

我国刺参种业态势分析与技术创新展望

杨红生^{1,2,3,4,5}, 孙景春^{1,2,3,4}, 茹小尚^{1,2,3,4}, 张灿影⁶, 邢丽丽^{1,2,3,4},
孙丽娜^{1,2,3,4}, 林承刚^{1,2,3,4}, 刘石林^{1,2,3,4}, 张立斌^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋生态与环境科学重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 中国科学院 海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071; 4. 中国科学院海洋牧场工程实验室, 山东 青岛 266071; 5. 中国科学院 种子创新研究院, 湖北 武汉 430072; 6. 中国科学院海洋研究所 文献信息中心, 山东 青岛 266071)

摘要: 刺参为我国重要的海水养殖对象, 而种业是刺参产业链条健康发展的基础环节, 但仍存在野生种质资源匮乏、良种不足及良种覆盖率低的现状。本文综述了当前我国刺参种业现状与态势, 重点比较分析了“东科1号”等6个已育成良种的特点, 提出了在全球气候变化现状下未来刺参种业的发展趋势, 并针对刺参产业发展需求, 提出了应用现代遗传技术实现性状精准高效选育等未来刺参育种技术体系创新发展方向, 以期为我国刺参种业转型升级提供参考。

关键词: 刺参; 良种; 性状; 技术创新

中图分类号: S962 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-3096(2020)07-0002-08

DOI: 10.11759/hyxx20200119001

海参是海参纲动物的泛称, 在全球范围已发现的1200余种海参中, 约有70余种可食用, 主要分布于西太平洋、东太平洋、北大西洋等区域, 包括温带种与热带种两大类。常见海参经济种多为楯手目, 例如图纹白尼参、辐肛参、黑海参、沙海参、玉足海参、糙海参、梅花参与仿刺参等。全球海参年产量约为20000~40000吨(干品), 生产方式在非洲、南美洲、北美洲与大洋洲等以捕捞野外资源为主, 而在亚洲特别是中国以人工增养殖为主^[1]。

我国是全球最大海参贸易国、消费国与养殖国。在我国海域有分布记录的经济海参种类有20余种, 除仿刺参(下称刺参)属于温带种外, 其他皆为热带种。其中, 刺参为我国乃至全球海参产业的核心物种。刺参为我国传统海珍品, 随着消费需求不断升高, 我国刺参产量与增养殖规模连年增长, 刺参已成为黄渤海地区的主要海水养殖对象, 并随着“北参南养”计划推进, 刺参养殖逐渐突破黄渤海地域限制在东南沿海养殖规模也快速增大。目前已形成了浅海底播增殖、工厂化集约养殖、池塘养殖与吊笼养殖为主的养殖模式, 并成为了山东、辽宁、福建、河北与江苏等五省为主要养殖区域的重要经济物种, 此外在食品与保健品行业也行成了海参粗加工制品、精深加工制品等成体系的刺参产业链条, 为渔民

增收与高值化渔业发展带来了巨大新动能^[2], 而人工所繁育的苗种是保障刺参产业持续稳定发展的基础环节。相比于刺参, 我国热带海参产业规模较小、发展较晚, 物种主要集中于花刺参、糙刺参以及玉足海参等典型经济种类, 目前已完成了人工繁育、养殖模式构建以及放流等增养殖技术体系的探索, 仍处于初步发展阶段。因此, 下文内容以刺参研究进展与产业发展为主。

为支撑海参行业的高速发展, 我国科研工作者在基础生物学与增养殖技术等方面开展了系统的研究。基于中国知网信息的统计结果表明, 自1954年以来, 我国共发表海参或刺参相关的中文文献4630篇, 根据不同年代的发文量, 其科技发展历程可分为萌芽期(1954—1979)、推进期(1980—2001)、高速发展期(2002—2012)和稳定期(2013—2019)四个阶段, 发文量占比依次为1.1%、

收稿日期: 2020-01-19; 修回日期: 2020-03-13

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”专项项目(2018YFD0901602); 中国科学院国际伙伴计划(133137KYSB20180069)
[Foundation: The National Key Research and Development Program of China, No. 2018YFD0901602; the International Partners Program of Chinese Academy of Sciences, No. 133137KYSB20180069]

