



# 锦绣龙虾 生物学和 人工养殖技术研究

梁华芳 何建国 著

*JINXIU LONGXIA  
SHENGWUXUE HE  
RENGONG YANGZHI  
JISHU YANJIU*



海洋出版社

# 锦绣龙虾生物学和 人工养殖技术研究

梁华芳 何建国 著

海洋出版社

2012年·北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

锦绣龙虾生物学和人工养殖技术研究/梁华芳, 何建国著. —北京: 海洋出版社, 2012. 1

ISBN 978 - 7 - 5027 - 8183 - 5

I. ①锦… II. ①梁…②何… III. ①龙虾 - 水生动物学 - 研究②龙虾 - 人工养殖 - 研究 IV. ①S966. 12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 277938 号

策划编辑: 郑珂

责任编辑: 常青青

责任印制: 赵麟苏

**海洋出版社** 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京盛兰兄弟印刷装订有限公司印刷 新华书店发行所经销

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 9

字数: 192 千字 定价: 50.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

# 前 言

龙虾是驰名世界的海产品，其营养丰富、口味鲜美、色泽鲜艳，有“虾中之王”，甚至“海中之王”的美称，在世界各地都被视为海中珍品，价格高昂。在我国，因为龙虾外观体型大，步足粗壮，并带有两条长而密布棘刺的触角，行动起来气派非凡，活像神话中的龙，在古代便被称为龙虾，是帝王将相的美食佳肴，目前也是高级宴席上的“贵族”。据报道，全球每年捕获的龙虾大约有 77 000 t，产值大约 5 亿美元；1996—2002 年全世界龙虾类（龙虾次目）年捕捞量为 77 000 ~ 83 000 t。2002 年为 78 000 t，其中龙虾科的种类为 74 695 t，龙虾属（*Panulirus*）约 61 771 t，岩龙虾属（*Jasus*）约 10 655 t，为主要渔业捕捞类群。龙虾属中主要产于加勒比海诸国的眼斑龙虾（美洲龙虾，*Panulirus argus*）总产量最大，年产量近 40 000 t；其次是产于澳大利亚的天鹅龙虾（*P. cygnus*），年产量 10 000 t 上下；其他各种龙虾产量都不太大，但具有较高的经济价值。

我国海产龙虾属龙虾有 8 种，产量最大的是中国龙虾，其次是波纹龙虾和锦绣龙虾，这 3 种龙虾也是我国养殖的主要品种。锦绣龙虾是龙虾属中个体最大的，最大个体体重达 12 kg，其生长速度快，1 年可长到 400 g，2 年可长到 1 kg。锦绣龙虾是 8 种龙虾中价格最贵的，售价高达 600 元/kg。但由于过度捕捞和近海污染，使得锦绣龙虾的资源量急剧下降，甚至已到了无龙虾可捕的境地。为了保护这一重要的海产资源，锦绣龙虾已被列为广东省二级水生保护动物，福建省重点保护水生野生动物，广东和福建等省建立了锦绣龙虾保护区。

锦绣龙虾的生物学和人工养殖技术在国内鲜有报道，我们从 2005 年开始对其主要生物学和人工繁殖、养殖技术进行了研究，希望能通过我们的一些工作，对保护和利用这一宝贵资源有所帮助。

本著作的研究工作得到中山大学翁少萍、吕玲、徐晓鹏、黄志坚和广东海洋大学杜国平、温崇庆、杨奇慧、刘楚吾等教师及参与相关研究的学生的的大力支持和帮助；部分研究工作在广东海洋大学海洋生物研究基地进行，对此我们表示衷心感谢！

在本书编写中我们参考和引用了有关专家、学者的宝贵资料和文献，在此表示衷心感谢。

由于水平所限，错误与不足之处在所难免，敬请各位专家和读者批评指正。

著 者  
2011 年 6 月

# 目 录

<b>第一章 概述</b> .....	(1)
第一节 龙虾简介 .....	(1)
第二节 龙虾的资源 and 分布 .....	(2)
第三节 龙虾生活史 .....	(4)
第四节 龙虾生物学和人工繁殖研究概况 .....	(4)
第五节 世界龙虾养殖概况 .....	(15)
<b>第二章 锦绣龙虾形态构造</b> .....	(16)
第一节 锦绣龙虾的外部形态 .....	(16)
第二节 锦绣龙虾的内部构造 .....	(17)
<b>第三章 龙虾的分类</b> .....	(24)
第一节 锦绣龙虾的系统分类地位 .....	(24)
第二节 锦绣龙虾的分子分类 .....	(28)
<b>第四章 锦绣龙虾的种质</b> .....	(35)
第一节 锦绣龙虾的 $\beta$ -actin 基因 .....	(35)
第二节 锦绣龙虾线粒体全序列分析 .....	(37)
<b>第五章 锦绣龙虾的生活习性</b> .....	(59)
第一节 锦绣龙虾栖息习性 .....	(59)
第二节 锦绣龙虾的食性与摄食行为 .....	(59)
第三节 锦绣龙虾对环境的适应 .....	(60)
<b>第六章 锦绣龙虾的繁殖生物学</b> .....	(63)
第一节 锦绣龙虾的繁殖期及性腺发育 .....	(63)
第二节 锦绣龙虾胚胎发育 .....	(65)
第三节 锦绣龙虾幼体发育 .....	(68)
<b>第七章 锦绣龙虾的生长</b> .....	(76)
第一节 锦绣龙虾的蜕皮和蜕壳 .....	(76)
第二节 附肢的再生 .....	(77)
第三节 锦绣龙虾生长 .....	(78)
<b>第八章 锦绣龙虾生理学研究</b> .....	(84)
第一节 锦绣龙虾消化酶活力 .....	(84)
第二节 锦绣龙虾耗氧率和窒息点的研究 .....	(90)

