方扁虾 (*Thenus orientalis*)、锈斑蟊 (*Charybdis feriatus*) 和拟穴青蟹胚胎发育的生物学零度分别为 13.50、15.68 °C 和 15.70 °C,稍高于脊尾白虾;而吕佳等^[18,28]报道克氏原螯虾和锯缘青蟹胚胎发育的生物学零度分别为 5.60 °C 和 11.70 °C,稍低于脊尾白虾。这可能由于不同物种生活环境不同,繁殖季节对水温要求不同所致。脊尾白虾主要生活在浅海水域,其繁殖盛期在 5—8 月份,水温为 12.5—26.8 °C^[2],本实验得到的脊尾白虾胚胎发育生物学零度稍低于自然海区的水温,符合发育生物学的规律。因此在脊尾白虾育苗当中,受精卵孵化水温应不低于

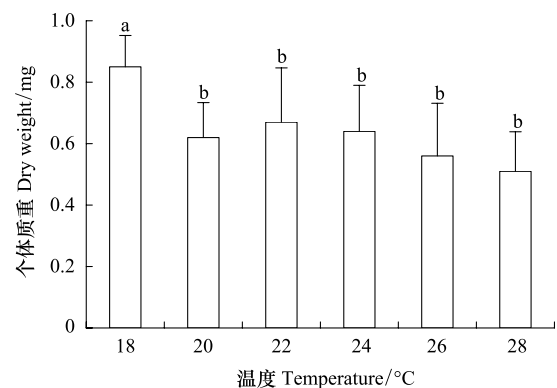


图 2 不同温度下仔虾个体干质量

Fig. 2 Effect of temperature on the individual dry weight of the post-larva of *Exopalaemon carinicauda*

12.18 °C, 否则将影响其正常发育。在其他水质条件满足的前提下, 脊尾白虾胚胎发育直至幼体孵化的有效积温是一定的, 即一常数。本研究根据昆虫发生期预测的有效积温法, 首次得出脊尾白虾胚胎发育理论有效积温为 3828.27 °C · h, 可在一定范围内有效预测脊尾白虾胚胎完成整个发育周期所需的时间。

3.2 脊尾白虾胚胎发育与温度的关系

对变温动物而言, 温度的高低对胚胎发育的速度有很大影响。在一定范围内, 胚胎发育速度与温度的高低成正比, 即温度越高, 发育越快; 温度越低, 发育越慢^[29]。本实验在水温 15—28 °C 条件下, 脊尾白虾受精卵随着孵化温度的升高, 孵化时间逐渐缩短, 这与长毛对虾、红螯光壳螯虾、日本沼虾、锯缘青蟹、克氏原螯虾等^[16-17, 28, 30-31] 受精卵孵化所需时间与温度呈一定的函数关系结论一致。本实验发现当孵化温度超过 30 °C 时脊尾白虾受精卵大部分脱落于水体中, 不能顺利孵化出幼体。如日本沼虾^[30] 在 34 °C 时胚胎发育时间有延长趋势, 而且在 36 °C 时胚胎不能完成整个发育期; 长毛对虾^[16] 在超过 35.5 °C 时受精卵孵化受到抑制; 东方扁虾^[25] 胚胎在 34 °C 时离体培养, 2—3 d 后即表现出不适, 约一周后呈解体状, 在 37 °C 培养 1—2 d 后即全呈解体状。说明每种虾的胚胎发育都有一个温度耐受范围, 而这一范围一般小于其存活的适温范围, 当水体温度超出其胚胎耐受范围时, 胚胎发育将受到抑制, 这可能是由于高温导致胚胎内某些酶的活性丧失或被抑制, 从而造成新陈代谢的紊乱, 最终使胚胎死亡^[30], 也可能是由于高温使脊尾白虾抱卵刚毛粘附性受到了影响, 卵之间的卵柄连接变弱直至分离, 散落于水体底部后失去了母体腹肢搅动水体供氧途径, 最终因缺氧无法进行新陈代谢而死亡, 但具体原因仍需进一步深入研究。

