



· 综述 ·

## 青蛤的种质、养殖及其开发利用研究进展

董志国<sup>1,2,3\*</sup>, 段海宝<sup>1,4</sup>, 郑汉丰<sup>5</sup>, 葛红星<sup>1,2,3</sup>, 魏敏<sup>1,2,3</sup>,  
柳梅梅<sup>1,2,3</sup>, 陈义华<sup>1,2,3</sup>, 李晓英<sup>3</sup>

1. 江苏海洋大学, 江苏省海洋生物资源与环境重点实验室, 江苏 连云港 222005;
2. 江苏海洋大学, 江苏省海洋生物技术协同创新中心, 江苏 连云港 222005;
3. 江苏海洋大学, 江苏省海洋生物技术重点实验室, 江苏 连云港 222005;
4. 江苏省生态环境评估中心, 江苏 南京 210000;
5. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090

**摘要:** 青蛤是沿海地区重要的海产经济贝类, 广泛分布于中国沿海的滩涂及河口地区, 在中国已开展了广泛的养殖和浅海增殖。本文从青蛤的基因组学、系统分类、种群多样性、遗传发育、苗种繁育、养殖生态、生理生化和营养及药用价值方面, 系统地综述了青蛤的种质资源发掘、评价与利用研究进展, 并就野生资源的保护与评估、育苗技术与良种选育、绿色高效养殖与碳汇渔业以及营养价值与深加工等方面提出了未来的发展方向。

**关键词:** 青蛤; 种质资源; 繁殖发育; 养殖生态

中图分类号: S 968.3

文献标志码: A

青蛤 (*Cyclina sinensis*) 广泛分布于中国沿海的滩涂及河口地区, 俗称黑蛤、铁蛤、圆蛤和牛眼蛤等。关于青蛤的种质资源与养殖利用研究主要集中在分类学、群体遗传学、苗种繁育生物学、养殖技术、生理生态学、营养及药用价值等方面, 相关的综述性文章或聚焦于青蛤药用价值<sup>[1]</sup>、或着眼于育苗与养殖技术<sup>[2]</sup>、或相关内容陈述<sup>[3-4]</sup>。本文系统地介绍了青蛤的最新研究进展, 以为青蛤产业可持续发展提供借鉴与展望。

### 1 青蛤分类学及群体遗传评价

#### 1.1 青蛤基因组及分类学

青蛤分类历史上由于信息迟滞性和认识水

平所限, 出现了一些同物异名现象。现学名 *Cyclina sinensis* (Gmelin, 1791), 是由德国博物学家 Johann Fredrich Gmelin 命名, 曾用名或同物异名如 *Artemis orientalis* (Sowerby, 1852) 和 *Venus chinensis* (Chemnitz, 1788) 已废除。目前学术界明确认可的分类地位是瓣鳃纲 (Lamellibranchia) 异齿亚纲 (Heterodonta) 帘蛤目 (Venerida) 帘蛤科 (Veneridae) 青蛤亚科 [Cyclininae (Frizzel 1936)] 青蛤属 [*Cyclina* (Deshayes 1850)]<sup>[5]</sup>。近些年研究者在分子水平上对青蛤的分类进行了比较深入的研究, Dong等<sup>[6]</sup>确定了青蛤线粒体基因组, 核酸总数 21 799 bp, 包含 13 个蛋白质编码基因, 22 个 tRNA 基因, 2 个 rRNA 基因和 1 个非编码控制区域, 并进一步构建了 12 个邻近物种系统发

收稿日期: 2020-12-22 修回日期: 2021-06-13

资助项目: 国家现代农业产业技术体系专项; 江苏省高等学校自然科学研究重大项目 (18KJA240001); 江苏省自然资源发展专项-海洋科技创新项目 (JSZRHYKJ202008); 江苏省现代农业自主创新项目 [CX(20)3150]; 江苏省渔业科技类项目 (Y2018-27)

通信作者: 董志国 (照片), E-mail: dzg7712@163.com



育进化树,佐证了青蛤与文蛤 (*Mererix meretrix*) 亲缘关系较为接近且独为一个亚科,即青蛤亚科。程汉良等<sup>[7]</sup>利用 16S rDNA 序列与赵婷等<sup>[8]</sup>利用 16S rRNA 序列得出了相似的结论。

染色体核型分析是生物分类学和遗传学的基础。段海宝等<sup>[9]</sup>以青蛤成熟性腺为材料,成功制备单倍体染色体,与青蛤二倍体染色体互相印证,弥补了以往学者研究的不足,将过去认为的  $2n=36$  修正为  $2n=38$ ,核型组成为  $2n=22m+12sm+4st$ ,  $NF=76$ ,未发现性染色体和随体染色体(图 1)。基于此,采用 Illumina 二代高通量测序、三代测序辅助组装技术在染色体水平上对

青蛤全基因组进行了 *De novo* 测序组装,最终获得了高质量的青蛤全基因组,contingN50 达到 2.6 Mb、scaffoldN50 长度达 46.5 Mb、基因组大小 903.2 Mb,包含 27 564 个基因,覆盖度达 99.80% (表 1)<sup>[10]</sup>;基于全基因组构建青蛤系统进化树支持前述作者分类结果。

## 1.2 青蛤种群多样性

多种分子标记综合分析生物的遗传结构和遗传多样性尤为重要。姜秦爱等<sup>[11]</sup>利用 AFLP 技术分析了我沿海 4 个地理群体(潍坊、南通、宁波和温州)野生青蛤的遗传多样性,发现 4 个地理群体青蛤未有明显的遗传分化。Zhao 等<sup>[12]</sup>

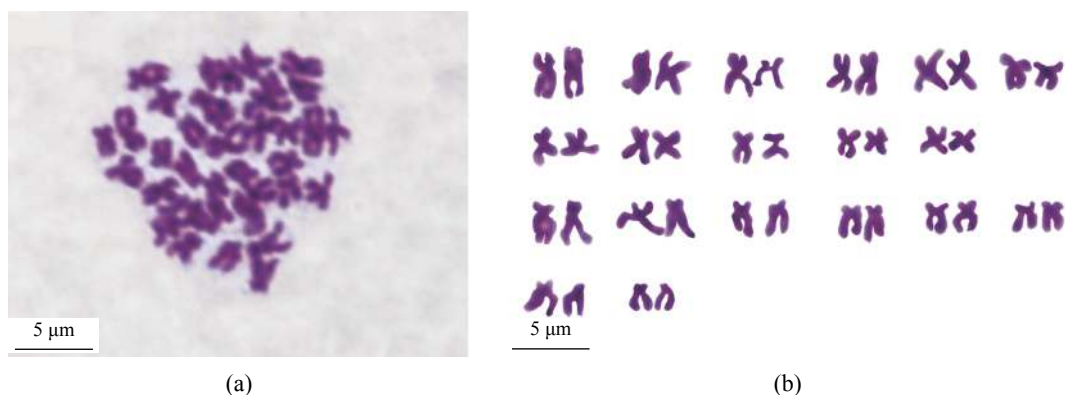


图 1 青蛤中期分裂相染色体及核型<sup>[9]</sup>

(a) 青蛤中期分裂相染色体, (b) 青蛤染色体核型

Fig. 1 Metaphase chromosome and karyotype of *C. sinensis*

(a) metaphase chromosomes of *C. sinensis*, (b) karyotype of *C. sinensis*

表 1 青蛤基因组序列和组装质量的评估<sup>[10]</sup>

Tab. 1 Assessment of the genome sequence and assemble quality of *C. sinensis*

项目 item	评价参数 assessment index	数据分析 data statistics
测序片段 reads	匹配率/% mapping rate	95.59
	平均测序深度 average sequencing depth	49.41
基因组 genome	重叠群/kb contig N50	2 587.1
	长重叠群/kb scaffold N50	46 470.1
	测序片段覆盖率/% Coverage	99.80
	4X测序片段覆盖率/% coverage at least 4X	99.59
基因组大小/Gb genome size		0.90
完整单拷贝直系同源基因比率/% complete BUSCO		92.7

注: 匹配率, 比对到基因组上的 reads 的比例; 平均测序深度, 基因组上每个碱基被 reads 覆盖的平均深度; 测序片段覆盖率, 基因组被 reads 覆盖的比例; 4X测序片段覆盖率, 基因组被4X reads 覆盖的比例

Notes: mapping rate, the number of total reads that mapped to the assembled genome; average sequencing depth, the average sequencing depth that mapped to assembled genome; coverage, the sequence coverage of the assembled genome; coverage at least 4X, the coverage percentage of bases with depth > 4X in whole genome bases

利用 AFLP 技术证明了我国南方 (乐清和东兴) 与北方 (旅顺和连云港) 群体野生青蛤出现了明显分化现象。白胡木吉力图等<sup>[13]</sup>利用 RAPD 技术分析了辽宁盘锦、庄河及山东东营野生青蛤遗传多样性, 表明 3 个地理群体青蛤尚未出现明显的遗传分化, 但保持较高的遗传多样性。由于栖息地环境差异性, 我国南北沿海 (辽宁、天津、江苏、浙江和福建) 的青蛤形态存在一定的差异, 结合 RAPD 分析, 表明 5 个地理群体青蛤存在较高的遗传变异<sup>[14]</sup>。另外, 不同月龄青蛤活体质量差异较大, 进而影响形态性状<sup>[15]</sup>, 说明不同月龄的青蛤形态也存在一定的差异, 这可能导致利用形态学参数进行聚类分析存在一定问题, 而仅采用贝类形态指标不能完全反映群体间地理分布特征<sup>[16]</sup>。同样是利用 RAPD 分析辽宁庄河与广东惠东青蛤野生群体时, 发现两个地理群体出现了明显的种群分化现象<sup>[17]</sup>。邵艳卿等<sup>[18]</sup>利用 SSR 技术分析了 6 个不同地理群体青蛤的遗传结构, 发现青蛤具有较高的遗传多样性, 广西群体较山东、江苏及辽宁群体出现了低程度的遗传分化。Dong 等<sup>[19]</sup>、方军等<sup>[20]</sup>及 Pan 等<sup>[21]</sup>开发的青蛤 SSR 分子标记技术, 为青蛤种质评价提供了新的有效分子标记。袁媛等<sup>[22]</sup>利用 ITS1 序列分析法, 说明青蛤黄渤海 6 个野生群体未出现遗传分化, 而日本群体形成了明显的地理隔离及遗传分化。Ni 等<sup>[23]</sup>利用现代分子系统地理学, 采用 mtCOI 和 ITS1 分子标记, 证明了长江河口淡水汇入及海流扩散未造成显著的青蛤种内分化现象, 并指出人类捕捞和养殖活动可能在短时间内破坏历经几万年形成的遗传格局和遗传谱系。虽然近距离的地理隔离尚未导致青蛤种群分化, 但同地理群体对某一特定环境因子的耐受性可能存在差异, 孙长森等<sup>[24]</sup>认为宁波青蛤群体对低盐的耐受力强于台州、温州和南通, 而南通青蛤群体对低盐最敏感。