作者简介: 杨红生(1964-), 男, 安徽霍邱人, 汉族, 研究员, 博士生导师, 从事海洋生境修复与资源养护、海洋生物与遗传育种、养殖生态与养殖设施等研究, 电话: 0532-82898610, E-mail: hshyang@qdio.ac.cn

6.1%、63.9%和 28.9%(图 1)。在刺参科技发展萌芽期, 标志性成果主要包括张凤瀛等老一辈海洋生物学家首次开展了刺参人工苗种繁育工作探索, 初步掌握了受精技术与耳状幼体培育经验, 并对刺参的行为与特殊生物学特征开展了初步探索; 在刺参科技发展推进期, 标志性成果为刺参增养殖技术的建立。期间隋锡林等于 20 世纪 80 年代已初步建立了人工育苗技术体系, 为刺参的人工养殖开辟了广阔的前景。此后, 历经 30 余年持续研究, 在 21 世纪初刺参增养殖已经初步实现工厂化规模化生产, 从营养需求、疾病防治、附着基开发、养殖模式构建等角度突破了系列技术瓶颈, 形成了亲参培育、浮游幼体规模化繁育、苗种工厂化培育与大规模苗种生态养殖等技术体系, 成熟的增养殖技术体系也为刺参产业的飞速发展打下了坚实的工作基础; 在刺参科技高速发展期, 标志性成果为刺参基础生物学特征的全面认知和第一个刺参新品种“水院 1 号”获得全国水产原种与良种审定委员会审定证书。在此阶段, 随着分子生物学技术的发展, 对幼虫变态、体色分化、夏眠、再生、性腺发育的分子及生理调控机制等开展了深入研究, 为种业健康发展提供了基础理论支撑。同时,

国家和地方政府逐步加大科研投入力度, 支持科研院所和高校积极开展与刺参种业产业相关的科技攻关, 形成了一系列显著成果。此外在增养殖技术方面, 高效、生态与绿色等养殖技术也得到了持续的关注。在刺参科技发展稳定期, 经过了 10 年的高速发展期, 刺参产业逐步形成稳定的产业体系, 包括种参的越冬促熟培育、苗种的规模化繁育和中间培育、各种养殖模式与技术的逐步成熟、刺参产品的加工与销售等都达到了相对较高和稳定的发展阶段。但是, 受全球气候变化的影响, 夏季高温频繁出现, 给刺参养殖业特别是陆基池塘养殖业带来了较大的影响, 也造成了严重的经济损失。针对这种情况, 科研院所和高校紧密结合生产实际, 开展了抗逆新品种(品系)的培育和技术攻关, 建立并完善了池塘生态化立体健康养殖模式, 为刺参产业的稳定发展提供了技术支撑。稳定期的标志性成果为刺参基因组的成功破译以及“东科 1 号”等 5 个刺参新品种获批; 特别是刺参全基因组在 2017 年得到全面破译, 标志着我国刺参生物学研究与种业产业技术开发进入了以全基因组信息为基础的新时期, 开启了全球刺参科技研究的新篇章^[3]。

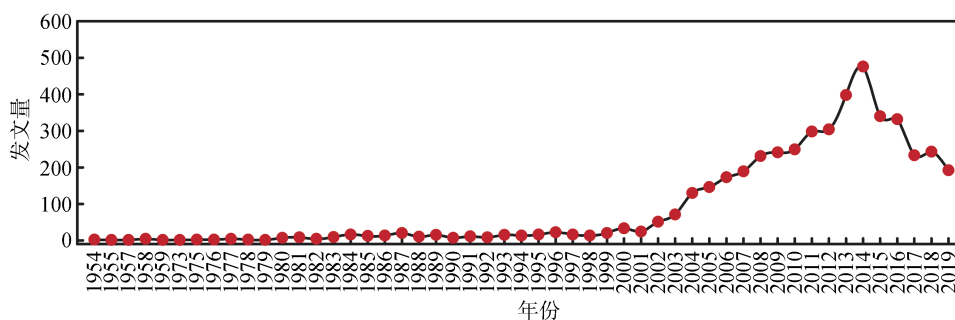


图 1 1954—2019 年间我国海参研究发文章量动态变化趋势图

Fig. 1 Number of publications focusing on sea cucumber in China from 1954 to 2019