<b>第九章 锦绣龙虾人工繁殖技术</b> .....	(95)
第一节 锦绣龙虾亲虾培育技术的研究 .....	(95)
第二节 叶状幼体培育 .....	(98)
<b>第十章 锦绣龙虾人工养殖技术</b> .....	(105)
第一节 锦绣龙虾工厂化养殖技术 .....	(105)
第二节 锦绣龙虾网箱养殖技术 .....	(111)
<b>参考文献</b> .....	(118)

# 第一章 概述

## 第一节 龙虾简介

龙虾有“虾中之王”，甚至“海中之王”的美称，自古以来在世界各地都被视为海中珍品，价格高昂。龙虾是虾类中最大和最美丽的虾种。它躯体粗壮，呈扁圆形，壳色鲜艳，有美丽的斑纹，腹较短，头胸甲坚硬，且多棘刺，触角发达，两条长而带有棘刺的第2触角和5对粗壮的步足，伸展起来很像神话里的龙，早在远古时期便被称为龙虾，过去是帝王将相的美食佳肴，在世界各国都是传统的高级海鲜，现在也是高级宴席常见的品种。

在动物学中，汉语“龙虾”与英文的“lobster”范围不同，前者是指龙虾下目的种类，包括多螯虾（Polychelidae）、龙虾（Palinuridae）和蝉虾（Scyllaridae），而不包括西方称为lobster的螯虾下目Astacidea的螯虾和螯龙虾。亚洲地区所称之龙虾则是指无螯足的龙虾（spiny lobster），隶属龙虾科（Palinuridae）的种类，是大型名贵爬行虾类。以前，由于东西方文化的差异，龙虾的表示较为混乱，现在比较统一的认识是以“lobster”或“clawed lobster”表示海产螯虾，“crayfish”表示淡水螯虾，“spiny lobster”则为东方国家所称的龙虾，然而所有这些龙虾次目（Palinuridea）的种类都可统称为“lobster”。本文所指龙虾类属于龙虾科的种类。

龙虾的身体由头胸部、腹部和附肢组成。龙虾属的种类其身体前端不具额角，仅有触角板，无眼眶，有眼上刺；第1触角柄部细长，分3节，末端生出内外两肢；第2触角柄部粗壮，亦分3节，具大棘，末端生着一长鞭，柄部第1节基部内凹，与触角板侧缘之隆脊构成特殊的响器。5对步足形状相似，末端呈爪状，唯雌性第5步足末端形成假螯；腹部较短小，腹肢十分退化，两性皆不具第1腹肢，第2至第5腹肢呈叶片状，雄性单肢，无内肢，雌性双肢，内外肢均发达；尾肢宽阔，与宽大尾节形成强大的尾扇。

龙虾一般生活在温暖的海底中，喜在岸边爬行，行动缓慢，不善游泳，生性畏强光，白天潜伏在礁缝隙中，夜出觅食，以小鱼、小贝类、蟹类、海胆、藤壶、多毛类和海藻为饵料。龙虾食量大，耐饥饿能力强，一周不进食也不会饿死。

龙虾一般栖息于高盐的海区中，栖于几米到数十米不等深度的岩礁缝隙、石洞、珊瑚礁中，有群栖习性，不同种类的龙虾可以和平共处，但在饥饿时会相互残食，刚蜕壳的龙虾常成为被攻击的对象。龙虾喜厮斗，并由响器发出“吱吱”声用以惊吓对方，遇到敌害或环境恶劣时也会发出声音。

龙虾耐低氧能力强,离水一段时间也不会死亡。因而运输方便,可用水车运输,也可以干运。在控制温度和氧气的条件下,干运 10 h 成活率可达 100%。

龙虾营养价值高,味道鲜美。一只龙虾可食部分占体质量的 60%,经初步分析,中国龙虾成分(食用部分)100 g 中的含量如下:水分 76 g、蛋白质 19.37 g、脂肪 1.6 g、碳水化合物 0.7 g、灰分 1.8 g、钙 41.95 mg、磷 266.7 mg。

龙虾的壳也能充分利用。由于龙虾有 1 对超出体长的触角、1 对尖锐的眼上刺、5 对粗壮的步足、宽大的尾扇,加上诱人的体色和斑纹,显得威武好看,所以,由龙虾壳制成的标本和工艺品,也深受人们欢迎。龙虾的壳较大、较厚,是提取甲壳素的好原料,甲壳素在医药、生物防护、保鲜剂制作等方面的应用前景广阔。