综上所述, 由于我国复杂的海洋环流系统 (暖流、沿岸流、局地环流), 南北沿海温盐差异及不同大小的江河入海口, 使得广温广盐性的青蛤, 存在一定的地理隔离及遗传分化现象。当然, 较高的遗传多样性也是青蛤环境适应能力、生产能力和进化潜力的内在表现<sup>[13]</sup>。值得注意的是, 由于青蛤远距离种群已经出现了明显的遗传分化现象, 因此在引种或人工采苗时应考虑到种群遗传结构的差异<sup>[17]</sup>, 这也暗示了青蛤

具有较高的杂交育种潜力<sup>[14]</sup>。

## 2 青蛤苗种生产及养殖技术

### 2.1 青蛤性腺发育及生活史

对不同季节、不同地理分布和不同栖息环境下青蛤的繁殖生物学研究发现, 连云港海区和东营海区青蛤群体的性比不存在显著差异 (自然比为 1:1), 但海南岛海口海区青蛤群体的性比存在一定差异, 接近于统计学显著水平<sup>[25]</sup>, 这一差异的原因需要利用多种生物技术在多维度视角下深入开展研究工作, 才能找到更科学的答案。利用框架法结合多元分析方法分析生殖季节雌雄青蛤的 11 个形态差异, 并建立判别方程尝试从外部形态鉴定其性别, 但结果仍无法准确鉴定<sup>[26]</sup>。而且对青蛤进行染色体核型分析亦未发现性染色体的存在<sup>[9]</sup>。关于青蛤生物学最小型的研究较少, Chung 等<sup>[27]</sup>认为韩国西部青蛤的生物学最小型为壳长 2.51~3.00 cm, 而本课题组于 2020 年 8 月成功催产了壳长为 1.6 cm 左右的 1 龄青蛤, 且排放率超过 50%。青蛤性腺发育分为 5 期, 分别为休止期、发生期、增殖期、成熟期及排放期, 一般认为青蛤于排放期大量排放配子<sup>[28]</sup>。影响贝类性腺发育的因素主要有内在因素 (基因差异) 和外在因素 (水温、饵料和水质等)<sup>[29]</sup>。由于青蛤广泛分布于我国的南北沿海及朝鲜半岛、日本沿海, 因此, 不同地区的青蛤繁殖时间及水温存在一定的差异, 山东乳山青蛤繁殖期为 6—9 月, 水温为 22.02~27.00 °C<sup>[30]</sup>; 黄河三角洲青蛤繁殖期为 6—9 月, 水温为 21~30 °C<sup>[29]</sup>; 大连海区青蛤繁殖期为 7—9 月, 水温 24.0~26.8 °C<sup>[28]</sup>; 福建漳浦县佛昙湾潮间带青蛤繁殖期为 9—11 月, 水温为 28~24 °C<sup>[31]</sup>。本课题组连续多年从浙江乐清、福建北部一带采集发育成熟的亲贝, 可以实现 5 月异地提早繁殖。耿绪云等<sup>[32]</sup>为培育青蛤大规格苗种, 以升温为手段, 成功将青蛤繁殖期提前 1 个月。青蛤胚胎发育、幼虫发育及稚贝发育时间见表 2, 青蛤受精卵在平均水温为 28 °C 时, 11 h 即进入担轮幼虫期, 前提是要有开口饵料提供, 48 h 即进入匍匐幼虫期, 需要有附着基提供附着变态<sup>[33]</sup>。

### 2.2 青蛤育苗技术

青蛤的育苗方法主要有两种, 一是青蛤半

表 2 青蛤胚胎、幼虫和稚贝发育时间

Tab. 2 Development time of embryos, larvae and juvenile clam of *C. sinensis*

发育阶段 stage	发育时间 time	发育阶段 stage	发育时间 time
受精卵、释放第一极体 zygote, polar body 1	10~20 min	囊胚期 blastula stage	6 h 40 min
第二极体 polar body 2	20~40 min	原肠胚期 gastrula stage	8 h 30 min
2细胞期 2-cell stage	40 min~1 h 20 min	担轮幼虫期 trochophore larva stage	11 h
4细胞期 4-cell stage	2 h 10 min	D形幼虫期 D-shape larva stage	16 h
8细胞期 8-cell stage	3 h	壳顶幼虫 umbo larvae	20 h
16细胞期 16-cell stage	3 h 50 min	匍匐幼虫 creeping larva stage	48 h
32细胞期 32-cell stage	4 h 40 min	单水管稚贝 single pipe juvenile	7 d
桑葚期 morula stage	5 h 50 min	双水管稚贝 double pipe juvenile	20 d

人工采苗，二是青蛤人工育苗。全人工育苗可在一定程度上突破自然条件的限制，从而提高育苗效率，进行良种选育。青蛤人工育苗又可分为土池育苗及工厂化育苗，土池育苗是模拟自然海区，人为可控的条件有限，在育苗效率方面与工厂化育苗相差甚远。青蛤工厂化育苗工艺流程如图 2 所示。青蛤受精卵孵化密度为 8~12 个/mL 时，孵化率能达到较高水平，幼虫培育密度为 8~12 个/mL 时，幼虫生长速率和存活

率可达到较高水平<sup>[34]</sup>。底质中的硫化物含量随着青蛤稚贝密度的增大而升高，从而影响稚贝的生长与存活，所以李长松等<sup>[35]</sup>建议稚贝的培养密度为 200 个/cm<sup>2</sup>。对黑色波纹板、透明波纹板、筛绢、塑料薄膜、扇贝养成笼托盘、扇贝网片和细砂 7 种附着基的选择性研究表明，青蛤以黑色波纹板和塑料薄膜的变态效果最好，幼虫变态率高<sup>[36]</sup>。陈坚等<sup>[37]</sup>认为青蛤育苗实际生产中，选用 1 mm 厚度海泥作为附着基的青蛤幼虫生长

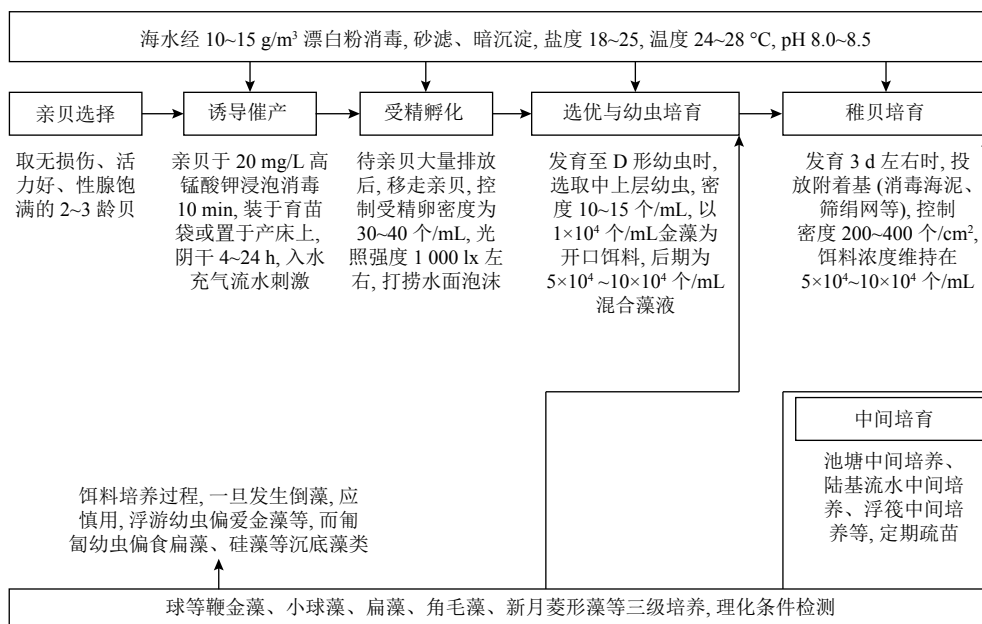


图 2 青蛤工厂化水泥池育苗工艺流程

整理自江苏省地方标准 DB32/T 895-2006, 连云港海浪水产养殖有限公司企业标准 Q/HLSC 001-2020

Fig. 2 Technological process of breeding *C. sinensis* in industrial cement pond

Figure is compiled from the local standard of Jiangsu Province DB32/T 895-2006, and the corporate standard of Lianyungang Hailang Aquaculture Co., Ltd. Q/HLSC 001-2020



与存活情况最好, 而不是黄沙或不投附着基。就青蛤幼虫而言, 混合微藻较单一微藻更适宜其生长发育<sup>[38]</sup>, 较球等鞭金藻 (*Isochrysis galbana*)、微绿球藻 (*Nannochloropsis oculata*) 和绿色巴夫藻 (*Pavlova viridis*), 青蛤稚贝更喜食角毛藻 (*Chaetoceros calcitrans*) 和青岛大扁藻 (*Tetrasemis helgolandica*)<sup>[39]</sup>。

### 2.3 青蛤养殖技术

青蛤的养殖模式主要有浅海滩涂养殖和池塘混养两种。青蛤属埋栖型贝类, 迁移性小, 适合滩涂养殖。1996—1999 年江苏省开展的“青蛤滩涂围网精养高效技术的研究”任务, 选用干露时间 4~6 h 的高潮区下部到中潮区, 底质含泥量 30% 左右的滩涂, 并进行滩面平整, 围网呈长方形, 面积约 33 333~66 667 m<sup>2</sup>, 4 月底放苗, 平均密度 56 个/m<sup>2</sup>, 规格 200~440 个/kg, 以干播为主, 收获季节青蛤增重 3.44 倍, 平均产量 0.74 kg/m<sup>2</sup>, 并且回捕率高达 96%~98%<sup>[40]</sup>。许建<sup>[41]</sup>利用南通通州约 720 000 m<sup>2</sup> 滩涂进行“青蛤滩涂高效健康养殖技术”示范, 2008 年底平潮或潮流缓慢时放苗 (规格: 1000 个/kg), 产量为 0.49 kg/m<sup>2</sup>。张洪欣等<sup>[42]</sup>在山东无棣开展了“黄河三角洲青蛤产业化生态养殖实验”研究, 于 2004 年春季进行整塘消毒, 放苗前 15 d 左右施肥至水色呈淡黄绿色, 9 月下旬每平方米投放 5 mm 左右青蛤 144 粒, 至收获时产量为 1.22 kg/m<sup>2</sup>, 规格 2~4 cm。牛化欣等<sup>[43]</sup>研究了凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*)、青蛤和菊花心江蓠 (*Gracilaria lichevroides*) 混养技术, 养殖密度分别约为 50 个/m<sup>2</sup>、30 个/m<sup>2</sup> 和 300 g/m<sup>2</sup>, 达到了减缓养殖系统有机负荷的目的, 取得了良好的生物生长和水质净化效果。王立群等<sup>[44]</sup>进行了青蛤和鲎 (*Liza haematocheila*) 混养模式研究, 收获时青蛤产量为 0.75 kg/m<sup>2</sup>, 鲎为 0.06 kg/m<sup>2</sup>, 取得了显著的经济效益。另外, 有关于青蛤混养模式的试验还有青蛤混养鱼、虾、蟹等<sup>[45-46]</sup>, 均提高了池塘利用效益。