“农业兴旺, 种业先行”。2019 年《中国渔业统计年鉴》最新统计数据表明, 当前我国刺参产量已达 174 340 吨, 养殖面积为 238 183 公顷, 每年需人工繁育苗种数量为 562 亿头^[4]。繁荣发展的刺参增养殖产业, 也为高质量刺参苗种生产带来了多元化与高标准的要求。面向未来, 刺参养殖良种化是产业发展的必然方向, 但当前我国刺参养殖整体仍表现为良种覆盖率低的特点。据统计, 截止 2019 年, 我国经全国水产原种与良种审定委员会审定的水产新品种

共有 215 个, 但刺参仅有 6 个新品种, 比率仅占 2.79%, 且选育性状多关注生长速度与成活率等基础性状。与虾蟹鱼贝等养殖对象相比较, 刺参良种选育工作整体呈现性状单一、性状高值化低的特点。刺参种业既是刺参产业可持续发展的基石, 也是未来实现刺参产业转型升级的关键突破口。因此, 聚焦刺参产业发展方向与市场需求, 提高刺参种业科技创新水平, 加速刺参养殖良种化、良种养殖生态化等技术体系建设具有重要意义。

1 刺参种业现状与态势分析

1.1 刺参原种种质资源现状

全球 1 200 多种海参分布于世界各大洋的潮间带至万米水深的海域,绝大多数营底栖生活,附着在礁石、泥沙及海藻丛生的地带^[5]。其中印度洋-西太平洋区是世界上海参种类最多、资源量最大的区域。温带区海参资源呈单种性,分布于太平洋东西两岸,其中东岸以美国红海参(*Parastichopus californicus*)为主,西岸以刺参(*Apostichopus japonicus*)为主;热带区海参资源则呈多样性,分布于太平洋热带区及印度洋^[6]。刺参(*Apostichopus japonicus*),主要分布于西太平洋,包括黄海、日本海、鄂霍次克海。其地理分布的北限是库页岛、俄罗斯和阿拉斯加(美国)的沿海地区,南界是日本种子岛。在中国通常分布在辽宁、河北和山东省沿岸,在中国的南限是江苏省连云港市的连岛^[7]。

发展刺参养殖的初期,由于尚未攻克人工育苗等技术难关,多采用自然海区采捕野生苗种的方式。随着经济发展和人们生活水平提高,刺参的需求量激增,在利益的驱使下,未考虑刺参的自然恢复能力,引发过度捕捞,加之日益严重的海水污染,致使自然海区的野生刺参数量急剧下降,野生刺参自然资源趋于枯竭,现阶段已鲜见其踪迹。根据世界自然保护联盟的数据,近 30~50 年以来,野生刺参的生物资源量在日本下降了 30%,韩国下降了 40%,俄罗斯下降了 80%,在中国下降了 95%以上。刺参已被世界自然保护联盟收录到濒危物种红色名录的濒危 Endangered(EN)等级。同时,随着刺参产业规模的不断拓展,种质退化、生长缓慢、养殖周期长、抵御环境变化能力差、病害频发以及商品参品质下降等一系列显著或潜在制约产业发展的瓶颈问题也日益凸显。

1.2 刺参良种种质资源现状

当前,消费市场刺参产品多为干制品,因此体壁质量与外观形态是决定刺参单价的主要因子。当前,刺参主要选育经济性性状包括生长速度、抗逆能力(耐低温、耐高温、耐盐)、抗病能力、出皮率、体色、疣足的数量与长度等。针对上述性状,已育成的刺参良种包括“水院 1 号”、“崆峒岛 1 号”、“东科 1 号”、“安源 1 号”、“参优 1 号”与“鲁海 1 号”(表 1)。此外,其他高值经济性性状品系如耐盐品系、