### 第二节 龙虾的资源 and 分布

据报道,全球每年捕获的龙虾大约有 77 000 t,产值大约 5 亿美元。1996—2002 年全世界龙虾类(龙虾次目)捕捞量约 7.7 万~8.3 万 t,2002 年为 7.8 万 t,其中龙虾 74 695 t,蝉虾类 3 619 t。龙虾类中的龙虾属(*Panulirus*)约 61 771 t,岩龙虾属(*Jasus*)约 10 655 t,为主要渔业捕捞类群。龙虾属中主要产于加勒比海诸国的眼斑龙虾(亦称美洲龙虾,*Panulirus argus*)总产量最大,年产量近 4 万 t;其次是产于澳大利亚的天鹅龙虾(*P. cygnus*),年产量 1 万 t 上下;其他龙虾属种类产量都不太大,但具有较高的经济价值,多为混合捕捞中的重要产物,分检出后常可卖出高价。龙虾生活在平软底质(泥质或沙质)的可用拖网捕获,但多数龙虾是通过虾笼或其他陷阱类网具捕获的。我国从 20 世纪 90 年代较多消费海产龙虾以来,全国大中城市市场上的龙虾大部分都是进口产品。据报道,1998 年上海、北京、广州等城市进口活龙虾的总量不少于 1.5 万 t。2002 年以来,仅广州的南沙水产批发市场进口的龙虾就超过了 2 000 t。

龙虾在我国福建南部、台湾和广东近海是受重视的渔业资源之一。福建省晋江的围头,龙海的浯屿,东山沿海诸岛;广东陆丰的甲子、湖东、碣石,海丰的遮浪,惠阳的澳头,台山的上、下川岛,阳江的沙扒,电白的南海,湛江的硃洲岛等都是龙虾的产地。海南岛的文昌、琼海、万宁、陵水、崖县沿海地区皆有龙虾分布,尤其是我国的西沙群岛盛产多种龙虾(纪成林,1976 a)。其中产量较大的是中国龙虾(*Panulirus simpsoni*),波纹龙虾(*P. homarus* Linnaeus, 1758)和锦绣龙虾(*P. ornatus* Fabricius, 1798)。

龙虾属的种类全世界共有 19 种(表 1-1),在印度-西太平洋区有 10 种,我国分布的龙虾有 8 种,包括中国龙虾、波纹龙虾、日本龙虾、长足龙虾、锦绣龙虾、密毛龙虾、黄斑龙虾和杂色龙虾。由于过度的捕捞和环境污染等原因,资源量已较少,中国沿海地区如广东、福建和海南等,都把锦绣龙虾列入二级保护水生动物或重点保护水生野生动物。



表 1-1 龙虾属种类及分布 (来源: FAO's Species Catalogue No. 13)

种类/拉丁文学名	地理分布
中国龙虾 ( <i>Panulirus stimpsoni</i> )	印度-西太平洋地区: 中国的南部沿海上海至汕头之间、台湾、香港, 泰国
锦绣龙虾 ( <i>Panulirus ornatus</i> )	印度-西太平洋地区: 从红海和非洲东部至日本南部、澳大利亚、斐济群岛和所罗门群岛
波纹龙虾 ( <i>Panulirus homarus</i> )	印度-西太平洋地区: 东非到日本、印度尼西亚、澳大利亚、新喀里多尼亚和玛贵斯群岛
日本龙虾 ( <i>Panulirus japonicus</i> )	仅分布于西太平洋的日本, 韩国, 中国东海近海、厦门和台湾
杂色龙虾 ( <i>Panulirus versicolor</i> )	印度-西太平洋地区: 整个红海和非洲东岸到日本南部、密克罗尼西亚、美拉尼西亚、澳大利亚和波利尼西亚
黄斑龙虾 ( <i>Panulirus polyphagus</i> )	印度-西太平洋地区: 从巴基斯坦和印度到越南、菲律宾、印度尼西亚、中国、澳大利亚北部和巴布亚海
长足龙虾 ( <i>Panulirus longipes</i> )	印度-西太平洋地区: 从非洲东部到日本和波利尼西亚。亚种 <i>P. l. longipes</i> 从非洲东部到泰国、台湾、菲律宾和印度尼西亚, <i>P. l. femoristriga</i> 分布在日本、印度尼西亚、新几内亚、澳大利亚等
密毛龙虾 ( <i>Panulirus penicillatus</i> )	印度-西太平洋和东太平洋地区: 自红海、非洲东岸到日本、中国、夏威夷、美国西岸的 Clipperton 岛, 有些分布在墨西哥海岸
断沟龙虾 ( <i>Panulirus interruptus</i> )	东太平洋地区: 加利福尼亚湾及下加利福尼亚半岛的太平洋海岸, 北至加利福尼亚州的圣路易斯奥比斯波
眼斑龙虾 ( <i>Panulirus argus</i> )	西大西洋区: 百慕大群岛、美国北卡罗来纳州到里约热内卢、巴西
天鹅龙虾 ( <i>Panulirus cygnus</i> )	印度-西太平洋地区: 限于澳大利亚西部的亚热带海域 (21°48'S ~ 34°30'S)
棘刺龙虾 ( <i>Panulirus echinatus</i> )	巴西东北部和大西洋群岛
<i>Panulirus gracilis</i>	西太平洋地区: 从加利福尼亚半岛 (墨西哥) 到秘鲁派塔和加拉帕戈斯群岛 (厄瓜多尔)
斑点龙虾 ( <i>Panulirus guttatus</i> )	西大西洋地区: 百慕大群岛、巴哈马群岛、南佛罗里达、伯利兹、加勒比海
<i>Panulirus inflatus</i>	东太平洋地区: 主要分布在墨西哥西海岸
滑尾龙虾 ( <i>Panulirus laeviscauda</i> )	西大西洋地区: 百慕大群岛和佛罗里达到巴西
<i>Panulirus marginatus</i>	夏威夷群岛
<i>Panulirus pascuensis</i>	南太平洋地区: 智利的复活节岛和皮特克恩岛
华贵龙虾 ( <i>Panulirus regius</i> )	东大西洋地区: 非洲西岸, 介于摩洛哥和地中海西岸 (西班牙东岸、法国南岸)