青蛤养殖过程中偶发大批死亡现象, 其原因主要有自身因素和环境因素。一是放养密度过高, 底质恶化, 水体微藻浓度降低, 透明度高, 青苔等植物繁殖, 导致青蛤缺氧、缺少饵料等出现死亡; 二是繁殖期青蛤大量排放配子, 肥满度大幅减少, 抗病力急剧下降, 易受环境影响和病菌侵染。引起青蛤大批死亡的环境因

素主要有高温、缺氧及水质底质恶化等。值得注意的是水体污染也是引起青蛤大量死亡的主要环境因素, 水体污染包括了养殖污染、暴风雨、药物污染及污水排放等<sup>[47]</sup>。李晓英等<sup>[48-49]</sup>认为, 骤然高温和窒息胁迫能影响青蛤过氧化物酶、酸性磷酸酶和溶菌酶活性的改变, 暗示青蛤生命活动易受骤然高温和窒息的影响。另外, 当生存环境恶化时, 青蛤体质也随之下降, 致病菌进入青蛤机体, 且大量繁殖, 导致青蛤发病甚至死亡<sup>[47]</sup>。

## 3 青蛤生理生态

特定生态因子的变化对青蛤的生长、存活、能量收支、特定酶活性及转录水平等方面有一定影响, 且由于不同生态因子对青蛤的影响研究对青蛤养殖具有一定的实践指导意义, 所以此类研究是近年来青蛤研究的热点。

### 3.1 不同生态因子对青蛤生理生态的影响

**盐度对青蛤的影响** 盐度是青蛤养殖过程中影响其生长、存活和生理代谢的主要环境因子之一。研究表明, 低盐胁迫 (盐度 5 和 10) 显著降低了青蛤的滤水率<sup>[50]</sup>, 组织抗氧化酶活性表现为先升高后降低 (盐度 1~5); 青蛤响应盐度变化表现为低盐 (10) 和高盐 (35) 下生长速率下降, 抗氧化酶活性出现短暂波动后趋于平稳<sup>[51]</sup>。盐度 20 时, 青蛤耗氧率和排氨率均最高, 并随着盐度的增加或减少而逐渐下降<sup>[52]</sup>; 低盐 (13) 和高盐 (33) 显著影响了青蛤幼贝的潜沙率, 并且低盐潜沙率最低<sup>[53]</sup>; 不同盐度 (16 和 36) 胁迫下, 青蛤 Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>-ATP 酶活性表现为低盐时活性增加, 高盐时活性降低<sup>[54]</sup>。另外, 海水比重为 1.005 及 1.030 以上时, 未发现受精卵, 1.009~1.020 是青蛤受精的适宜范围, 青蛤囊胚在比重为 1.015~1.020 时发育最快, 而其他海水比重组 (1.005~1.035), 大部分胚胎解体或者滞育; 比重 1.005~1.020 时, 担轮幼虫均能发育至 D 形幼虫, 以 1.015~1.020 比重时最适; 比重 1.010~1.025 时, D 形幼虫均能发育至稚贝, 以 1.015~1.020 最适, 青蛤 D 形幼虫在淡水中 4 min 后全部死亡<sup>[55]</sup>。王丹丽等<sup>[56]</sup>认为, 青蛤孵化及浮游幼虫的适宜盐度为 15~30, 稚贝为 10~35, 最适盐度均为 20~25。总之, 青蛤对低盐的耐受能力高于高盐, 盐度胁迫下机体渗透压调节时间较抗氧化能力和能量收支缓

慢,且不同地理群体青蛤的盐度耐受性存在差异。

**温度对青蛤的影响** 温度是影响水产动物生命活动的重要环境因子之一,不同地理群体青蛤的温度适应能力存在明显差异<sup>[57]</sup>。已有关于青蛤适温能力的研究,主要集中在行为(潜沙)、呼吸代谢、能量收支、酶活性及人工育苗等方面。大连地区青蛤在 17℃ 时潜沙时间最短,21℃ 时潜沙率最高<sup>[58]</sup>。浙江慈溪青蛤在 15~28℃ 时,耗氧率逐渐上升,32℃ 急剧下降;排氨率表现为缓慢上升,32℃ 时急剧上升<sup>[52]</sup>。刘英杰等<sup>[59]</sup>研究了不同温度下天津地区青蛤能量收支的差异,结果表明 20~30℃ 时,青蛤生长能占摄食能比例较高,25℃ 时最高,暗示 25℃ 是青蛤的最适生长温度。青蛤的结冰点为 -2℃,冰温区间为 -2~0℃,在此区间青蛤 28 d 成活率可达 99%,且营养损失不大<sup>[60]</sup>。青蛤孵化和浮游幼虫生长的适温范围为 24~32℃,最适温度为 26~30℃,稚贝生长的适温范围为 22~32℃,最适温度为 24~30℃<sup>[56]</sup>。水温还可以通过影响青蛤不同组织的酶活性,间接影响青蛤的生命活动。离体条件下青蛤肝胰腺淀粉酶最适温度为 40℃,蛋白酶为 40~45℃;肠道淀粉酶活性最适温度为 35℃,蛋白酶为 40℃;胃组织淀粉酶活性的最适温度为 30℃,蛋白酶为 35~40℃<sup>[61]</sup>,说明淀粉酶和蛋白酶活性耐高温能力较强。骤然高温(16℃→32℃)与窒息环境胁迫下过氧化物酶(POD)、酸性磷酸酶(ACP)和溶菌酶(LSZ)活性的变化表明青蛤对瞬时高温和窒息不适应,导致机体产生剧烈的反应,影响自身生命活动<sup>[48-49]</sup>。以失水率、存活率、呼吸代谢酶活性和抗氧化相关酶活性为判别标准,发现 10℃ 是青蛤的最佳干露运输温度,且 48 h 存活率达 100%<sup>[62]</sup>。

#### pH 与碳酸盐碱度(CA)对青蛤的影响

目前,海洋的 pH 值较工业革命前已经降低了 0.1 个单位,预测 21 世纪末期将持续降低 0.3~0.5 个单位<sup>[63]</sup>。盐碱水在水产养殖过程中,不仅存在藻类暴发、底质恶化等问题<sup>[64]</sup>,而且还具有较高的电导率、pH 值和碳酸盐碱度(CA),以及较差的缓冲能力和不稳定的主要离子比例等问题<sup>[65]</sup>。随着 pH 值(8.3、7.7 和 7.4)的降低,青蛤死亡率逐渐升高,耗氧率逐渐升高,且较低的 pH 值对排氨率有促进作用<sup>[66]</sup>。梁建等<sup>[67]</sup>认为青蛤血细胞总数随海水酸化胁迫时间的延长,呈

显著下降趋势,抗氧化及非特异性免疫酶活性测定结果表明,低 pH 值(7.4 和 7.7)条件下,青蛤出现了生理应激,可能会超出机体可调节阈值。Sui 等<sup>[68]</sup>认为,海水酸化可能会影响青蛤早期发育而使青蛤野生资源逐渐减少。除单独研究海水酸化对青蛤的影响之外,蔡娟等<sup>[69]</sup>以钙化率、碳酸酐酶和 SOD 酶活性为判别指标研究了 pH 值对青蛤的影响,发现虽然酸碱环境变化可能使青蛤产生生理应激,但是青蛤可以承受较大的 pH(7.4~9.0)波动,并通过机体自主调节逐渐适应环境。青蛤肝胰腺中淀粉酶和蛋白酶活性的最适 pH 值分别为 6.5 和 8.0~8.5,肠道中的最适 pH 值为 6.5 和 8.0,胃组织中的最适 pH 值为 6.0~6.5 和 2.5~3.0(6.0 为最适)<sup>[61]</sup>。青蛤可以通过滤食微藻而控制盐碱水中微藻浓度,能够忍受较高的碱度和 pH 值<sup>[70]</sup>,改善生态系统的初级生产力和水质<sup>[71]</sup>,被认为是盐碱水养殖可能降低 pH 值的候选双壳贝类<sup>[72]</sup>。青蛤在盐碱水中存活的主要限制因子为  $K^+$  和 pH,其 95% 存活率下的各盐碱因子范围: $K^+$  为 234~287 mg/L,  $Ca^{2+}$  为 72~576 mg/L,  $Mg^{2+}$  为 114~2 052 mg/L,碱度为 0~40 mmol/L, pH 值为 8~9<sup>[64]</sup>。

**其他生态因子对青蛤的影响** 梁健等<sup>[73]</sup>研究了  $Cu^{2+}$  对青蛤的胁迫效应,结果表明,  $Cu^{2+}$  的 96 h  $LC_{50}$  为 0.807 mg/L,安全浓度(SC)为 0.008 07 mg/L,高浓度  $Cu^{2+}$  能够诱导青蛤产生免疫抑制并导致其抗病能力下降。 $Zn^{2+}$  对青蛤成贝及幼贝的 96 h  $LC_{50}$  分别为 191.56 和 160 mg/L, SC 分别为 1.92 和 1.60 mg/L,在鳃中的蓄积较内脏团其他组织严重<sup>[74-75]</sup>。 $Cd^{2+}$  对青蛤成贝和幼贝的 96 h  $LC_{50}$  分别为 20.09 和 14 mg/L, SC 为 0.201 和 0.14 mg/L,且肌肉中蓄积较内脏团和鳃组织中严重<sup>[75-76]</sup>,  $Cd^{2+}$  能够诱导青蛤抗氧化酶活性的升高,且超过一定范围之后下降,硫氧还蛋白和金属硫蛋白均能延长青蛤对重金属的耐受限度<sup>[77]</sup>。 $Zn^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  对青蛤幼虫的联合作用显示为拮抗作用,  $Zn^{2+}$  的毒性率大于  $Cd^{2+}$ <sup>[75]</sup>。Lin 等<sup>[72]</sup>通过计算水体微藻浓度,研究了不同底质(泥、泥沙和沙泥)及沉积物厚度(3 cm 和 6 cm)条件下青蛤对微藻的去除效率,并未在不同处理组间发现显著差异,当泥沙比为 1:2~1:3 时,青蛤的养殖底质最适宜<sup>[78]</sup>。鳃弧菌(*Vibrio anguillarum*) 侵染对青蛤谷胱甘肽转移酶、溶菌酶和超氧化物歧化酶