紫体色品系、白体色品系、豹斑多刺品系等选育工作也在开展,为未来刺参良种多元化打下了坚实的基础^[8-11]。

但因刺参良种选育具有周期长、风险高与投资高的特点,良种选育工作多依赖地方政府的持续资助,故当前刺参良种选育工作在全国范围内推进缓慢,研究工作主要集中在山东省与辽宁省。例如,山东省驻地各科研院所在国家“863”计划、“山东省农业良种工程”项目等十余年的滚动支持下,目前已取得了系列阶段性的成果。在我国仅有的 6 个刺参品种中,山东省独占 5 个,且烟台市通过设立“种业硅谷”等创新性组织机构^[12],以加快刺参良种“保育繁推一体化”进展,为现代刺参种业乃至我国水产种业高速发展树立了“可复制、可推广”的模式与典范。

表 1 我国刺参良种选育进展综合分析表
Tab. 1 Varieties of sea cucumber in China

良种名称	育种技术	主要选育性状
水院 1 号	杂交育种	疣足数量、出皮率
崆峒岛 1 号	群体选育	生长速度
东科 1 号	群体选育	生长速度、度夏成活率、耐温能力
鲁海 1 号	群体选育	生长速度、养殖成活率
安源 1 号	群体选育	生长速度、疣足数量、出肉率
参优 1 号	群体选育	抗灿烂弧菌侵染能力、生长速度

1.2.1 “水院 1 号”

“水院 1 号”(品种登记号:GS-02-005-2009),是以中国刺参群体为母本,俄罗斯刺参群体为父本的杂交后代,第一完成单位为大连海洋大学,该品种为我国首个刺参良种。“水院 1 号”主要性状特点为体表疣足数量多、疣足排列为比较整齐的 6 排,且具有生长速度快的优势,推广范围主要集中在辽宁省等地^[13]。

1.2.2 “崆峒岛 1 号”

“崆峒岛 1 号”(品种登记号:GS-01-015-2014),是以烟台市海域崆峒岛国家级刺参保护区中的野生群体为亲本,以群体选育技术为技术路线,以生长速度为核心经济性性状,经 4 代连续选育而成,第一完成单位为山东省海洋资源与环境研究院。“崆峒岛 1 号”主要性状特点为生长速度快,推广范围主要集中在山东省、河北省与辽宁省等地^[14]。

1.2.3 “东科 1 号”

“东科 1 号”(品种登记号: GS-01-015-2017), 是以日照市、青岛市与烟台市等本地野生刺参群体为亲本, 以群体定向选育技术为技术路线, 以生长速度、度夏成活率与耐高温能力为核心经济性状, 历经 12 年选育而成, 第一完成单位为中国科学院海洋研究所。“东科 1 号”主要性状特点为耐高温能力强、度夏成活率高与生长速度快, 且经遗传学结果发现, “东科 1 号”的生长性状与耐高温性状遗传稳定性高。与自然群体相比, “东科 1 号”在夏季高温期间成活率提高了 12.7%以上, 夏眠阈值温度提高了 1.5~2.0℃, 全年生长速度提高了 20%以上^[15-18]。目前, “东科 1 号”以从亲参培育、幼体培育、苗种培育与池塘养殖等角度建立了系统的增养殖技术体系, 并在山东省、河北省与辽宁省等我国刺参主养区得到了广泛的推广。

1.2.4 “安源 1 号”

“安源 1 号”(品种登记号: GS-01-014-2017), 是以刺参良种“水院 1 号”群体为亲本, 以群体选育技术为技术路线, 以体重、疣足数量、出肉率为核心选育经济性状, 经 4 代连续选育而成, 第一完成单位为山东安源海产股份有限公司。“安源 1 号”主要性状特点为疣足数量多、生长速度快, 主要推广区域为辽宁省、山东省和福建省等^[19]。

1.2.5 “参优 1 号”