### 第三节 龙虾生活史

龙虾 (*Panulirus*) 的受精卵经过 22 ~ 90 d, 甚至更长时间的胚胎发育期 (不同种类和不同水温条件决定孵化时间), 初孵出的幼体为龙虾叶状幼体 (*Naupliosoma*), 是生命周期的开始, 1 h 后变为叶状幼体期 (*Phyllosoma*), 叶状幼体营浮游生活, 浮游时间长短依种类不同而有差异, 有的种类只需要 3 个多月 (如 *Palinurus elephas*), 有的种类要半年甚至更长的时间 (如日本龙虾), 经过 10 ~ 11 期的变态, 变成游龙幼体 (*Puerulus*), 从游龙幼体开始转入底栖生活, 再变态成幼龙虾 (*Juvenile*)。幼龙虾经过多次蜕壳, 逐渐长大, 小规格龙虾 (<10 g) 蜕壳周期约为 10 ~ 15 d, 并随长大蜕壳周期变长。大规格的龙虾 (>500 g) 蜕壳周期 2 ~ 3 个月。当龙虾长到成体后便可达到生理成熟。达到生理成熟的龙虾其大小因种而异, 中国龙虾大小为头胸甲长 5.0 ~ 6.0 cm, 年龄为 15 个月, 体质量达 250 g; 波纹龙虾繁殖月龄为 15 个月, 体质量达 250 ~ 400 g; 锦绣龙虾繁殖月龄为 28 ~ 29 个月, 体质量达 950 ~ 1 000 g。具有繁殖能力的龙虾, 在适宜的温度和盐度等生态条件下, 性腺逐步发育成熟。龙虾交配后的 1 ~ 30 d 才产卵, 产出的卵黏附在腹部附肢上, 并在腹肢上完成整个胚胎发育周期。

### 第四节 龙虾生物学和人工繁殖研究概况

#### 一、龙虾生活习性

##### (一) 龙虾栖息习性

龙虾的叶状幼体营浮游生活, 幼龙虾和成龙虾营底栖生活。生活在水深 8 ~ 200 m, 多分布在 20 ~ 30 m 的浅海里; 常栖息于礁石缝隙、乱石堆、珊瑚丛中。龙虾昼伏夜出, 白天多隐匿于岩礁石洞中, 头部和触角露于外, 仅显露两对触角和头部, 第 2 触鞭常向前摆动或呈“V”字形分开, 用以感触外部动向; 夜间龙虾外出觅食, 经过养殖驯化的龙虾, 白天也外出觅食; 遇到恶劣的环境时会逃离洞穴。

龙虾依靠步足爬行, 不善游泳, 行动较迟缓, 但触角反应较灵敏, 遇有敌害就转动第 2 触角, 由摩擦发音器发出“吱吱”声响, 用以惊吓对方。受惊时, 龙虾常屈腹弹跳, 引体向后, 被捕后使用尾扇频频拍打胸部挣扎摆脱。龙虾喜厮斗, 常以俯冲方式攻击对方。

龙虾有群栖习性, 虾群区域性明显, 常因季节水温变化和索饵、生殖等因素发生迁移。通常, 夏季栖于浅水处, 秋冬移向较深海区, 繁殖时又回到浅海处。

##### (二) 龙虾的食性

龙虾以摄食动物性饵料为主, 也摄食植物性饵料。凡能得到的小鱼、虾、蟹类、

小贝类、海胆、藤壶、多毛类等均可食，在它们的胃中也常可见到藻叶碎片。人工投饲中，喜食鱼类、贝类、虾蟹类等，也食对虾人工配合饲料。龙虾食量大，耐饥饿能力强，食物缺乏时，7~10天不进食也不致饿死。

## 二、龙虾繁殖生物学

### (一) 龙虾繁殖期及繁殖次数

不同龙虾繁殖期不同，如中国龙虾2—10月为繁殖期，多为3—9月，6—9月为抱卵峰期，一年可抱卵1~3次。波纹龙虾的生殖期为5—9月，盛期为7—8月，一年可抱卵3次，间隔为15~20 d。Chittleborough (1976) 报道长足龙虾 (*P. longipes cygnus*) 在天然海区1年繁殖1~2次，在室内提供丰足饵料和高温条件下，1年繁殖多达6次。Kittaka (1989) 等报道日本龙虾1年繁殖1次。

### (二) 龙虾性腺发育

#### 1. 雄性生殖系统及性腺发育

龙虾的雄性生殖系统由精巢、输精管、精囊和雄性生殖孔组成。精巢为一对棒状体，其横切面由胶原纤维索、网状结缔组织和曲细精管组成。精囊位于两边输精管的末端，起源于邻近的输精管，由高度进化的管状结构组成，包含精子群和凝胶组织，且组织学观察显示，精囊的管壁由中性黏多糖组成，而精子群和凝胶组织中含有丰富的酸性黏多糖。

关于精子发生的研究报道较少，韦受庆 (1985) 认为中国龙虾的精子发生经过精原细胞、初级精母细胞、次级精母细胞、精细胞阶段，然后变态为精子；精原细胞近基膜，核常分叶，核仁位于核中央，染色很深；一部分精原细胞长大成为初级精母细胞。精细胞变态过程初步可分5个时期：早期精细胞期、顶体颗粒细胞期、顶体囊期、顶体分化期、成熟精子期。