活性影响较大, 对其免疫防御系统有明显的刺激作用<sup>[79-80]</sup>。葛端阳等<sup>[81]</sup>认为鳃弧菌对青蛤有明显的毒害作用, 且随着鳃弧菌的浓度升高, 这种毒害作用愈发严重, 直至受试青蛤全部死亡。

### 3.2 几种病原与环境因子胁迫对青蛤分子水平的影响

近年利用病原与环境因子胁迫青蛤的研究已在分子水平上取得了一定进展。赵婷等<sup>[82]</sup>利用藤黄微球菌 (*Micrococcus luteus*) 和鳃弧菌对青蛤进行胁迫, 分析血淋巴转录组数据, 将 893 个基因注释到 15 个免疫相关通路中, 进一步完成了鳃弧菌侵染下青蛤 cDNA 文库的构建, 筛选出免疫相关因子基因序列 45 条<sup>[83]</sup>, 并对 20 个免疫相关基因进行克隆及表达分析。Ren 等<sup>[84-85]</sup>利用细菌、病毒侵染和 RNA 干扰等技术, 发现抑制 *KPI* 基因表达后, *TLR2* 和 *MyD88* 基因表达水平也急剧下降。下调 *TLR13* 基因的表达后, 可显著降低信号因子和免疫相关基因的表达, 包括 *MyD88*、*IRAK4*、*TRAF6*、*IKKa*、*IKB* 和 *NF- $\kappa$ B* 基因。Ge 等<sup>[86]</sup>研究了氨氮急性胁迫对青蛤的影响, 发现青蛤比其他水产动物具有更强的耐氨氮能力, 其 96 h  $LC_{50}$  为 65.79 mg/L, 非离子氨  $NH_3$  的 96 h  $LC_{50}$  为 1.70 mg/L。进一步研究了氨氮胁迫下青蛤解毒代谢, 发现增强肝胰腺抗氧化反应、将氨转化为谷氨酰胺和尿素共同作用, 可降低急性氨暴露对青蛤的毒害作用。Ni 等<sup>[87]</sup>利用 RNA-Seq 技术, 揭示了青蛤鳃组织在低盐胁迫下的分子响应机制, 共获得 3008 个基因, 其中上调基因 1127 个, 下调基因 1881 个, 从能量代谢、物质代谢和免疫反应等方面探讨了相关的分子生物学过程和潜在功能。葛红星等<sup>[88]</sup>在此基础上通过克隆碳酸酐酶基因 (*Cs CA*), 阐明了 *Cs CA* 在低盐胁迫下的表达规律。另外, 青蛤对特定环境因子的响应存在一定程度的组织差异性, 低盐胁迫下, 青蛤 SOD 酶活性在外套膜组织中应答最快, CAT 酶活性在鳃丝中的应答最快也最强烈, GSH-Px 酶活性在肝胰腺中应答最强烈<sup>[24]</sup>, 青蛤  $Na^+/K^+$ -ATP 酶活性以鳃丝中最高<sup>[51]</sup>。32 °C 瞬时高温胁迫, 青蛤肝胰腺中 POD 活性最高, 而斧足中最低<sup>[48]</sup>。镉胁迫下, 青蛤血清中的 SOD 酶活性高于肝胰腺中, 而 CAT 和 GPx 则是肝胰腺中的活性高于血清中<sup>[77]</sup>。青蛤响应特定生态因子变化的转录水平调控,

同样存在组织差异性, 且不同生态因子的调控机制不同<sup>[82]</sup>。

## 4 青蛤营养及药用价值

### 4.1 青蛤营养价值

2001 年, 顾润润等<sup>[89]</sup>对采于当年 6 月与 12 月的青蛤进行了营养成分分析, 结果显示, 6 月青蛤所含粗脂肪、粗蛋白、氨基酸总量、必需氨基酸及呈鲜味氨基酸含量均高于 12 月, 这与曾志南等<sup>[90]</sup>的研究结果一致, 认为 6—9 月随着青蛤性腺的发育, 其软体干重、蛋白质和脂类含量逐渐升高。李晓英等<sup>[91]</sup>比较了连云港市养殖池塘青蛤与文蛤的营养成分差异, 发现青蛤体内粗脂肪及灰分含量显著高于文蛤, 且含有较高的必需氨基酸指数, 另外, 除 Pb、Ni 略超标以外, 其余 4 种重金属 (Cd、Cr、Cu、Zn) 含量均未超标。黄金田等<sup>[92]</sup>对江苏中部沿海青蛤重金属含量的研究表明, 江苏中部四季的青蛤重金属含量均符合无公害水产品的质量标准。青蛤体内富含的游离氨基酸有牛磺酸、谷氨酸、丙氨酸和精氨酸等, 且 4 种常见贝类总游离氨基酸含量由高到低排序为文蛤 < 青蛤 < 缢蛭 (*Sinonovacula constricta*) < 长牡蛎 (*Crassostrea gigas*)<sup>[93]</sup>。利用固相微萃取法共检出 17 种呈味物质, 且多是酸类、脂类、醛类、醇类和烯类等, 这些风味物质的含量和构成比例, 形成了青蛤独特的风味和口感<sup>[94]</sup>。丁媛等<sup>[95]</sup>利用电子鼻技术, 测出青蛤气味与菲律宾蛤仔、彩虹明樱蛤 (*Moerella iridescens*) 和四角蛤蜊 (*Mactra veneriformis*) 相近。尽管, 有关于青蛤营养成分及重金属的具体含量的研究结果相差甚远, 这可能是由于不同季节、不同栖息地、不同养殖环境与不同个体造成的差异。但整体上青蛤在所有贝类中的营养成分居于前列, 且受重金属污染程度较低, 是优质蛋白源。

### 4.2 药用价值及活性物质

《本草纲目》记载, 青蛤的药用价值为清热利湿。青蛤壳可煅烧后制成蛤粉, 入药青蛤散, 有清热、燥湿、收敛功效, 主治湿疹样皮炎、带状疱疹、接触性皮炎等, 且效果较佳, 副作用小<sup>[96]</sup>。青蛤体内提取的中性碳水化合物、蛋白质、糖醛酸对自由基有很好的清除能力<sup>[97]</sup>。活性肽是



一类特异性的蛋白片段,通常含有2~20个氨基酸残基,并对人体健康有着积极的影响<sup>[98]</sup>。由青蛤下脚料酶解制备的青蛤多肽具有良好的体外清除自由基的活性,作为抗氧化功能因子具有巨大的开发潜力<sup>[99]</sup>。谷胱甘肽有参与氨基酸的吸收和转运,维持细胞正常生长及抗氧化等作用<sup>[100]</sup>,张苏平等<sup>[93]</sup>利用全自动氨基酸分析仪,对青蛤、文蛤、缢蛏和牡蛎肌肉组织谷胱甘肽含量的研究表明,青蛤中谷胱甘肽含量最高。罗李王等<sup>[101]</sup>酶解青蛤软体部,制备了血管紧张素转化酶(ACE)抑制肽,抑制率为36.8%,意味着青蛤酶解产物具有一定的降血压功能。张亚茹等<sup>[102]</sup>酶解青蛤内脏,得到含有5个氨基酸的多肽(Ile-Leu-Tyr-Met-Pro),能够明显地抑制前列腺癌细胞(DU-145)的增殖;环磷酰胺(CTX)是一种广泛应用的具有严重肾毒性的抗癌药物, Jiang等<sup>[103]</sup>酶解青蛤软体部得到的十五肽,对CTX诱导的肾毒性有潜在的改善作用。青蛤多糖被证明具有较强的抗氧化活性<sup>[104]</sup>和显著的抗肿瘤活性<sup>[105]</sup>,且活性呈现出浓度依赖性。Jiang等<sup>[106]</sup>认为,从青蛤体内提取的一种多糖,在体外对超氧自由基和羟基自由基有较强的清除活性,对人胃癌细胞(BGC-823)的生长有较强的抑制作用。Gong等<sup>[107]</sup>提取的青蛤多糖能够显著促进巨噬细胞产生一氧化氮和分泌细胞因子,具有很强的免疫刺激活性。除此之外, Tong等<sup>[108]</sup>分离了青蛤血淋巴中的一种Ca<sup>2+</sup>依赖型凝集素CSL(N-乙酰半乳糖胺/甘露糖特异性凝集素),并发现CSL具有凝集酿酒酵母细胞的作用,且能够通过和酿酒酵母细胞壁上的甘露糖相互作用,提高酿酒酵母细胞单位时间内的乙醇产量<sup>[109]</sup>。佟长青等<sup>[110]</sup>还认为CSL可以通过影响细菌的代谢过程而产生抑菌作用。

## 5 展望

近年来,青蛤的系统生物学、群体遗传学、繁殖与养殖技术、营养评价均取得了较大进展,但青蛤种质资源是青蛤产业发展的重要基础,鉴于青蛤分布范围广泛,不同地理群体的多样性评价与保护仍需深入研究,特别是对生产性能优异的原种需要进行深入研究和保护,从而为育种提供种质来源,这将是今后一个时期重要的课题。随着青蛤高质量全基因组的测序完

成,为青蛤分子水平上的育种提供了可能。充分利用青蛤全基因组数据,借助重测序手段,筛选优良性状的特定分子标记(生长、出肉率、抗病、抗逆、营养及壳色等),可加快青蛤新品种的选育。

现有的青蛤养殖方式多是粗放式的滩涂养殖或者海水池塘混养,高效养殖模式结合盐碱水养殖将成为盐碱地开发的一大方向。为实现碳中和、碳达峰的目标,作为重要的固碳生物,青蛤在蓝色碳汇中作用显著,以青蛤的生态效益促进青蛤产业的绿色发展将是今后主要的研究方向。