虾蟹类胚胎发育是一个动态的生理生化变化过程。卵黄物质作为胚胎发育的主要营养来源, 其水解形成的蛋白质和氨基酸, 一方面为胚胎生理代谢提供能量, 另一方面为胚胎组织器官的形成提供必需的物质^[32]。研究显示, 卵黄蛋白在罗氏沼虾、日本沼虾、红螯光壳螯虾、中华绒螯蟹和锯缘青蟹等胚胎发育过程中总体呈直线下降趋势, 而氨基酸呈抛物线下降趋势, 但随着胚胎的发育能量消耗却显著增加, 这也说明卵黄物质不断进行着异化和同化作用, 一部分为胚胎发育提供能量, 另一部分则用于组织分化和器官的形成^[32-35], Babu^[36] 认为蛋白质尤其在角质层、肌肉、消化和神经系统形成中发挥着重要作用。

而在胚胎发育过程中, 卵黄物质的分解和利用与各种酶类密切相关, 是通过各种消化酶的水解作用为胚胎发育提供能量和构建胚胎组织、器官^[37]。研究表明, 胃蛋白酶、类胰蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶和脂酶在虾蟹胚胎各个时期均有活性, 而且酶的活性高低与蛋白质含量的变化呈一定的相关性^[34, 37]。然而这一系列反应过程通常需要适宜的温度条件, 温度对于胚胎发育过程中各种酶活的影响, 将直接影响到营养物质的同化和异化作用速率, 从而影响孵化时间。作者推测, 在脊尾白虾胚胎发育中同样也存在着在各种酶催化作用下所发生的一系列反应, 而在不同温度下酶促反应速率也不同, 从而表现出胚胎发育速率的差异。

3.3 脊尾白虾幼体变态发育与温度的关系

虾蟹幼体发育一个阶段则经历一次蜕皮, 而其蜕皮主要是受内分泌激素如蜕皮激素和蜕皮抑制激素等共同作用的结果^[38], 其中胆固醇是蜕皮激素生物合成中一种重要的前体物, 研究发现真蟹蜕皮时 Y-器官对胆固醇的含量大大增加, 黄道蟹蜕皮前后血液中的胆固醇活性也显著增加^[39]。但从胆固醇到蜕皮激素的转化是一系列复杂的生化反应, 主要是在细胞色素 P450 (CYP450) 酶的催化作用下最终合成蜕皮激素, 然后再与蜕皮激素受体结合, 在热休克蛋白 90 (HSP90)、热休克蛋白 70 (HSP70) 和蜕皮激素诱导因子 E75 等分子伴侣蛋白的协同下级联放大蜕皮信号, 最终促进蜕皮^[40-42]。因甲壳动物自身不能合成胆固醇, 所以必须从外界摄取足够的胆固醇才能保证正常变态发育^[43], 本实验中脊尾白虾幼体饵料为卤虫无节幼体, 富含胆固醇^[44], 因此在脊尾白虾幼体摄取足够胆固醇的条件下, 随着温度的升高, CYP450 酶的活性也随之增强, 从而增加了胆固醇转化为蜕皮激素的效率, 同时在较高温度下 HSP90 等蛋白协同作用增强, 加速了对蜕皮信号的传递、放大, 从而表现出蜕皮频率的加快。

幼体蜕皮过程也是物质能量消耗的过程, 幼体从摄食饵料中积累能量和重要营养物质是与蜕皮周期内分泌调控相互作用的一个重要外源因子^[38], Anger 和 Dawirs^[45] 提出幼体能进入蜕皮周期的某一点, 关键在于幼

体已积累了足够的能量或营养。因此在蜕皮前需积累一定的营养物质,而营养物质的吸收利用与各种消化酶密切相关,消化酶活力的高低决定着幼体对营养物质消化吸收能力,从而影响幼体生长发育速度^[15]。在虾蟹类幼体中普遍存在胃蛋白酶、类胰蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶和脂肪酶 5 种消化酶,而这些酶活力与温度有直接的关系,酶活力的适宜温度也正是幼体生长发育的适宜温度^[46-49]。潘鲁青^[15]报道在 22—25 ℃,中国对虾蚤状幼体胃蛋白酶、类胰蛋白酶和淀粉酶 3 种酶的活力较高,因此选择此温度为中国对虾蚤状幼体培育的最佳温度。本实验结果表明,在一定温度范围内脊尾白虾幼体的变态发育速度随着温度的升高而加快,与潘鲁青、施流章、邢克智、Villarreal 和 Kumlu^[15-16,50-52]等研究结果一致。但当超出 26 ℃时,脊尾白虾幼体的发育速度已不再加快,而 22 ℃时的发育速度明显快于 18 ℃和 20 ℃,这可能是由于 22—26 ℃是幼体体内消化酶最适宜的温度,加快了幼体对营养物质的吸收利用,为幼体变态发育提供了足够的物质能量。因此建议脊尾白虾幼体培育最佳温度控制在 22—26 ℃。