龙虾精子的结构包括以下几个部分：1个细胞核、1个板层区 (lamellar region) 和顶体。核位于中央，占据精子的绝大部分，细胞核内有不凝固的染色质被核膜包围，成熟的精子为非典型精子，没有鞭毛，不能运动。

#### 2. 雌性生殖系统及性腺发育

龙虾的雌性生殖系统由卵巢、输卵管和雌性生殖孔组成。龙虾卵巢有一对，中间溢细成H状，位于心脏背侧下方，通过横肌与心脏附近肌层相连。卵巢下接输卵管，以生殖孔开口于第三步足基部。随着性腺的发育，卵巢颜色依次为透明状、乳白色、浅黄色、橘黄色和橘红色，这主要由卵黄积累引起。

中国龙虾卵巢的发育可分为6个时期。

I期：卵巢极细透明，肉眼不易观察，无色素。

II期：卵巢宽度小，半透明，卵巢内具有大量处于活跃增殖的卵原细胞，卵原细胞向卵巢中央迁移，形成增殖中心，一些卵原细胞分化形成卵母细胞。

III期：卵巢长度、宽度增加，卵巢内主要为卵母细胞，且开始积累卵黄。

IV期：卵巢继续增大，由浅黄色变成橘黄色，卵母细胞大量积累卵黄粒，体积迅

速增大,核膜、核仁清晰。

V期:卵巢体积达最大值,呈橘红色,细胞内充满卵黄。

VI期:卵巢排卵后萎缩,呈半透明管状,卵巢内具有少量卵原细胞,与发育早期相似。

中国龙虾卵子的发生分为以下几个时期:增殖期、生长期(包括小生长期和大生长期)、成熟期。在繁殖季节中,卵原细胞多次分裂而增加数量,其中一部分卵原细胞进入生长期成为卵母细胞,随卵黄增加并经成熟分裂而成次级卵母细胞,最终发育为成熟卵子。卵子的发生分期如下。

(1)增殖期:经过多次有丝分裂数量增加,卵原细胞位于卵巢中央,没有滤泡细胞包围,核位于中部,一个核仁靠在核膜上,染色很深。随后,一部分卵原细胞进入生长期,变为初级卵母细胞,外面被一层滤泡细胞包围。

(2)生长期:该期又可分为小生长期和大生长期。在小生长期,初级卵母细胞的细胞质和细胞核都增大,核仁明显,卵黄颗粒的出现标志进入大生长期,此时初级卵母细胞的细胞质中卵黄增加,卵黄颗粒变大。

(3)成熟期:细胞质中充满卵黄,细胞核不明显,细胞外仍有一层液泡包围。

### (三) 龙虾怀卵量

中国龙虾平均怀卵量 188 319 粒,最多 224 282 粒。锦绣龙虾产卵量 50 万~100 万粒,可多次抱卵。

### (四) 环境因子对性腺发育的影响

研究发现不同的光周期和温度影响日本龙虾卵巢发育和抱卵,即在水温 25℃时,不同的光周期(10L、11.25L、12.5L和14L)下饲养成熟雌性日本龙虾,结果发现光周期 14L 的实验组卵巢发育顺利,而其他 3 组卵巢发育被抑制;在相同的光周期(14L)下,水温分别为 13℃、19℃和 25℃时,发现温度高的实验组发育较快,到实验结束时,19℃组卵巢发育接近产卵临界点,而 25℃组全部抱卵。

温度对龙虾的性腺发育影响较大,如断沟龙虾在繁殖时,雌虾一般在水温 15~24℃时抱卵,14~19℃为高峰期。中国龙虾性腺发育水温在 18~30℃,过高或过低都不利于龙虾的性腺发育。

### (五) 交配及胚胎发育

龙虾在春夏之际开始交配。交配时,雌、雄龙虾相对紧贴,雄虾从第 5 步足基部突起的生殖孔排出精液,黏附在雌虾第 4、第 5 步足间的腹甲上,不久黏液表层硬化而成黑色团块。龙虾的产卵时间因不同种类而有所区别,中国龙虾的雌虾交配后 10~30 d 两性进行产卵,而波纹龙虾则是在交配后几个小时至 4 天左右产卵。产卵时雌虾用第 5 步足分叉的爪抓破精块释放出精子,卵从第 3 步足基部生殖孔产出,并用第 5 步足挪动卵子移向腹部,同时拉开团块释出精子使卵受精。随卵产出的胶状物接触海水后凝结成卵带,系卵于第 2 腹肢内侧及第 3 至 5 腹肢两侧,卵小、球形、橙红色,抱卵量因个体大小而异,一般几十万粒至一百多万粒,由卵带串成葡萄状,整个卵群在水中随着腹肢不断煽动而舒张摆动,有利于卵子发育。刚产出的卵,呈鲜艳的橘红色,随

着胚胎的不断发育,由深至浅逐渐变化。胚胎发育到后期卵内卵黄已大量消耗,卵色浅淡而至透明。

中国龙虾和波纹龙虾均为中黄卵,卵黄丰富,且在水温 27~29℃下,胚胎发育均为 26~34 d。龙虾的胚胎发育都非常相似,但由于划分的标准不同,所以分期也不完全一致。陈昌生等(2003)将波纹龙虾胚胎发生划分为卵裂期、囊胚期(囊胚为表面囊胚)、原肠期(原肠形成以内陷为主)、无节幼虫期、7对附肢期、9对附肢期、11对附肢期、复眼色素形成期、膜内幼体期和叶状幼体形成期等 10 个时期。韦受庆(1985)对中国龙虾胚胎发生的划分与上述波纹龙虾的胚胎分期基本一致,只是将最后两个时期合称为准备孵化期。