“参优 1 号”(品种登记号: GS-01-016-2017), 是以我国大连海域、烟台海域、威海海域、青岛海域以及日本海域等五个地理群体的野生刺参群体为亲本, 以群体定向选育技术为技术路线, 以抗灿烂弧菌侵染能力和生长速度作为核心选育经济性状, 经 4 代连续选育而成, 第一完成单位为中国水产科学研究院黄海水产研究所。“参优 1 号”主要性状特点为抗灿烂弧菌能力强、生长速度快、成活率高。“参优 1 号”的主要养殖模式为池塘养殖和南方吊笼养殖, 主要推广区域为辽宁省、山东省和福建省等^[20]。

1.2.6 “鲁海 1 号”

“鲁海 1 号”(品种登记号: GS-01-010-2018), 是以日照东港海域、威海荣成海域、青岛崂山海域、烟台长岛海域、大连长海海域等五个地理群体的本土野生刺参群体为亲本, 以群体选育技术为技术路线, 以生长速度与养殖成活率为核心选育经济性状, 经 4 代连续选育而成, 第一完成单位为山东省海洋生物研究院。“鲁海 1 号”主要性状特点为生长速度

快、养殖成活率高。“鲁海 1 号”养殖模式主要为池塘养殖与工厂化养殖, 主要推广区域为山东省、辽宁省、河北省和福建省等。

1.3 全球气候变化下的刺参种业发展趋势

1.3.1 重视刺参原良种种质资源保护和创新利用

水生生物种质资源是我国渔业生产的重要物质基础和人类重要的食物蛋白源, 作为生物多样性的重要组成部分, 也是维护国家生态安全和开展相关科学研究的重要物质基础, 在国民经济中具有重要地位。党的十八大将生态文明建设提升为国家战略, 提出建设“美丽中国”的概念, 为生物资源的保护与开发利用提出了更高的要求。但是, 包括刺参在内的许多水产经济物种种质遗传背景和遗传结构混淆不清, 近亲繁殖导致种质退化、生长速度下降、个体变小和抗逆性差等问题, 严重影响了渔业生产的健康发展。目前, 国家级刺参原种场和良种场仍存在数量严重不足、分布不均和带动作用不明显等问题, 且有核心竞争力的种业企业寥寥无几, 种质资源缺乏科学保护, 资金、技术力量和人才队伍相对分散。为此, 2020 年 2 月 11 日, 国务院发布了关于加强农业种质资源保护与利用的意见, 力争到 2035 年, 建成系统完整、科学高效的农业种质资源保护与利用体系, 资源创新利用达到国际先进水平。

1.3.2 重视刺参养殖产业良种化与新品种开发

虽然我国刺参养殖业发展迅猛, 但刺参产业可持续发展仍受到全球气候变化、良种覆盖率低、养殖效率低、消费市场稳定性差等因素的影响^[2]。温度变化对刺参养殖业影响很大, 相关研究表明, 急性高温刺激可导致刺参在短时间内死亡, 而慢性高温刺激可导致刺参出现生长速度下降、代谢紊乱、夏眠期延长等异常状况^[21-22]。近年来, 受全球气候变化影响, 我国的山东、辽宁等刺参主养区在夏季经历了频繁的持续高温天气, 导致沿海池塘养殖刺参出现大面积死亡, 部分池塘养殖区甚至出现了绝收现象, 对刺参产业造成了严重打击, 暴露了当前刺参产业发展模式的脆弱性, 包括对具有抗逆性状良种的迫切需求。近年来, 在国家和地方良种工程项目等支持下, 一批刺参育种项目和产业体系项目相继实施, 形成了包括“东科 1 号”、“参优 1 号”等具有一定抗逆性状的刺参新品种, 部分缓解了产业发展对良种的需求。2018 年, 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项项目“重要养殖棘皮类种质