3.4 脊尾白虾仔虾存活率和个体质量与温度的关系

在本实验条件下,随着幼体发育,成活率成阶梯式下降,说明幼体死亡率主要发生在幼体蜕皮时期,因每次蜕皮前后幼体形态结构发生了质的变化,因此也是死亡率高峰期,但各组幼体全部变为仔虾时的存活率无显著性差异,这也说明随着温度的升高只是加快了幼体发育速度。到各温度组全部幼体变为仔虾时,18℃组仔虾的个体干质量最大,这可能是由于幼体从外界摄取一定数量的能量后,首先用于满足蜕皮需要的蜕皮能,更多的食物能量摄取才用于摄食后的生长^[53],而在较低温度下幼体变态间隔时间较长,因此在其体内储存了更多的营养物质而用于生长。

4 小结

实验结果表明,脊尾白虾胚胎发育的生物学零度为 12.18 ℃,有效积温为 3828.27 ℃·h。胚胎在 15—28 ℃均能顺利孵化出幼体,约需 41—10 d,温度越高孵化所需时间越短,但最高不应超高过 30 ℃;脊尾白虾蚤状幼体在 18—28 ℃均能顺利变态到仔虾,结合发育速度和存活率等指标综合考虑,建议最佳培育温度控制在 22—26 ℃。

References:

- [1] Li X Z, Liu R Y, Liang X Q. The zoogeography of Chinese Palaemonoidea fauna. Biodiversity Science, 2003, 11(5): 393-406.
- [2] Wang X E. Study on the breeding biology of *Exopalaemon carinicauda*. Chinese Journal Zoology, 1987, 22(1): 7-10.
- [3] Cao M, Wang X Q, Yan B L, Zhang Q Q. Study on the requirements of protein and lipid for *Exopalaemon carinicauda*. Journal of Huaihai Institute of Technology: Natural Science Edition, 2009, 18(1): 87-89.
- [4] Mei X L, Ni J D, Chen H G, Tang Y T. Study on healthy culture technique for *Chelon haematocheilus*, *Sinonovacula constrzeta* (Lamarck) and *Exopalaemon carinicauda*. Journal of Aquaculture, 2005, 26(6): 24-25.
- [5] Wang X Q, Yan B L, Ma S, Dong S L. Study on the biology and cultural ecology of *Exopalaemon carinicauda*. Shandong Fisheries, 2005, 22(8): 21-23.
- [6] Huang Z P, Zhang P H. Study on culture technique for *Portunus trituberculatus* and *Exopalaemon carinicauda*. Journal of Aquaculture, 2004, 25(5): 8-9.
- [7] Chen X L, Rong H N, Lin B D. Pond rearing test on *Exopalaemon carinicauda*. Fisheries Science, 2000, 19(6): 22-23.
- [8] Lin J C, Xu J C. Ecological rearing test on *Exopalaemon carinicauda*. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2009, (17): 313-314.
- [9] Zou S L, Yang H, Li Q, You J G. Study on breeding in net pen and culture in pond of *Exopalaemon carinicauda*. Hebei Fisheries, 2009, (8): 29-29.
- [10] Chen X L, Shen J P, Shen A M. Experiment on artificial propagation of *Palaemon carinicauda*. Fisheries Science and Technology Information, 1999, 26(3): 127-133.
- [11] Xu G C, Xu J T, Yu B, Yan B L. Studies on technique of industrial breeding for *Exopalaemon carinicauda* (Holthuis). Shandong Fisheries, 2008, 25(5): 1-3.
- [12] Wang K X. The Increase Aquaculture Science of Crustacean. Beijing: China Agriculture Press, 1997: 56-58.
- [13] Cui S Z, Liu Z H, Qi S L, Niu A M, Zhang Z, Gu Q R. The artificial propagation and the rearing of larvae of *Macrobrachium rosenbergii*. Acta