在复眼色素形成期内,心脏原基业已形成。复眼色素区域不断增大,可占视叶直径的一半,从这期开始已可见胚体腹部的伸缩运动,胸肢伸长也很快,到期末时已全部向背弯曲,伸至胚体背面。随着卵黄进一步缩小,卵的透明度也逐渐增大。发育至膜内幼体期,其胸部和腹部分界明显,此时卵黄耗尽、卵膜变脆,稍触即破,幼体便破膜而出。

胚胎发育为在盐度 20~25、pH 值为 7.8~8.5、水温为 24~27℃时,约需 22~25 d 即可完成,在发育过程中,需维持溶解氧在 6~8 mg/l。多数龙虾可一次孵化完毕,但也有龙虾分批孵出幼体的现象,龙虾孵化完成后,时隔 10~15 d,雌虾还可再次抱卵并孵出幼体,可见龙虾繁殖能力是很强的。

#### (六) 幼体发育

出膜后的幼体,两眼细长,身体极度扁平,头胸部宽大,腹部短小,附肢十分纤细,形似压扁了的蜘蛛,因其体薄如叶片,故称之为叶状幼体(phyllsoma larva)。它靠第 3 颚足及第 1、第 2 步足的羽状外肢来运动,运动方式特殊,常以退为进,时常头部朝下,身体翻转,趋光性很强,在海区叶状幼体能借助洋流漂泊到很远海区,这也是龙虾分布范围广泛的主要原因。

龙虾幼体发育适宜的水温为 23~28℃,海水相对密度为 1.023~1.025,除对溶氧要求较高外,随着发育进展尚需有波浪条件,因此,要在人工育苗条件下完成幼体发育全过程,难度较大。日本的井上正昭花了十几年时间第一个完成了日本龙虾的幼体发育,培育 253 d,使叶状幼体变态至第 11 期,完成幼体变态全过程(yanakawa, 1989)。长足龙虾的叶状幼体完成变态的时间最短,只需 132 d。下面是长足龙虾各期叶状幼体的分类检索表。

- |                       |           |
|-----------------------|-----------|
| 1. 眼柄不分节 .....        | Stage I   |
| 眼柄分节 .....            | 2         |
| 2. 第 3 步足外肢无刚毛 .....  | Stage II  |
| 第 3 步足外肢具有刚毛 .....    | 3         |
| 3. 第 4 步足不分节 .....    | Stage III |
| 第 4 步足分 2 节或更多节 ..... | 4         |
| 4. 第 4 步足外肢无刚毛 .....  | Stage IV  |
| 第 4 步足外肢有刚毛 .....     | 5         |

5. 第1触角3节 ..... Stage V  
     第1触角4节 ..... 6  
 6. 尾肢叶芽状, 不分离 ..... VI  
     尾肢分离或分成2叶 ..... 7  
 7. 腹肢叶芽状, 不分离 ..... Stage VII  
     腹肢二叉状或分成2叶 ..... 8  
 8. 第2颚足外肢芽状无刚毛 ..... Stage VIII  
     第2颚足外肢有刚毛 ..... 9  
 9. 鳃肢芽没有出现或仅出现原基或呈乳头状 ..... Stage IX  
     第1至第4步足基节上有二叉形的鳃 ..... Stage X
- 表1-2 给出了长足龙虾各期幼体不同部位的长度。

表1-2 长足龙虾各期幼体不同部位的长度 (Hiro Kazu, 2000)

身体大小 (mm)	叶状幼体期										
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
体长	平均	1.775	2.448	30.571	5.228	6.566	9.749	14.384	20.425	28.175	34.60
	最小	1.76	2.34	2.73	5.04	6.15	7.48	12.00	19.45	25.00	—
	最大	1.79	2.54	3.62	5.53	6.95	11.85	17.35	21.40	31.00	—
头胸甲长	平均	1.015	1.54	2.442	3.766	4.878	7.370	10.809	14.675	18.125	21.30
	最小	1.00	1.47	1.75	3.60	4.53	5.58	9.10	14.10	16.50	—
	最大	1.03	1.61	2.48	4.00	5.25	9.00	12.60	15.25	19.00	—
头胸甲长	平均	0.865	1.128	1.532	2.614	2.720	4.093	6.241	8.575	11.100	13.00
	最小	0.84	1.06	1.23	2.08	2.50	3.05	5.10	8.15	10.20	—
	最大	0.88	1.16	1.57	2.25	2.85	5.00	7.35	9.00	12.30	—
腹部长度 (AL)	平均	0.265	0.280	0.376	0.434	0.496	0.640	1.018	2.300	5.700	8.60
	最小	0.26	0.27	0.34	0.40	0.45	0.53	0.75	2.10	4.70	—
	最大	0.28	0.29	0.40	0.45	0.55	0.80	1.70	2.50	6.40	—

### 三、龙虾的蜕壳与生长

#### (一) 龙虾的蜕壳

在自然海区, 叶状幼体营浮游生活, 经3~5个月的漂泊生活, 约蜕皮十几次才开始底栖生活, 此时体长约1.5~2.2 cm, 再蜕一次皮就成为体长2.5 cm左右的稚龙虾, 此后又蜕皮2~3次, 体表色素加深, 呈现出美丽的花纹色彩, 开始逐渐移向深水区, 藏匿于岩礁缝隙中生活。