创制与新对象开发”启动实施,集中全国科技力量在刺参良种创制和产业化应用方面进行重点攻关,相信在不久的将来,我国刺参种业产业将获得丰硕成果。

1.3.3 重视刺参养殖技术创新与养殖模式多元化

在当前全球气候变化的严峻形势下,频繁出现的夏季持续高温使刺参产业遭受了前所未有的损失,因此,未来刺参种业与良种选育应以耐温能力为核心性状,以抗病、速生与多刺等为复合性状,开展具有复合性状的新型刺参良种培育作为主要研究方向。同时,为保障良种的高效绿色养殖,未来刺参种业科技创新体系也应包括以生态养殖为特征的养殖良技与良法开发。具体思路为,以复合良种种质创新为核心,从根本上保障养殖效益、降低养殖风险;以养殖技术创新为核心,减少药物使用并保障食品安全;以养殖方法与模式创新为核心,提高养殖水体空间利用率与养殖效率。在“良种+良技+良法”的综合创新体系下,解决我国刺参种业乃至刺参产业亟待突破的“卡脖子”技术瓶颈,助力刺参产业转型升级。

2 刺参育种技术未来创新展望

与贝虾蟹等其他海水经济动物相比,刺参因性成熟年龄需3年以上,故新品种培育周期至少需12~13年以上,具有育种周期长、育种效率低的限制因素。此外,因体长、体重、疣足数量、疣足长度、体色等关键数量性状难以定量与定性的测定,造成了性状的基础数量遗传特性解析不明确。因此,以杂交育种、选择育种为代表的传统育种技术在时效性、可靠性等方面已不能满足当前刺参良种选育的技术要求。

针对刺参野生原种种质资源匮乏、良种选育技术瓶颈与种业产业发展需求,未来在刺参育种领域的关键技术和科学问题包括:(1)开展原种种质资源保护与保存的关键技术是什么?(2)疣足、体色等经济性状的发病机制是什么?(3)生长速度、抗病能力与耐温能力等性状的遗传机制是什么?(4)与国外群体所培育的杂种后代是否会对本地种造成基因污染?(5)自交群体所培育的新品种是否会出现遗传多样性降低等近交衰退现象?而未来需要重点突破的技术包括多组学联用的表型解析技术、行为生理学为基础的性状评估技术、基于全基因组的精确育种技术等。通过将现代生物学技术和现代遗传学技术

与刺参良种选育工作相融合,实现育种效率的大幅提高与目标性状的精准选育,从而针对市场需求,以良种为基础,拉长刺参下游产业链条,实现刺参产业的多元化发展。

2.1 应用现代遗传技术实现性状精准高效选育

现代遗传育种技术在水生动物的成功应用主要包括细胞工程育种技术、转基因育种技术、全基因组选择育种技术、基因编辑技术等,相关技术可在细胞、染色体水平或基因水平对选育对象进行遗传改良,进而实现目标性状进行精准选育。

我国已对现代遗传育种技术在刺参良种选育工作的应用进行了初步探索,Xu等^[23]采用SNP分子标记技术筛选到了*hsp90*基因序列中与耐温表现型相关联的位点,并将该技术应用到了刺参良种“东科1号”的性状鉴定中。为保证育种效果,应针对刺参生物学特征选择合适的育种技术。例如,刺参周年生长旺盛期包括春季生长期与秋季生长期两个阶段,然而研究结果发现,性腺发育所需能量约占总生长能量支出的50%以上^[24],因此,通过细胞工程为原理的育种技术应用,可通过诱导雌核发育或者多倍体育种等手段,人工改变刺参良种染色体组,创制不育后代,进而优化生长能量的分配模式,提高同化的能量物质在体壁沉积的比率,实现生长性状的改良。然而,新型育种技术多在实验室内开展,大规模产业化应用报道极少。

此外,自2017年完成刺参全基因组序列测定工作以来,全基因组不但为深入解析刺参生活史进化特征提供了关键信息,也为进一步升级刺参良种选育技术提供了重要基础数据支持。未来,应以刺参全基因组序列为基础,采用SNP分子标记技术、QTL定位技术与GWAS关联分析技术等,开展耐温、多刺、抗病、速生等重要性状的分子标记筛选并评估其遗传特征,通过建立完善的设计育种技术与理论体系,全面提高育种效率与性状选育精准度。