- Agriculturae Universitatis Henanensis, 1995, 29(3): 273-277.
- [14] Peng C D, Zhen J M, Peng W G, He S Q, Tang T L, Wang W B. The embryonic development of *Penaeus vannamei* and effect of temperature and salinity on embryonic development. Journal of Shanghai Fisheries University, 2002, 11(4): 310-316.
- [15] Pan L Q, Ma S, Wang K X. Effects of temperature on growth development and digestive enzyme activities of the larvae of *Penaeus chinensis*. Journal of Fishery Sciences of China, 1997, 4(3): 17-22.
- [16] Shi L Z. The relation of the temperature and salinity with hatching and nauplius development of *Penaeus penicillatus* Alcock. Journal of Fisheries of China, 1981, 5(1): 57-63.
- [17] Zhao Y L, Meng F L, Chen L Q, Gu Z M, Xu G X, Liu Q W. Effect of different gradient temperature on embryonic development of the *Cherax quadricarinatus* (Crustacean, Decapoda). Journal of Lake Sciences, 2000, 12(1): 59-62.
- [18] Lü J, Song S L, Tang J Q, Ge J C, Pan J L. Analysis on temperature factor in hatching of *Procambarus clarkii*. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 2004, 40(2): 226-231.
- [19] Zhu X M, Li S J, Jin J F. Effect of brooding temperature on larval quality of mud crab *Scylla serrata*. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(10): 1629-1634.
- [20] Wang X E. Early embryonic development on *Exopalaemon carinicauda* (Holthuis) and relation of its incubation with temperature and salinity. Journal of Fisheries of China, 1989, 13(1): 59-64.
- [21] Millamena O M, Quintio E. The effects of diets on reproductive performance of eyestalk ablated intact mud crab *Scylla serrata*. Aquaculture, 2000, 181(1/2): 81-90.
- [22] Aguirre-Guzmán G, Vázquez-Juárez R, Ascencio F. Differences in the susceptibility of American white shrimp larval substages (*Litopenaeus vannamei*) to four vibrio species. Journal of Invertebrate Pathology, 2001, 78(4): 215-219.
- [23] Sun R Y. Principles of Animal Ecology. 3rd ed. Beijing: Beijing Normal University Press, 2001: 41-42.
- [24] Shang Y C. General Ecology. Beijing: Higher Education Press, 1993: 36-37.
- [25] Wang G Z, Zhu D F, Li S J. Preliminary study on the temperature-specific rates of embryonic development of the Flathead lobster *Thenus orientalis* (Lund.). Marine Science Bulletin, 1998, 17(3): 39-44.
- [26] Jiang X Q, Yu C G, Chen Q Z. Effect of temperature and salinity on the egg incubation period of the *Charybdis feriatus*. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(6): 915-921.
- [27] Katsuyuki H. Effects of temperature on the egg incubation period, survival and developmental period of larvae of the mud crab *Scylla serrata* (Forsk.) (Brachyura: Portunidae) reared in the laboratory. Aquaculture, 2003, 219(1/4): 561-572.
- [28] Zeng Z S, Wang G Z, Li S J. The embryonic development of *Scylla serrata* and effect of temperature on embryonic development. Fujian Fisheries, 1991, (1): 45-50.
- [29] Lou Y D. Histology and Embryology. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 1996: 218-219.
- [30] Xing K Z, Liu M C. The Effect of temperature on embryonic development of *Macrobrachium nipponense*. Journal of Hebei University: Natural Science Edition, 1996, 16(5): 22-26.
- [31] Li T G, Luo G, Xu G C, Shao Y Z. Effect of temperature on the eggs incubation of *Procambarus clarkii*. Journal of Aquaculture, 2006, 27(1): 16-17.
- [32] Yao J J, Zhao Y L, Zhou Z L, Tang L, Lü G T. Variation in soluble protein composition and content during embryonic development of two kinds of prawns. Chinese Journal of Zoology, 2006, 41(2): 9-14.
- [33] Luo W, Zhou Z L, Zhao Y L, Yang Z B, Zhang M F. Analysis on the contents of protein and amino acids in *Cherax quadricarinatus* during different embryonic development stages. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2004, (1): 88-92.
- [34] Tian H M, Wang Q, Zhao Y L, Luo W, Fan Y J. Digestive enzyme activities and amino acids composition during embryonic development of *Eriocheir sinensis*. Journal of Fishery Sciences of China, 2003, 10(5): 404-408.
- [35] Wang G Z, Tang H, Li S J, Wang D Z, Lin Q W. Biochemical composition for mud crab *Scylla serrata* during embryonic development. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1995, 14(3): 280-283.
- [36] Babu D E. Observations on the embryonic development and energy source in the crab *Xantho bidentatus*. Marine Biology, 1987, 95(1): 123-127.
- [37] Yao J J, Zhao Y L. Characteristics of several digestive enzymes and isozyme during embryonic development in prawn, *Macrobrachium rosenbergii*. Fisheries Science, 2006, 25(12): 595-600.
- [38] Zhu X M, Li S J. Regulation of molting in crustacean larvae. Journal of Fisheries of China, 2001, 25(4): 379-384.
- [39] Huang L, Zhan Y, Xu Z R. Study on the requirements of cholesterol for shrimp and crab. Feed Research, 2004, (11): 41-43.
- [40] Smagghe G. Ecdysone: Structures and Functions. Netherlands: Springer, 2009: 231-269.
- [41] Li K, Li S, Cao Y. Transcriptional regulation by 20-hydroxyecdysone and its nuclear receptor EcR-USP. Acta Entomologica Sinica, 2011, 54(8):