## 参考文献(References):

- [ 1 ] 刘志新,赵莎莎,闫海强,等.青蛤的养殖与药用价值研究进展[J].*安徽农业科学*,2014,42(14):4365-4366,4379.  
Liu Z X, Zhao S S, Yan H Q, et al. Advances in researches on breeding and medical value of *Cyclina sinensis*[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(14): 4365-4366, 4379(in Chinese).
- [ 2 ] 刘相全,方建光,包振民,等.中国沿海帘蛤科贝类主要经济种育苗与养殖技术研究进展[J].*动物学杂志*,2003,38(4):114-119.  
Liu X Q, Fang J G, Bao Z M, et al. Progress in seed production and mariculture technology in economically significant species of clams in China[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2003, 38(4): 114-119(in Chinese).
- [ 3 ] 闫海强,黄芳芳,杨最素,等.青蛤的研究进展[J].*中国药房*,2014,25(39):3722-3724.  
Yan H Q, Huang F F, Yang Z S, et al. The progress research of *Cyclina sinensis*[J]. *China Pharmacy*, 2014, 25(39): 3722-3724(in Chinese).
- [ 4 ] 王兴强,曹梅,阎斌伦,等.青蛤的生物学及其繁殖[J].*水产科学*,2006,25(6):312-316.  
Wang X Q, Cao M, Yan B L, et al. Biology and reproduction of clam *Cyclina sinensis*[J]. *Fisheries Science*, 2006, 25(6): 312-316(in Chinese).
- [ 5 ] 庄启谦.中国动物志:软体动物门 双壳纲 帘蛤科[J].科学出版社,1997.  
Zhuang Q Q. Zoology in China: Mollusca. Bivalvia. Veneridae[J]. Science Press, 1997(in Chinese).
- [ 6 ] Dong P Z, Ma G Y, Chang L Y, et al. The complete



- mitochondrial genome of *Cyclina sinensis* (Veneroidea: Veneridae)[J]. *Mitochondrial DNA Part B*, 2016, 1(1): 173-174.
- [ 7 ] 程汉良, 周旻纯, 陈冬勤, 等. 基于16S rDNA序列的帘蛤科贝类分子系统发育研究[J]. *水产科学*, 2012, 31(11): 657-662.  
Cheng H L, Zhou M C, Chen D Q, *et al.* Phylogenetic analysis of Veneridae (Mollusca: Bivalvia) based on mitochondrial 16S rDNA[J]. *Fisheries Science*, 2012, 31(11): 657-662(in Chinese).
- [ 8 ] 赵婷, 吴琪, 潘宝平. 我国重要帘蛤科(Veneridae)贝类的16S rRNA序列系统学分析[J]. *海洋与湖沼*, 2013, 44(6): 1500-1505.  
Zhao T, Wu Q, Pan B P. Molecular phylogeny of Veneridae (Mollusca, Bivalvia) based on 16s rRNA sequences[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2013, 44(6): 1500-1505(in Chinese).
- [ 9 ] 段海宝, 陈义华, 董志国, 等. 青蛤染色体制备及核型分析[J]. *水产学报*, 2020, 44(5): 735-741.  
Duan H B, Chen Y H, Dong Z G, *et al.* Chromosome preparation and karyotype analysis of *Cyclina sinensis*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(5): 735-741(in Chinese).
- [ 10 ] Wei M, Ge H, Shao C, *et al.* Chromosome-level clam genome helps elucidate the molecular basis of adaptation to a buried lifestyle[J]. *iScience*, 2020, 23(6): 101148.
- [ 11 ] 娄秦爱, 孙长森, 钱志阳, 等. 青蛤不同地理群体遗传结构差异的AFLP分析[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(9): 5249-5251.  
Lou Q A, Sun C S, Qian Z Y, *et al.* AFLP Analysis of genetic structure of *Cyclina sineusis* from different geographical populations[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(9): 5249-5251(in Chinese).
- [ 12 ] Zhao Y M, Li Q, Kong L F, *et al.* Genetic diversity and divergence among clam *Cyclina sinensis* populations assessed using amplified fragment length polymorphism[J]. *Fisheries Science*, 2007, 73(6): 1338-1343.
- [ 13 ] 白胡木吉力图, 高悦勉, 姚红伟. 青蛤北方3个群体遗传多样性分析[J]. *水产科学*, 2008, 27(9): 487-489.  
Bai H, Gao Y M, Yao H W. RAPD Analysis of three geographical stocks of clam *Cyclina sineusis*[J]. *Fisheries Science*, 2008, 27(9): 487-489(in Chinese).
- [ 14 ] 么宗利, 周凯, 来琦芳, 等. 中国5个青蛤地理群体遗传变异分析 [C]//生物技术对水产业的促进作用——2005 水产科技论坛论文集. 北京: 中国水产科学研究院, 2005: 11.  
Yao Z L, Zhou K, Lai Q F, *et al.* Analysis of five geographical stocks of clam *Cyclina sineusis*[C]//Beijing: Chinese Academy of Fishery Sciences, 2005: 11 (in Chinese).
- [ 15 ] 张雷雷, 滕爽爽, 李腾腾, 等. 不同月龄青蛤形态性状对活体质量的影响分析[J]. *海洋科学*, 2019, 43(12): 74-80.  
Zhang L L, Teng S S, Li T T, *et al.* Effects of morphological traits on the body weight of *Cyclina sinensis* in different ages[J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(12): 74-80(in Chinese).
- [ 16 ] 古恒光, 刘建勇, 杨国宏. 我国南海4个青蛤野生群体的形态差异分析[J]. *广东海洋大学学报*, 2010, 30(3): 1-5.  
Gu H G, Liu J Y, Yang G H. Analysis on morphological variations of four wild populations of *Cyclina sinensis* from the South China Sea[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2010, 30(3): 1-5(in Chinese).
- [ 17 ] 潘宝平, 宋林生, 卜文俊, 等. 青蛤两个异域种群的遗传多样性与分化研究[J]. *水生生物学报*, 2005, 29(4): 372-378.  
Pan B P, Song L S, Bu W J, *et al.* Studies on genetic diversity and differentiation between two allopatric populations of *Cyclina sinensis*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2005, 29(4): 372-378(in Chinese).
- [ 18 ] 邵艳卿, 柴雪良, 张雷雷, 等. 我国6个青蛤群体遗传结构的SSR分析 [C]//2018年(第十三届)浙江渔业科技论坛论文摘要集. 温州: 浙江省科学技术协会, 2018: 1.  
Shao Y Q, Chai X L, Zhang L L, *et al.* SSR analysis of three geographical stocks of clam *Cyclina sineusis*[C]. Wenzhou: Zhejiang Society of Fisheries, 2018: 1 (in Chinese).
- [ 19 ] Dong Z G, Li X Y, You X P, *et al.* Eleven novel polymorphic microsatellite markers for genetic analysis of the venus clam *Cyclina sinensis* Gmelin, 1791[J]. *Conservation Genetics Resources*, 2013, 5(4): 1019-1021.
- [ 20 ] 方军, 沈彦鹏, 张雷雷, 等. 基于转录组数据的青蛤微卫星标记开发与验证[J]. *应用海洋学学报*, 2020,

- 39(2): 214-220.
- Fang J, Shen Y P, Zhang L L, *et al.* Development and verification of SSR markers in *Cyclina sinensis*[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2020, 39(2): 214-220(in Chinese).
- [ 21 ] Pan B P, Ren Y P, Gao J, *et al.* De novo RNA-Seq analysis of the venus clam, *Cyclina sinensis*, and the identification of immune-related genes[J]. *PLoS One*, 2015, 10(4): e0123296.
- [ 22 ] 袁媛, 高玮玮, 吴琪, 等. 黄、渤海地区青蛤(*Cyclina sinensis*)种群的ITS序列遗传变异与遗传结构分析[J]. *海洋与湖沼*, 2008, 39(6): 665-670.
- Yuan Y, Gao W W, Wu Q, *et al.* Genetic variation and structure of *Cyclina sinensis* populations in the Yellow and Bohai Sea of China[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2008, 39(6): 665-670(in Chinese).
- [ 23 ] Ni G, Li Q, Kong L F, *et al.* Phylogeography of bivalve *Cyclina sinensis*: testing the historical glaciations and Changjiang River outflow hypotheses in northwestern Pacific[J]. *PLoS One*, 2018, 7(11): e49487.
- [ 24 ] 孙长森, 王文基. 低盐胁迫对青蛤存活和抗氧化酶活性的影响 [C]//浙江省动物学会第十三次会员代表大会暨学术研讨会论文集摘要集. 宁波: 浙江省科学技术协会, 2018: 1.
- Sun C S, Wang W J. Effects of low-salt stress on survival and antioxidant enzyme activity of *Cyclina sinensis*[C]. Ningbo: Zhejiang Zoological Society, 2018: 1 (in Chinese).
- [ 25 ] 董志国, 李晓英, 阎斌伦, 等. 季节因素、地理分布和栖息环境对青蛤性比和生殖指标的影响[J]. *海洋湖沼通报*, 2011(3): 21-26.
- Dong Z G, Li X Y, Yan B L, *et al.* The impact of inhabit environment, geographical distribution and season on reproductive biology of *Cyclina sinensis*[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2011(3): 21-26(in Chinese).
- [ 26 ] 董志国, 李晓英, 程汉良, 等. 生殖季节青蛤性别与形态相关性分析[J]. *海洋科学*, 2011, 35(8): 32-36.
- Dong Z G, Li X Y, Cheng H L, *et al.* Correlation analysis of gender and morphology of *Cyclina sinensis* in the reproductive season[J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(8): 32-36(in Chinese).
- [ 27 ] Chung E Y, Lee C H, Park Y J, *et al.* Gametogenic cycle and the spawning season by quantitative statistical analysis and the biological minimum size of *Cyclina sinensis* in western Korea[J]. *The Korean Journal of Malacology*, 2011, 27(1): 43-53.
- [ 28 ] 柯巧珍, 李琪, 陈常杰, 等. 黄河三角洲青蛤的繁殖生物学研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(S1): 99-104.
- Ke Q Z, Li Q, Chen C J, *et al.* The reproductive biology of the Venus clam, *Cyclina sinensis* Gmelin, from the Yellow River Delta[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(S1): 99-104(in Chinese).
- [ 29 ] 白胡木吉力图, 马汝河, 高悦勉, 等. 大连海区青蛤的性腺发育和生殖周期[J]. *大连水产学院学报*, 2008, 23(3): 196-199.
- Bai H, Ma R H, Gao Y M, Song G N, *et al.* The gonadal development and reproductive cycle of clam *Cyclina sinensis* in coastal Dalian[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2008, 23(3): 196-199(in Chinese).
- [ 30 ] 孙普廷, 关福田, 魏利平. 青蛤 *Cyclina sinensis* (Gmelin)育苗的研究[J]. *海洋湖沼通报*, 1985(4): 53-57.
- Sun P T, Guan F T, Wei L P. Study on artificial breeding of *Cyclina sinensis* Gmelin[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1985(4): 53-57(in Chinese).
- [ 31 ] 曾志南, 李复雪. 青蛤的繁殖周期[J]. *热带海洋*, 1991, 10(1): 86-92.
- Zeng Z N, Li F X. The study on reproductive cycle of *Cyclina sinensis*[J]. *Tropic Oceanography*, 1991, 10(1): 86-92(in Chinese).
- [ 32 ] 耿绪云, 马维林, 王彦怀, 等. 室内蓄养青蛤亲贝促熟实验[J]. *河北渔业*, 2009(8): 31-34.
- Geng X Y, Ma W L, Wang Y H, *et al.* Studies on technique for indoor culture of *Cyclina sinensis* to accelerate maturity[J]. *Hebei Fisheries*, 2009(8): 31-34(in Chinese).
- [ 33 ] 沈保平, 孙益奎, 于业绍. 青蛤 *Cyclina sinensis*(Gmelin)胚胎发育生物学[J]. *现代渔业信息*, 2007, 22(4): 28-30.
- Shen B P, Sun Y K, Yu Y S. Biology of embryonic development of *Cyclina sinensis* (Gmelin)[J]. *Modern Fisheries Information*, 2007, 22(4): 28-30(in Chinese).
- [ 34 ] 梁健, 李永仁, 郭永军, 等. 青蛤苗种繁育技术及不同