龙虾通过一次次蜕壳增大身体, 蜕壳前, 硬壳之下的软壳已经形成, 蜕壳时, 头胸甲后端向上耸起, 在头胸甲与腹部交界处的背面产生裂缝, 随着裂缝增大, 新体就从裂缝中退出旧壳。在蜕去旧壳的同时, 龙虾的鳃、胃、后肠也一一脱旧更新。蜕壳后的龙虾需3~5 d才能使软壳硬化。龙虾的一生伴随着多次蜕壳, 每一次蜕壳, 身体

可增大5%~15%。龙虾寿命较长,一般在4年以上。

实验表明,稚龙虾和性腺尚未发育成熟的龙虾,几乎每月都要蜕壳。个体越大,蜕壳的周期越长,大小3g以下的小龙虾平均10d蜕壳一次,随着长大,蜕壳周期逐渐延长。龙虾蜕壳周期长短与水温及其他环境条件有关,在水温高的夏季在营养充足时,蜕壳一次体型可增大5%~8%,成熟前的龙虾蜕壳生长快速,成熟后的雄虾仍然保持较快的生长率,而雌虾则由于消耗较大能量用于产卵、抱卵孵化而生长较慢。人工养成头胸甲长为8cm的龙虾,大约需两年时间。

## (二) 龙虾生长的研究

甲壳动物的生长是阶梯式的,体长和体质量的快速增加都是在每次蜕壳之后,养殖的龙虾不如在自然环境条件下生长速度快。不同种类龙虾生长的速度不相同,在养殖条件下,眼斑龙虾(*P. argus*)从游龙幼体养殖到头胸甲长度CL为76.3mm需要5~6年的时间;天鹅龙虾(*P. cygnus*)在水温25℃条件下,从35mm CL(42g)养殖到76mm CL(378g)需要68周;黄斑龙虾(*P. polyphagus*)从游龙幼体生长到300g需要2.5年的时间。表1-3和图1-1对波纹龙虾、锦绣龙虾和黄斑龙虾生长情况作了比较,从图、表中可以看出,除锦绣龙虾外,其他龙虾从游龙幼体到80g的幼龙虾的时间接近或超过400d,且要达到380g的商品规格还需要接近400d的时间。

表1-3 4种龙虾生长的比较

种类	生长时间(d)		文献
	游龙虾幼体 (puerulii) (0.25 g) →幼龙虾 (juvenile) (80 g)	幼龙虾 (80 g) → 商业规格 (380 g)	
<i>P. homarus</i>	380	365	Radhakrishnan, Vijayakumaran (1992)
<i>P. polyphagus</i>	480	365	Radhakrishnan, Devarajan (1986)
<i>P. ornatus</i>	250	365	Radhakrishnan, Vijayakumaran (1992)
<i>P. longipes cygnus</i>	455	425	Chittleborough (1974, 1976)

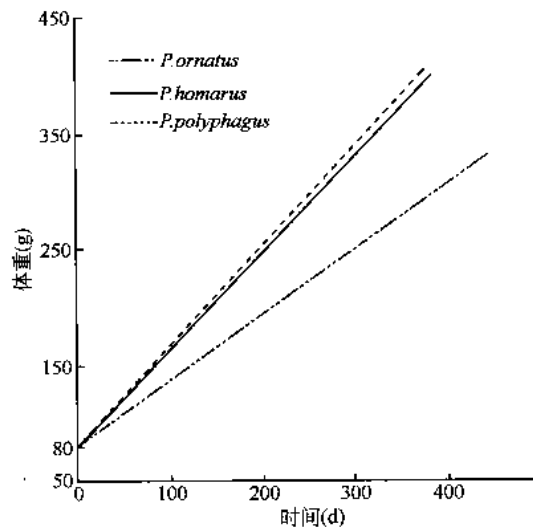


图1-1 3种龙虾生长的比较 (Radhakrishnan, 1992)

## 四、龙虾亲虾培育的研究

韦受庆等(1999)较早开展了中国龙虾亲虾的培育试验,使用20尾雌虾,经培育后,有6尾抱卵并孵化出叶状幼体。陈昌生等(2003)开展了中国龙虾和波纹龙虾亲虾培育的研究,培育出中国龙虾9尾雌虾抱卵16尾次,孵化出叶状幼体460万只,培育的波纹龙虾获得30万只叶状幼体。国外对长足龙虾(Chittleborough, 1976)、日本对龙虾亲虾培育的研究,尤其对日本龙虾的研究较多(Chubb, 1994)。

### (一) 培育设施

龙虾亲虾培育分为两个阶段,在非繁殖季节在3 m×3 m×3 m的海区网箱培育,繁殖季节移入室内培育池中进行强化培育,投放人工掩体,池面覆以黑色薄膜。

### (二) 培育密度

龙虾亲虾培育密度在1~3尾/m<sup>2</sup>,中国龙虾3尾/m<sup>2</sup>,波纹龙虾为1尾/m<sup>2</sup>;有些是将已抱卵的中国龙虾亲虾买回来暂养培育的,密度为1.0~1.5尾/m<sup>2</sup>,雌雄比为2:1。