933-937.

- [42] Priya T A J, Li F H, Zhang J Q, Yang C J, Xiang J H. Molecular characterization of an ecdysone inducible gene E75 of Chinese shrimp *Fenneropenaeus chinensis* and elucidation of its role in molting by RNA interference. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 2010, 156(3): 149-157.
- [43] Cheng Y X, Du N S, Lai W. Lipid composition in hepatopancreas of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* at different stages. *Acta Zoologica Sinica*, 1998, 44(4): 420-429.
- [44] Huang X X. Nutrition in brine shrimp *Artemia*. *Fisheries Science*, 2007, 26(11): 628-631.
- [45] Anger K, Dawirs R R. Influence of starvation on the larval development of *Hyas araneus* (Decapod, Majidae). *Helgoland Marine Research*, 1981, 34(3): 287-311.
- [46] Pan L Q, Wang K X. The experimental studies on activities of digestive enzyme in the larvae *Penaeus chinensis*. *Journal of Fisheries of China*, 1997, 21(1): 26-31.
- [47] Tang H, Li S J, Wang G Z, Lin Q W. The experimental studies on the digestive enzyme activities in the larvae of the mud crab *Scylla serrata* (Forsk.) . *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 1995, 34(1): 88-93.
- [48] Pan L Q, Wang K X. Studies on digestive enzyme activities and amino acid in the larvae of *Eriocheir sinensis*. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1997, 4(2): 13-20.
- [49] Pan L Q, Wang W. Studies on several digestive enzyme activities in the larvae of *Penaeus japonicus*. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1997, (2): 15-18.
- [50] Xing K Z, Liu M C, Wang J H. Effect of temperature-salinity on growth and development of the larvae of *Macrobrachium nipponense*. *Journal of Nankai University: Natural Science Edition*, 1997, 30(3): 88-105.
- [51] Villarreal H, Hernandez-Llamas A. Influence of temperature on larval development of Pacific brown shrimp *Farfantepenaeus californiensis*. *Aquaculture*, 2005, 249(1/4): 257-263.
- [52] Kumlu M, Erolodogan O T, Aktas M. Effects of temperature and salinity on larval growth, survival and development of *Penaeus semisulcatus*. *Aquaculture*, 2000, 188(1/2): 167-173.
- [53] Huang G Q, Dong S L, Wang F, Ma S. Effects of diet differences and ration levels on the molting of Chinese shrimp, *Fenneropenaeus chinensis*. *Periodical of Ocean University of China: Natural Science Edition*, 2004, 34(6): 942-948.