- 盐度对青蛤发育各阶段的影响[J]. *河北渔业*, 2016(12): 1-4, 8.
- Liang J, Li Y R, Guo Y J, *et al.* Seed breeding technology and the effect of different salinity on the development of *Cyclina sinensis*[J]. *Hebei Fisheries*, 2016(12): 1-4, 8(in Chinese).
- [ 35 ] 李长松, 房斌, 王慧, 等. 青蛤稚贝放养密度与底质中硫化物相关性研究[J]. *水产学报*, 2006, 30(6): 796-800.
- Li C S, Fang B, Wang H, *et al.* Correlativity study on aquiculture density of juvenile clam *Cyclina sinensis* and concentration of sulfide in sediment[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2006, 30(6): 796-800(in Chinese).
- [ 36 ] 王国栋, 常亚青, 付强, 等. 3种滩涂贝类稚贝附着基和多层附苗技术的初步研究[J]. *大连水产学院学报*, 2003, 18(2): 104-108.
- Wang G D, Chang Y Q, Fu Q, *et al.* Studies on settlement substrata and poly-layer spatfall technics of three species of clams[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2003, 18(2): 104-108(in Chinese).
- [ 37 ] 陈坚, 杨星星, 柯爱英, 等. 青蛤人工育苗中附着基的选择[J]. *上海水产大学学报*, 2006, 15(1): 114-117.
- Chen J, Yang X H, Ke A Y, *et al.* Selection of adhering substance during the artificial breeding of *Cyclina sinensis*[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2006, 15(1): 114-117(in Chinese).
- [ 38 ] 周琳, 于业绍, 陆平. 青蛤幼虫饵料的研究[J]. *海洋科学*, 1999(5): 6-7.
- Zhou L, Yu Y S, Lu P. Study on bait of the larvae clam, *Cyclina sinensis*[J]. *Marine Sciences*, 1999(5): 6-7(in Chinese).
- [ 39 ] 朱雨瑞, 徐继林, 严小军. 5种微藻对4种滩涂贝类稚贝生长的影响[J]. *海洋学研究*, 2010, 28(3): 60-66.
- Zhu Y R, Xu J L, Yan X J. Effects of five marine microalgae on the growth of four juvenile intertidal shellfishes[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2010, 28(3): 60-66(in Chinese).
- [ 40 ] 彭张记. 青蛤滩涂网精养高产高效技术的研究[J]. *海洋信息*, 2000(2): 19-21.
- Peng Z J. Study on high-yield and high-efficiency technology of intensive culture of *Cyclina sinensis*[J]. *Marine Information*, 2000(2): 19-21(in Chinese).
- [ 41 ] 许建. 青蛤滩涂高效健康养殖技术[J]. *科学养鱼*, 2010(8): 38-39.
- Xu J. High-efficiency and healthy breeding technology of *Cyclina sinensis* in the beach[J]. *Scientific Fish Farming*, 2010(8): 38-39(in Chinese).
- [ 42 ] 张洪欣, 明秀云, 张洪勋, 等. 黄河三角洲青蛤产业化生态养殖试验[J]. *齐鲁渔业*, 2007, 24(1): 20-23.
- Zhang H X, Ming X Y, Zhang H X, *et al.* Industrialized ecological farming experiment of *Cyclina sinensis* in the Yellow River Delta[J]. *Shandong Fisheries*, 2007, 24(1): 20-23(in Chinese).
- [ 43 ] 牛化欣, 常杰, 李树国. 南美白对虾、青蛤和菊花心江蓠立体混养技术[J]. *科学养鱼*, 2013(9): 44-45.
- Niu H X, Chang J, Li S G. Stereo polyculture of *Penaeus vannamei*, *Cyclina sinensis* and *Gracilaria lichenoides*[J]. *Scientific Fish Farming*, 2013(9): 44-45(in Chinese).
- [ 44 ] 王立群, 孙同秋, 朱庆亮, 等. 青蛤与梭鱼混养试验[J]. *齐鲁渔业*, 2004, 21(5): 16.
- Wang L Q, Sun T Q, Zhu Q L, *et al.* Polyculture experiment of *Cyclina sinensis* and *Sphyrnaeus*[J]. *Shandong Fisheries*, 2004, 21(5): 16(in Chinese).
- [ 45 ] 郑青松, 刘顺, 黄继荣, 等. 海水池塘鱼、虾、贝绿色生态养殖试验[J]. *科学养鱼*, 2020(6): 65-66.
- Zheng Q S, Liu S, Huang J R, *et al.* Experiment on green ecological farming of fish, shrimp and shellfish in seawater pond[J]. *Scientific Fish Farming*, 2020(6): 65-66(in Chinese).
- [ 46 ] 傅纯洁, 孙泽鹏, 吴秋仙, 等. 虾蟹池塘混养青蛤技术[J]. *水产养殖*, 2019, 40(12): 28-29.
- Fu C J, Sun Z P, Wu Q X, *et al.* Technique of polyculture of *Cyclina sinensis* in shrimp and crab pond[J]. *Journal of Aquaculture*, 2019, 40(12): 28-29(in Chinese).
- [ 47 ] 李凯, 王国良. 温州青蛤死亡原因分析及防控对策[J]. *科学养鱼*, 2013(10): 54-56.
- Li K, Wang G L. Analysis of death causes of Wenzhou *Cyclina sinensis* and countermeasures[J]. *Scientific Fish Farming*, 2013(10): 54-56(in Chinese).
- [ 48 ] 李晓英, 董志国, 阎斌伦, 等. 青蛤POD组织差异及温度骤升和窒息胁迫对青蛤POD的影响[J]. *海洋通报*, 2010, 29(5): 521-525.
- Li X Y, Dong Z G, Yan B L, *et al.* Differences of peroxidase activity in four organs and the impact of sharp



- temperature increase and hypoxia on peroxidase activity in *Cyclina sinensis*[J]. *Marine Science Bulletin*, 2010, 29(5): 521-525(in Chinese).
- [ 49 ] 李晓英,董志国,薛洋,等. 温度骤升和窒息条件对青蛤酸性磷酸酶和溶菌酶的影响[J]. *水产科学*, 2009, 28(6): 321-324.  
Li X Y, Dong Z G, Xue Y, *et al.* The impact of sharp increase in water temperature and hypoxia on activities of acid phosphatase (ACP) and lysozyme (LSZ) in clam *Cyclina sinensis*[J]. *Fisheries Science*, 2009, 28(6): 321-324(in Chinese).
- [ 50 ] 魏伟,唐保军. 急性盐度胁迫对文蛤和青蛤滤水率的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(9): 2542-2545.  
Wei W, Tang B J. Effects of acute salinity stress on clearance rates of *Meretrix meretrix* and *Cyclina sinensis*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(9): 2542-2545(in Chinese).
- [ 51 ] 李子牛,林听听,么宗利,等. 盐度对青蛤抗氧化酶活性及生长的影响[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(10): 2625-2630.  
Li Z N, Lin T T, Yao Z L, *et al.* Effects of water salinity on the antioxidant enzyme activities and growth of clam *Cyclina sinensis*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(10): 2625-2630(in Chinese).
- [ 52 ] 金春华. 温度和盐度对青蛤耗氧率和排氨率的影响[J]. *丽水学院学报*, 2005, 27(2): 46-51.  
Jin C H. Effects of temperature and salinity on oxygen consumption rate and ammonia excretion rate of *Cyclina sinensis*[J]. *Journal of Lishui University*, 2005, 27(2): 46-51(in Chinese).
- [ 53 ] 张嵩. 生态因子对青蛤、文蛤的潜沙及其苗种生长与存活的影响 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2014.  
Zhang S. Influence of ecological factors on burrowing behavior, larval growth and survival of *Cyclina sinensis* and *Meretrix meretrix*[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2014 (in Chinese).
- [ 54 ] 林听听,来琦芳,陆建学,等. 盐度突变对青蛤(*Cyclina sinensis*)鳃 $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase活性的影响[J]. *广东海洋大学学报*, 2012, 32(1): 54-58.  
Lin T T, Lai Q F, Lu J X, *et al.* Effects of abrupt variations in salinity on the  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase activity in gills of *Cyclina sinensis*[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2012, 32(1): 54-58(in Chinese).
- [ 55 ] 刘渝仙,王慧,于业绍,等. 海水比重对青蛤受精胚胎发育及淡水对D型幼体生存的影响[J]. *海洋渔业*, 1988(6): 255-257.  
Liu Y X, Wang H, Yu Y S, *et al.* The influence of sea water on the fertilization and embryonic development of *Cyclina sinensis* (Gmelin) and the freshwater on the survival of d-type larvae[J]. *Marine Fisheries*, 1988(6): 255-257(in Chinese).
- [ 56 ] 王丹丽,徐善良,尤仲杰,等. 温度和盐度对青蛤孵化及幼虫、稚贝存活与生长变态的影响[J]. *水生生物学学报*, 2005, 29(5): 495-501.  
Wang D L, Xu S L, You Z J, *et al.* The effects of temperature and salinity on the incubation of *Cyclina sinensis* and survival, growth and metamorphosis of *C. sinensis* larvae and juveniles[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2005, 29(5): 495-501(in Chinese).
- [ 57 ] 赵玉明,王春德,刘博. 青蛤不同地理群体的适温性比较[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(4): 151-153.  
Zhao Y M, Wang C D, Liu B. Comparative studies on temperature adaptation of different geographical populations of *Cyclina sinensis*[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(4): 151-153(in Chinese).
- [ 58 ] 陈雷,张嵩,郭良勇,等. 温度对毛蚶、文蛤和青蛤潜沙能力的影响[J]. *水产学杂志*, 2016, 29(3): 35-38.  
Chen L, Zhang S, Guo L Y, *et al.* Effects of temperature on burrowing ability of arca subcrenata *Scapharca subcrenata*, and clams *Meretrix meretrix* and *Cyclina sinensis*[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2016, 29(3): 35-38(in Chinese).
- [ 59 ] 刘英杰,马甦,田相利,等. 不同温度下青蛤能量收支的研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(S2): 89-92.  
Liu Y J, Ma S, Tian X L, *et al.* Study on energy budget of *Cyclina sinensis* at different temperatures[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(S2): 89-92(in Chinese).
- [ 60 ] 田国庆,魏恩宗,方应国,等. 青蛤低温保活和营养成分的变化[J]. *上海水产大学学报*, 2002, 11(2): 184-187.  
Tian G Q, Wei E Z, Fang Y G, *et al.* Low temperature to keep (*Cyclina sinensis*) (Gmelins) alive and the changes of nutrition compositions[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2002, 11(2): 184-187(in Chinese).