### (三) 培育的环境要求

#### 1. 光照

亲虾培育的光照要求还不是很清楚。Hirokazu等(2002)试验结果表明,光周期14L:10d对龙虾的卵巢发育最有利。但也有在室内,将亲虾培育池面用黑色遮阳网适当遮光进行培育的。

#### 2. 水温

水温是影响龙虾性腺发育的重要因子,在适温范围内,水温越高,其发育速度越快。中国龙虾适宜水温为26~29℃,波纹龙虾适宜培育水温为28~32℃。

#### 3. 盐度

龙虾在高盐度的环境中才能成熟繁殖。例如,有用盐度为30~33和30~35培育中国龙虾和波纹龙虾的报道。

#### 4. 饵料及投喂

龙虾主要摄食动物性饵料,尤其喜食活饵料。用虾(活日本对虾、活刀额新对虾)、鱼(活弹涂鱼、活小公鱼、活黄鳝)和贝类(活偏顶蛤、活鸭嘴蛤、开口毛蚶、开口文蛤)等同时投喂中国龙虾,发现其先吃活饵,后吃鲜饵(指同种饵料),先食虾类,后食鱼类和贝类(韦受庆,1999)。培育龙虾亲虾的主要饵料有沙蚕、枪乌贼、牡蛎和贻贝等,同时投喂牡蛎肉和小杂鱼。只晚上投喂一次,白天一般不投饵。

#### 5. 病害防治

在培育中国龙虾过程中经常发现亲虾因患病而死亡的情况,主要病害有:一是褐斑病,甲壳溃疡,形成黑色斑块,病虾静卧不动,停止摄食,几天后死亡;二是胀气病,症状为甲壳变红,反应迟钝,停止摄食,肉色变暗红,慢慢胀气,最后胸腹部肌



肉松弛而死。采取的主要措施是：用  $30 \times 10^{-6}$  的漂白粉消毒海水，用  $100 \times 10^{-6}$  的漂白粉浸泡饵料 10 min，用孔雀石绿  $0.06 \times 10^{-6}$  消毒海水，杀真菌和原生动物；投放光合细菌改善水质等，可取得一定的效果。

#### (四) 产卵和孵化

##### 1. 交配和产卵

中国龙虾经过一段时间的培育，性腺发育成熟时交配并产卵。据陈昌生观察，培育水温为  $27.0 \sim 28.7^\circ\text{C}$ ，盐度为  $30 \sim 33$ ，中国龙虾雌雄发生交配行为时雌虾并不蜕壳，交配在夜间进行，雌雄虾相抱，雄虾射精于雌虾的第 3 至 5 步足间的胸板上，雌虾立即分泌黑色胶状物，形成“精包”，然后“精包”逐渐硬化，交配后数十分钟至数小时雌虾开始产卵，与此同时，雌虾以步足搔动“精包”，使精子排出，与卵受精。受精卵如葡萄状附着于腹肢的刚毛上，呈球形，大小为  $360 \sim 380 \mu\text{m}$ ，鲜橙红色。

据韦受庆等 (1999) 报道，培育水温升到  $18^\circ\text{C}$  以上，中国龙虾雌雄拥抱交配，雄虾匍伏在雌虾的背上，用步足抱住雌虾，并对其他雄虾产生敌意，不让其他雄虾靠近，或抱住雌虾到处走动，拥抱 3 天后进行交配， $20^\circ\text{C}$  以上开始产卵。

龙虾有多次抱卵的现象，中国龙虾和波纹龙虾一年可 3 次抱卵，抱卵的间隔为 15 ~ 20 d。

##### 2. 孵化

中国龙虾和波纹龙虾受精卵发育过程中颜色变化过程是：鲜橘红色→深橙红色→绛红色→绛紫色→灰白色→近透明→孵化。中国龙虾胚胎发育的适宜水温为  $23 \sim 30^\circ\text{C}$ ，高于  $31^\circ\text{C}$  孵化率低，孵出的叶状幼体活力差。 $23^\circ\text{C}$  时，胚胎发育经过 26 ~ 34 d 孵化出幼体。波纹龙虾在  $27 \sim 30^\circ\text{C}$  时胚胎发育时间为 20 ~ 25 d。

## 五、叶状幼体培育的研究

### (一) 研究概况

龙虾幼体的分期没有一致标准，一般分为叶状幼体和游龙虾幼体两个时期。目前，关于龙虾幼体培育的报道较多，但是由于叶状幼体期经历时间长，一般为半年甚至一年，对生态环境和营养需求也复杂，故叶状幼体培育仍然是世界难题，至今还没有任何一种龙虾可以进行批量人工育苗。从 20 世纪初以来，国内外学者一直致力于叶状幼体的实验室培养，并取得了一定的进展。

Oshima 于 20 世纪 30 年代就开始了龙虾的幼体饲养研究。

Inoue 和 Nonaka 于 1958—1961 年于静水式循环系统中投喂卤虫 (*Artemia salina*) 的无节幼体和成虫培养日本龙虾的叶状幼体，成功地将刚孵化的叶状幼体经 40 ~ 48 d 培养至第 VII 期。

1972 年，Dexter 用 114 d 时间把断沟龙虾 (*P. interruptus*) 的叶状幼体达到第 VI 期。使用复杂的封闭式循环培养系统，首次明确地分 3 种方式培养龙虾叶状幼体：单体培养 (individual culture)、多体培养 (multiple culture) 和群体培养 (massculture)。

1978 年 Inoue 改用水平环流式循环系统继续培养日本龙虾的叶状幼体，历时 253 d，