参考文献:

- [1] 李新正, 刘瑞玉, 梁象秋. 中国长臂虾总科的动物地理学特点. *生物多样性*, 2003, 11(5): 393-406.
- [2] 王绪峨. 脊尾白虾繁殖生物学的初步观察. *动物学杂志*, 1987, 22(1): 7-10.
- [3] 曹梅, 王兴强, 阎斌伦, 张庆起. 脊尾白虾对蛋白质和脂肪需求量研究. *淮海工学院学报: 自然科学版*, 2009, 18(1): 87-89.
- [4] 梅肖乐, 倪金佛, 陈焕根, 唐诒亭. 梭鱼、缢蛏、脊尾白虾无公害综合养殖技术. *水产养殖*, 2005, 26(6): 24-25.
- [5] 王兴强, 阎斌伦, 马牲, 董双林. 脊尾白虾生物学及养殖生态学研究进展. *齐鲁渔业*, 2005, 22(8): 21-23.
- [6] 黄则平, 张沛花. 三疣梭子蟹与脊尾白虾池塘混养技术. *水产养殖*, 2004, 25(5): 8-9.
- [7] 陈贤龙, 戎华南, 林宝定. 脊尾白虾池塘养殖试验. *水产科学*, 2000, 19(6): 22-23.
- [8] 林吉才, 徐军超. 脊尾白虾仿生态规模养殖试验. *现代农业科技*, 2009, (17): 313-314.
- [9] 邹胜利, 杨辉, 李秋, 由家国. 脊尾白虾网箱育苗池塘养殖试验. *河北渔业*, 2009, (8): 29-29.
- [10] 陈贤龙, 沈江平, 沈爱苗. 脊尾白虾人工繁育试验. *水产科技情报*, 1999, 26(3): 127-133.
- [11] 徐国成, 徐加涛, 于斌, 阎斌伦. 脊尾白虾工厂化育苗生产技术研究. *齐鲁渔业*, 2008, 25(5): 1-3.
- [12] 王克行. 虾蟹类增养殖学. 北京: 中国农业出版社, 1997: 56-58.
- [13] 崔淑贞, 刘忠虎, 齐胜利, 牛安敏, 张震, 谷秋荣. 罗氏沼虾人工繁殖及幼体培育技术研究. *河南农业大学学报*, 1995, 29(3): 273-277.
- [14] 彭昌迪, 郑建民, 彭文国, 何世强, 唐天礼, 王维部. 南美白对虾的胚胎发育以及温度与盐度对胚胎发育的影响. *上海水产大学学报*, 2002, 11(4): 310-316.
- [15] 潘鲁青, 马牲, 王克行. 温度对中国对虾幼体生长发育与消化酶活力的影响. *中国水产科学*, 1997, 4(3): 17-22.
- [16] 施流章. 温、盐度与长毛对虾卵的孵化及无节幼体发育的关系. *水产学报*, 1981, 5(1): 57-63.
- [17] 赵云龙, 孟凡丽, 陈立侨, 顾志敏, 徐谷星, 刘启文. 不同水温对红螯螯虾胚胎发育的影响. *湖泊科学*, 2000, 12(1): 59-62.
- [18] 吕佳, 宋胜磊, 唐建清, 葛家春, 潘建林. 克氏原螯虾受精卵发育的温度因子数学模型分析. *南京大学学报: 自然科学版*, 2004, 40(2): 226-231.
- [19] 朱小明, 李少菁, 金建锋. 孵育温度对锯缘青蟹幼体质量的影响. *生态学报*, 2002, 22(10): 1629-1634.