- Chinese).
- [ 61 ] 余方平, 楼宝, 王跃斌. 温度和pH值对青蛤*Cyclina sinensis*(Gmelin)淀粉酶 Amylase和蛋白酶活性 Proteinase Activity的影响[J]. 现代渔业信息, 2005, 20(12): 23-25.  
Yu F P, Lou B, Wang Y B. Effects of temperature and pH on activity of amylase and protease in *Cyclina sinensis*[J]. Modern Fisheries Information, 2005, 20(12): 23-25(in Chinese).
- [ 62 ] 段海宝, 茆双, 杜楠, 等. 干露胁迫对青蛤呼吸代谢及抗氧化相关酶活力的影响[J]. 海洋科学, 2020, 44(3): 42-49.  
Duan H B, Mao S, Du N, *et al.* Effects desiccation on respiratory metabolism and antioxidant enzyme activities of clam *Cyclina sinensis*[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(3): 42-49(in Chinese).
- [ 63 ] Caldeira K, Wickett M E. Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(9): 09S04.
- [ 64 ] 林听听, 来琦芳, 陆建学, 等. 几种盐碱因子对青蛤的致毒效应[J]. 海洋渔业, 2012, 34(2): 183-188.  
Lin T T, Lai Q F, Lu J X, *et al.* Toxic effects of several saline-alkali factors on *Cyclina sinensis*[J]. *Marine Fisheries*, 2012, 34(2): 183-188(in Chinese).
- [ 65 ] Sharma B R, Minhas P S. Strategies for managing saline/alkali waters for sustainable agricultural production in South Asia[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 78(1-2): 136-151.
- [ 66 ] 高山, 梁健, 李永仁, 等. 海水酸化对青蛤耗氧率和排氨率的影响[J]. 水产科学, 2017, 36(6): 758-762.  
Gao S, Liang J, Li Y R, *et al.* Effect of ocean acidification on respiration rate and excretion rate in clam *Cyclina sinensis*[J]. *Fisheries Science*, 2017, 36(6): 758-762(in Chinese).
- [ 67 ] 梁健, 高山, 李永仁, 等. 海洋酸化对青蛤免疫指标的影响[J]. 海洋科学, 2017, 41(11): 38-44.  
Liang J, Gao S, Li Y R, *et al.* Effect of ocean acidification on the immune index of *Cyclina sinensis*[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(11): 38-44(in Chinese).
- [ 68 ] Sui Y M, Zhou K, Lai Q F, *et al.* Effects of seawater acidification on early development of clam *Cyclina sinensis*[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2019, 18(4): 913-918.
- [ 69 ] 蔡娟, 周凯, 盛文权, 等. pH对青蛤的钙化率和两种酶活性的影响[J]. 海洋渔业, 2018, 40(1): 57-64.  
Cai J, Zhou K, Sheng W Q, *et al.* Effects of pH on calcification, CA and SOD activities in *Cyclina sinensis*[J]. *Marine Fisheries*, 2018, 40(1): 57-64(in Chinese).
- [ 70 ] Lin T T, Lai Q F, Yao Z L, *et al.* Combined effects of carbonate alkalinity and pH on survival, growth and haemocyte parameters of the Venus clam *Cyclina sinensis*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2013, 35(2): 525-531.
- [ 71 ] Nicholaus R, Zheng Z M. The effects of bioturbation by the Venus clam *Cyclina sinensis* on the fluxes of nutrients across the sediment-water interface in aquaculture ponds[J]. *Aquaculture International*, 2014, 22(2): 913-924.
- [ 72 ] Lin T T, Zhou K, Liu K, *et al.* Effects of clam size, food type, sediment characteristic, and seawater carbonate chemistry on grazing capacity of Venus clam *Cyclina sinensis* (Gmelin, 1791)[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2017, 35(5): 1239-1247.
- [ 73 ] 梁健, 雷雅云, 李永仁, 等. Cu<sup>2+</sup>对青蛤的胁迫效应[J]. 海洋科学, 2015, 39(11): 74-78.  
Liang J, Lei Y Y, Li Y R, *et al.* Effects of Cu<sup>2+</sup> stress on *Cyclina sinensis*[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(11): 74-78(in Chinese).
- [ 74 ] 梁健, 李永仁, 郭永军, 等. Zn<sup>2+</sup>对青蛤的胁迫效应[J]. 水产科学, 2017, 36(2): 167-171.  
Liang J, Li Y R, Guo Y J, *et al.* Effects of Zn<sup>2+</sup> on clam *Cyclina sinensis*[J]. *Fisheries Science*, 2017, 36(2): 167-171(in Chinese).
- [ 75 ] 周凯, 么宗利, 来琦芳, 等. 重金属Zn<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>对青蛤幼贝的致毒效应[J]. 海洋渔业, 2007, 29(1): 63-67.  
Zhou K, Yao Z L, Lai Q F, *et al.* Acute toxicity effects of Zn<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> on juveniles of clam (*Cyclina sinensis*)[J]. *Marine Fisheries*, 2007, 29(1): 63-67(in Chinese).
- [ 76 ] 张丽岩, 宋欣, 高玮玮, 等. Cd<sup>2+</sup>对青蛤(*Cyclina sinensis*)的毒性及蓄积过程研究[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(3): 418-421.  
Zhang L Y, Song X, Gao W W, *et al.* Acute toxicity test and analysis on accumulation of cadmium (Cd<sup>2+</sup>) to the

- clam *Cyclina sinensis*[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2010, 41(3): 418-421(in Chinese).
- [ 77 ] 吕达. 镉胁迫下青蛤抗氧化酶系活性及免疫相关基因的克隆与表达研究 [D]. 天津: 天津师范大学, 2012.  
Lü D. Study on the activity of Antioxidant enzymes and the cloning and expression of immune-related genes in *Cyclina sinensis* under Cd<sup>2+</sup> stress[D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2012 (in Chinese).
- [ 78 ] 汪志清. 泥沙底质中不同含沙量对青蛤成活率影响的试验[J]. 中国农业信息, 2017(19): 85-86.  
Wang Z Q. Effect of different sediment concentration in sediment on the survival rate of *Cyclina sinensis*[J]. China Agriculture Information, 2017(19): 85-86(in Chinese).
- [ 79 ] 刘可君, 刘阳, 潘宝平. 鳃弧菌感染对青蛤溶菌酶和超氧化物歧化酶活性的影响[J]. *四川动物*, 2011, 30(5): 802-804.  
Liu K J, Liu Y, Pan B P. Effect of *Vibrio anguillarum* on activity of lysozyme and superoxide dismutase in *Cyclina sinensis*[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2011, 30(5): 802-804(in Chinese).
- [ 80 ] 罗凯娅, 刘欣欣, 葛端阳, 等. 鳃弧菌(*Vibrio anguillarum*)感染对青蛤(*Cyclina sinensis*)谷胱甘肽硫转移酶及其基因表达的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(4): 735-740.  
Luo K Y, Liu X X, Ge D Y, et al. Effect of *Vibrio anguillarum* on activity and gene expression of glutathione S-transferases in *Cyclina sinensis*[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(4): 735-740(in Chinese).
- [ 81 ] 葛端阳, 赵婷, 潘宝平. 鳃弧菌(*Vibrio anguillarum*)对青蛤(*Cyclina sinensis*)的毒性及半致死浓度研究[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(6): 1192-1195.  
Ge D Y, Zhao T, Pan B P. Toxicity test and half lethal concentration of *Vibrio anguillarum* to the clam *Cyclina sinensis*[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(6): 1192-1195(in Chinese).
- [ 82 ] 赵婷, 潘宝平. 不同病原菌胁迫下青蛤血淋巴转录组中免疫相关基因的比较[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(27): 84-87.  
Zhao T, Pan B P. Comparison of immune-related genes in transcriptome library of *Cyclina sinensis* hemolymph under the stress of different pathogenic bacteria[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(27): 84-87(in Chinese).
- [ 83 ] 高玮玮, 潘宝平. 青蛤(*Cyclina sinensis*)cDNA文库构建及免疫相关因子基因的筛选[J]. *海洋与湖沼*, 2013, 44(1): 90-94.  
Gao W W, Pan B P. Construction of cDNA library and preliminary screening of immune-related genes in *Cyclina sinensis*[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2013, 44(1): 90-94(in Chinese).
- [ 84 ] Ren Y P, Zhang H, Pan B P, et al. A Kazal-type serine proteinase inhibitor from *Cyclina sinensis* is involved in immune response and signal pathway initiation[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2015, 47(1): 110-116.
- [ 85 ] Ren Y P, Ding D, Pan B P, et al. The TLR13-MyD88-NF-κB signalling pathway of *Cyclina sinensis* plays vital roles in innate immune responses[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017, 70: 720-730.
- [ 86 ] Ge H X, Liang X F, Liu J L, et al. Effects of acute ammonia exposure on antioxidant and detoxification metabolism in clam *Cyclina sinensis*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021(211): 111895.
- [ 87 ] Ni Q, Li W Q, Liang X F, et al. Gill transcriptome analysis reveals the molecular response to the acute low-salinity stress in *Cyclina sinensis*[J]. *Aquaculture Reports*, 2021(19): 100564.
- [ 88 ] 葛红星, 李雯倩, 柳佳玲, 等. 低盐对青蛤抗氧化酶和ATP酶的影响及碳酸酐酶基因的克隆与表达 [J]. *中国水产科学*, 2021, 28(8): 968-977.  
Ge H X, Li W Q, Liu J L, et al. Effects of salinity stress on antioxidant, ATPase, and carbonic anhydrase expression in *Cyclina sinensis*[J]. *Journal of Fishery Science of China*, 2021, 28(8): 968-977 (in Chinese).
- [ 89 ] 顾润润, 于业绍, 蔡友琼. 青蛤的营养成分分析与评价[J]. *动物学杂志*, 2006, 41(3): 70-74.  
Gu R R, Yu Y S, Cai Y Q. Analysis and evaluation of the nutritive composition of *Cyclina sinensis*[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2006, 41(3): 70-74(in Chinese).
- [ 90 ] 曾志南, 李复雪. 青蛤软体部重量和生化组分含量的季节变化[J]. *热带海洋*, 1990, 9(2): 8-15.  
Zeng Z N, Li F X. Seasonal changes in soft part weight and biochemical composition of the bivalve *Cyclina sinensis*[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 1990, 9(2): 8-15.



- 9(2): 8-15(in Chinese).
- [ 91 ] 李晓英, 董志国, 阎斌伦, 等. 青蛤与文蛤的营养成分分析与评价[J]. 食品科学, 2010, 31(23): 366-370.  
Li X Y, Dong Z G, Yan B L, *et al.* Analysis and evaluation of nutritional components in *Cyclina sinensis* and *Meretrix meretrix*[J]. Food Science, 2010, 31(23): 366-370(in Chinese).
- [ 92 ] 黄金田, 吕富, 吕林兰, 等. 江苏省沿海中部地区青蛤重金属含量及食用安全性分析[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(8): 304-306.  
Huang J T, Lü F, Lü L L, *et al.* Analysis of heavy metal content and edible safety of *Cyclina sinensis* in the central coastal area of Jiangsu Province[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, 41(8): 304-306(in Chinese).
- [ 93 ] 张苏平, 邱伟强, 卢祺, 等. 全自动氨基酸分析仪法测定4种贝类肌肉中谷胱甘肽和游离氨基酸含量[J]. 食品科学, 2017, 38(4): 170-176.  
Zhang S P, Qiu W Q, Lu Q, *et al.* Determination of glutathione and free amino acids in muscles of four shellfish species by automatic amino acid analyzer[J]. *Food Science*, 2017, 38(4): 170-176(in Chinese).
- [ 94 ] 刘佳, 陆宝庭, 肖淑玉. 四种海洋贝类肌肉中风味物质的分析与评价[J]. 环境与健康杂志, 2008, 25(7): 633-634.  
Liu J, Lu B T, Xiao S Y. Analysis and evaluation of flavor substances in four marine shellfish muscles[J]. *Journal of Environment and Health*, 2008, 25(7): 633-634(in Chinese).
- [ 95 ] 丁媛, 郑平安, 缪芳芳, 等. 电子鼻在8种贝类气味差异研究中的应用[J]. 食品科学, 2013, 34(22): 353-355.  
Ding Y, Zheng P A, Miao F F, *et al.* Odor discrimination of eight shellfishes using an electronic nose[J]. *Food Science*, 2013, 34(22): 353-355(in Chinese).
- [ 96 ] 李端, 李辛鸥. 青蛤油制备方法的改进[J]. 基层中药杂志, 2002, 16(1): 46 .  
Li D, Li X O. Improvement of the preparation method of shell oil[J]. *Primary Journal of Chinese Materia Medica*, 2002, 16(1): 46 (in Chinese).
- [ 97 ] Guo L, Liu Y L, Liu C. Evaluation of antioxidative properties of various extracts from *Cyclina sinensis*[J]. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2014, 6(4): 558-562.
- [ 98 ] Harnedy P A, FitzGerald R J. Bioactive peptides from marine processing waste and shellfish: a review[J]. *Journal of Functional Foods*, 2012, 4(1): 6-24.
- [ 99 ] 史文军, 万夕和, 王李宝, 等. 酶解青蛤边下脚料制备抗氧化肽的研究[J]. 食品工业, 2016, 37(7): 43-47.  
Shi W J, Wan X H, Wang L B, *et al.* Study on the preparation of antioxidant peptide from clam (*Cyclina sinensis* Gmelin) edge scraps by enzymolysis[J]. *The Food Industry*, 2016, 37(7): 43-47(in Chinese).
- [100] 宋增廷, 姜宁, 张爱忠, 等. 谷胱甘肽生物学功能的研究进展[J]. 饲料研究, 2008(9): 25-27.  
Song Z T, Jiang N, Zhang A Z, *et al.* The advance of glutathione research[J]. *Feed Research*, 2008(9): 25-27(in Chinese).
- [101] 罗李王, 杨最素, 张亚茹, 等. 酶解青蛤制备ACE抑制肽的工艺优化[J]. 食品工业, 2016, 37(6): 56-59.  
Luo L W, Yang Z S, Zhang Y R, *et al.* Process optimization for preparation of ACE-inhibitory peptides from *Cyclina sinensis* by enzymatic hydrolysis[J]. *The Food Industry*, 2016, 37(6): 56-59(in Chinese).
- [102] 张亚茹, 闫海强, 杨最素, 等. 青蛤多肽的酶法制备及对前列腺癌DU-145细胞的抑制活性[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 167-174.  
Zhang Y R, Yan H Q, Yang Z S, *et al.* Enzymatic preparation of peptide from *Cyclina sinensis* proteins and its inhibitory activity toward prostate cancer DU-145 Cells[J]. *Food Science*, 2019, 40(11): 167-174(in Chinese).
- [103] Jiang X X, Ren Z X, Zhao B Y, *et al.* Ameliorating effect of pentadecapeptide derived from *Cyclina sinensis* on cyclophosphamide-induced nephrotoxicity[J]. *Marine Drugs*, 2020, 18(9): 462.
- [104] 郭雷, 许福泉, 樊鑫桐, 等. 青蛤多糖的提取工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(21): 10-14.  
Guo L, Xu F Q, Fan X T, *et al.* Extraction process and antioxidant activities of polysaccharides from *Cyclina sinensis*[J]. *Food Research and Development*, 2014, 35(21): 10-14(in Chinese).
- [105] 胡聪聪, 杨永芳, 丁国芳, 等. 青蛤多糖提取的条件优化及其抗肿瘤活性研究[J]. 中国民族民间医药, 2010, 19(10): 28-29.  
Hu C C, Yang Y F, Ding G F, *et al.* Study on the optim-

- ization of extraction conditions and anti-tumor activity of polysaccharides from *Cyclina sinensis*[J]. *Chinese Journal of Ethnopharmacology and Ethnopharmacology*, 2010, 19(10): 28-29(in Chinese).
- [106] Jiang C X, Wang M C, Liu J, *et al.* Extraction, preliminary characterization, antioxidant and anticancer activities *in vitro* of polysaccharides from *Cyclina sinensis*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 84(3): 851-857.
- [107] Gong Y, Cao C Y, Ai C Q, *et al.* Structural characterization and immunostimulatory activity of a glucan from *Cyclina sinensis*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 161: 779-786.
- [108] Tong C Q, Li W, Kong L, *et al.* A novel yeast-binding lectin from hemolymph *Cyclina sinensis* (Gmelin) and its effects on yeast cells[J]. *Process Biochemistry*, 2012, 47(12): 2166-2171.
- [109] Liu S, Li L G, Tong C Q, *et al.* Quantitative proteomic analysis of the effects of a GalNAc/Man-specific lectin CSL on yeast cells by label-free LC-MS[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 85: 530-538.
- [110] 佟长青, 曲敏, 李伟, 等. 青蛤凝集素抑菌机制的研究[J]. *中国海洋药物*, 2014, 33(2): 31-38.
- Tong C Q, Qu M, Li W, *et al.* Study on the antibacterial mechanism of *Cyclina sinensis* (Gmelin) lectin[J]. *Chinese Journal of Marine Drugs*, 2014, 33(2): 31-38(in Chinese).

## Research progress in genetic resources assessment, culture technique and exploration utilization of *Cyclina sinensis*

DONG Zhiguo<sup>1,2,3\*</sup>, DUAN Haibao<sup>1,4</sup>, ZHENG Hanfeng<sup>5</sup>, GE Hongxing<sup>1,2,3</sup>, WEI Min<sup>1,2,3</sup>,  
LIU Meimei<sup>1,2,3</sup>, CHEN Yihua<sup>1,2,3</sup>, LI Xiaoying<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Marine Bioresources and Environment, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;

2. Co-Innovation Center of Jiangsu Marine Bio-industry Technology, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;

3. Jiangsu Key Laboratory of Marine Biotechnology, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;

4. Jiangsu Provincial Ecological Assessment Center, Nanjing 210000, China;

5. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** *Cyclina sinensis* is an important marine economic shellfish. The clam *C. sinensis* are widely distributed in the coastal beaches and estuaries of China, Japan and North Korea, and have been widely cultivated and proliferated in China. In this paper, the research progress in the exploration, evaluation and utilization of the germplasm resources of *C. sinensis* was systematically reviewed from the aspects of genomics, systematic classification, population diversity, genetic development, seedling breeding, aquaculture ecology, physiology and biochemistry, nutrition and medicinal value. The future development direction of wild resource protection and evaluation, seedling technology and breeding, green and efficient breeding and carbon sink fishery, and nutritional value and deep processing were put forward.

**Key words:** *Cyclina sinensis*; germplasm resources; reproduction and development; culture ecology

**Corresponding author:** DONG Zhiguo. E-mail: dzg7712@163.com

**Funding projects:** China Agriculture Research System; Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (18KJA240001); Jiangsu Natural Resources Development Special-Marine Science and Technology Innovation Project (JSZRHYKJ202008); Jiangsu Modern Agriculture Independent Innovation Project [CX(20)3150]; Fishery Science and Technology Project of Jiangsu Province (Y2018-27)