- [20] 王绪峨. 脊尾白虾早期胚胎发育以及温、盐度与其孵化的关系. 水产学报, 1989, 13(1): 59-64.
- [23] 孙儒泳. 动物生态学原理 (第三版). 北京: 北京师范大学出版社, 2001: 41-42.
- [24] 尚玉昌. 普通生态学. 北京: 高等教育出版社, 1993: 36-37.
- [25] 王桂忠, 朱冬发, 李少菁. 东方扁虾胚胎发育温比率的初步研究. 海洋通报, 1998, 17(3): 39-44.
- [26] 江新琴, 俞存根, 陈全震. 温度和盐度对锈斑螳卵孵育时间的影响. 水产学报, 2008, 32(6): 915-921.
- [28] 曾朝曙, 王桂忠, 李少菁. 锯缘青蟹胚胎发育的观察及温度影响胚胎发育的研究. 福建水产, 1991, (1): 45-50.
- [29] 楼允东. 组织胚胎学 (第二版). 北京: 中国农业出版社, 1996: 218-219.
- [30] 邢克智, 刘茂春. 温度对青虾胚胎发育的影响. 河北大学学报: 自然科学版, 1996, 16(5): 22-26.
- [31] 李庭古, 罗刚, 徐国成, 邵营泽. 不同水温对克氏螯虾受精卵孵化的影响. 水产养殖, 2006, 27(1): 16-17.
- [32] 姚俊杰, 赵云龙, 周忠良, 汤亮, 吕敢堂. 两种沼虾胚胎发育中可溶蛋白的组成及含量变化. 动物学杂志, 2006, 41(2): 9-14.
- [33] 罗文, 周忠良, 赵云龙, 杨志彪, 张明凤. 红螯螯虾胚胎发育过程中蛋白质含量及氨基酸组成的分析. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2004, (1): 88-92.
- [34] 田华梅, 王群, 赵云龙, 罗文, 樊玉杰. 中华绒螯蟹胚胎发育过程中的消化酶活力及氨基酸组成. 中国水产科学, 2003, 10(5): 404-408.
- [35] 王桂忠, 汤鸿, 李少菁, 王大志, 林琼武. 锯缘青蟹胚胎发育过程主要生化组成. 台湾海峡, 1995, 14(3): 280-283.
- [37] 姚俊杰, 赵云龙. 罗氏沼虾胚胎发育期主要消化酶和同工酶特性. 水产科学, 2006, 25(12): 595-600.
- [38] 朱小明, 李少菁. 甲壳动物幼体蜕皮的调控. 水产学报, 2001, 25(4): 379-384.
- [39] 黄磊, 詹勇, 许梓荣. 虾蟹类胆固醇需要量的最新研究. 饲料研究, 2004, (11): 41-43.
- [41] 李康, 李胜, 曹阳. 蜕皮激素与其受体 EcR-USP 的转录调控机制. 昆虫学报, 2011, 54(8): 933-937.
- [43] 成永旭, 堵南山, 赖伟. 不同阶段中华绒螯蟹肝胰腺的脂类及脂肪酸组成. 动物学报, 1998, 44(4): 420-429.
- [44] 黄旭雄. 卤虫的营养. 水产科学, 2007, 26(11): 628-631.
- [46] 潘鲁青, 王克行. 中国对虾幼体消化酶活力的实验研究. 水产学报, 1997, 21(1): 26-31.
- [47] 汤鸿, 李少菁, 王桂忠, 林琼武. 锯缘青蟹幼体消化酶活力. 厦门大学学报: 自然科学版, 1995, 34(1): 88-93.
- [48] 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. 中国水产科学, 1997, 4(2): 13-20.
- [49] 潘鲁青, 王伟. 日本对虾幼体几种消化酶活力的研究. 海洋湖沼通报, 1997, (2): 15-18.
- [50] 邢克智, 刘茂春, 王金华. 温度、盐度对青虾幼体生长发育的影响. 南开大学学报: 自然科学版, 1997, 30(3): 88-105.
- [53] 黄国强, 董双林, 王芳, 马牲. 饵料种类和摄食水平对中国对虾蜕皮的影响. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2004, 34(6): 942-948.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 4 February, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Concepts, processes and quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales WANG Xiaoxue, SHEN Huitao, LI Xuyong, et al (1019)
- Advances in the study of stable isotope composition of leaf water in plants LUO Lun, YU Wusheng, WAN Shimin, et al (1031)
- Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: progresses, problems, and perspectives CHEN Liding, SUN Ranhao, LIU Hailian (1042)
- An overview of advances in distributional pattern of urban biodiversity MAO Qizheng, MA Keming, WU Jianguo, et al (1051)
- Ecological compensation boosted ecological protection and human well-being improvement LI Huimei, ZHANG Anlu (1065)

Autecology & Fundamentals

- Effects of indigenous AM fungi and neighboring plants on the growth and phosphorus nutrition of *Leymus chinensis* LEI Yao, HAO Zhipeng, CHEN Baodong (1071)
- Influences of AM fungi on plant growth and water-stable soil aggregates under drought stresses YE Jiashu, LI Tao, HU Yajun, et al (1080)
- The effect of transgenic cucumber with double strands RNA of *mapk* on diversity of rhizosphere bacteria CHEN Guohua, MI Baobin, LI Ying, et al (1091)
- The ambient ozone pollution and foliar injury of the sensitive woody plants in Beijing exurban region WAN Wuxing, XIA Yajun, ZHANG Hongxing, et al (1098)
- Diversity and plant growth-promoting potential of culturable endophytic bacteria isolated from the leaves of *Atractylodes lancea* ZHOU Jiayu, JIA Yong, WANG Hongwei, et al (1106)
- Effects of the low temperature treatment on egg maturation and its numerical dynamics in the parasitoid *Pteromalus puparum* (Hymenoptera: Pteromalidae) XIA Shiyang, MENG Ling, LI Baoping (1118)
- Circadian rhythm of calling behavior and sexual pheromone production and release of the female *Zeuzera leuconotum* Butler (Lepidoptera: Cossidae) LIU Jinlong, JING Xiaoyuan, YANG Meihong, et al (1126)
- Influence of fluoride on activity of carboxylesterase and esterase in hemolymph of *Bombyx mori* MI Zhi, RUAN Chenglong, LI Jiaorong, et al (1134)
- Effects of water temperature on the embryonic development, survival and development period of larvae of ridgetail white prawn (*Exopalaemon carinicauda*) reared in the laboratory LIANG Junping, LI Jian, LI Jitao, et al (1142)

Population, Community and Ecosystem

- Diversity of ecosystem services and landscape multi-functionality: from scientific concepts to integrative assessment LÜ Yihe, MA Zhimin, FU Bojie, et al (1153)
- Research on estimating wetland vegetation abundance based on spectral mixture analysis with different endmember model: a case study in Wild Duck Lake wetland, Beijing CUI Tianxiang, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1160)
- Identifying typical plant ecological types based on spectral characteristic variables: a case study in Wild Duck Lake wetland, Beijing LIN Chuan, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1172)
- Responses of phytoplankton community to the construction of small hydropower stations in Hainan Province LIN Zhangwen, LIN Sheng, GU Jiguang, et al (1186)
- Diurnal variation of water quality around *Potamogeton crispus* population WANG Jinqi, ZHENG Youfei, WANG Guoxiang (1195)
- Effects of three forest restoration approaches on plant diversity in red soil region, southern China WANG Yun, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1204)
- Dynamics of soil physical-chemical properties and organic carbon content along a restoration chronosequence in *Pinus tabulaeformis* plantations HU Huifeng, LIU Guohua (1212)
- Probability models of forest fire risk based on ecology factors in different vegetation regions over China LI Xiaowei, ZHAO Gang, YU Xiubo, et al (1219)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Landscape ecological security dynamics in a fast growing urban district: the case of Dongguan City YANG Qingsheng, QIAO Jigang, AI Bin (1230)
- The difference between exergy and biodiversity in ecosystem health assessment: a case study of Jiangsu coastal zone TANG Dehao, ZOU Xinqing, LIU Xingjian (1240)
- Impacts of drying-wetting cycles on CO₂ and N₂O emissions from soils in different ecosystems OUYANG Yang, LI Xuyong (1251)
- Evaluation of low-carbon competitiveness in Western China JIN Xiaoqin, DU Shouhu (1260)
- Flood return period analysis of the Bayi Reservoir Watershed based on HEC-HMS Model ZHENG Peng, LIN Yun, PAN Wenbin, et al (1268)
- Simulation of rainfall interception process of primary korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains by using the modified Gash model CHAI Rushan, CAI Tiju, MAN Xiuling, et al (1276)
- Characteristics of tree-ring chronology of *Pinus koraiensis* and its relationship with climate factors on the northern slope of Changbai Mountain CHEN Lie, GAO Lushuang, ZHANG Yun, et al (1285)

Resource and Industrial Ecology

- Nitrogen flows in "crop -edible mushroom" production systems in Hexi Corridor Oasis Irrigation Area LI Ruiqin, YU Anfen, ZHAO Youbiao, et al (1292)
- Effects of fertilization on soil fertility indices and yield of dry-land peanut WANG Caibin, ZHENG Yaping, LIANG Xiaoyan, et al (1300)
- Effect of tillage and residue management on dynamic of soil microbial biomass carbon PANG Xu, HE Wenqing, YAN Changrong, et al (1308)
- Evaluation of eco-security of cultivated land requisition-compensation balance based on improved set pair analysis SHI Kaifang, DIAO Chengtai, SUN Xiufeng, et al (1317)

Opinions

- Methodology for measuring forestry ecological security based on ecology-industry symbiosis: a research framework ZHANG Zhiguang (1326)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 4 期 (2013 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 4 (February, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元