2.2 应用现代分子生物学技术解析性状发生机制

优良经济性状不但是良种的选育目标,同时也是刺参重要表现型特征,但目前对刺参优良性状的生物学机制认知多不明确。例如,刺参背部疣足的数量、长度、排列形式是决定刺参产品价值的关键因素,但疣足的发生机制、疣足的生物学功能、疣足的

发育机理等关键信息仍不明确,基础生物学认知的缺乏严重阻碍了育种工作的开展。

以高通量测序为基础的现代分子生物学技术为全面深入了解刺参表型性状发育机制提供了重要支持并得到了广泛的应用。例如,在体色性状良种选育中,Xing等采用转录组、蛋白质组与代谢组等多组学联用的方法,从色素细胞发育、色素沉积动态等角度综合阐明了紫、白与青等刺参品系体色变异的综合调控机制与发育学机理,为从体色表型深入了解刺参生理生态适应特征提供了数据支持,同时为精准选育紫体色和白体色刺参良种提供了数据支撑^[8-11]。

2.3 应用现代行为学原理完善性状评估技术体系

良种性状评估技术体系建设是科学客观评价选育优势性状的基础手段。在我国刺参新品种培育过程中,体重、生长率与养殖成活率等传统基础生物学指标应用较多,近年来,代谢率、代谢酶、消化酶等生理指标也逐渐得以应用到刺参良种选育工作中。然而,生长与生理等数据的获取具有检测技术要求高、数据获取周期长的特点,而行为学数据具有快速直观的反应良种性状的优势,但目前还未见应用。

近年来我国学者在刺参行为学领域取得了系列技术与理论突破^[24-25],为建立基于行为参数的刺参良种性状评估技术体系提供了新的思路。因刺参关键行为参数例如运动行为、摄食行为等对环境因子等响应敏感,且行为功能的发生与维持需消耗大量能量^[24, 26],因此,在控制实验与野外实验中,行为指标均可作为良种选育的关键参数。例如,可通过移动频率、遮蔽物选择敏感度、呼吸行为与应激行为等热调节行为、盐度调节行为与成活率等关联分析,以热盐刺激下移动频率高、遮蔽物选择灵敏度高、呼吸频率高、应激行为弱的个体为优质亲本,开展抗逆性状良种选育。也可通过摄食效率、摄食选择性、摄食节律等系列摄食行为指标与生长性状等关联分析,以摄食时间长、夜间摄食效率高、摄食选择性低与生长速度快的个体为优质亲本,开展速生性状良种选育。而刺参行为指标可采用无损标签标记后,通过缩时摄像机和运动摄像机等获取行为视频资料,通过计算机视觉解析技术完成系列行为数据的精准高效采集。此外,行为学在刺参育种支撑技术体系建

立中也具有重要意义。例如,配子释放行为与求偶行为等与刺参亲参培育、高质量精卵采集密切相关^[27],而栖息地选择行为与集群行为研究可为附着基设计、养殖池塘改造、底播生境优化设计等提供重要数据支撑^[28]。

3 结论

“国以农为本,农以种为先”,种业是渔业生产的源头和基本生产资料,种业发展的优劣直接关系到养殖水产品的产量和渔民增收。在刺参产业的发展过程中,应进一步明确和强化刺参种质资源保护的基础性和公益性定位,坚持渔业种业科技创新始终是蓝色粮仓保障体系的基础与核心,积极发展现代遗传育种技术与刺参良种选育工作相融合,实现育种效率的大幅提高与目标性状的精准选育,从而有效提高良种覆盖率,为种业强国建设添砖加瓦。

参考文献:

- [1] Yang Hongsheng, Hamel J F, Mercier A. The Sea Cucumber *Apostichopus Japonicus*: History, Biology and Aquaculture[M]. Amsterdam: Academic Press, 2015: 383-398.
- [2] Ru Xiaoshang, Zhang Libin, Li Xiaoni, et al. Development strategies for the sea cucumber industry in China[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2019, 37(1): 300-312.
- [3] Zhang Xiaojun, Sun Lina, Yuan Jianbo, et al. The sea cucumber genome provides insights into morphological evolution and visceral regeneration[J]. PLoS biology, 2017, 15(10): e2003790.
- [4] 农业部渔业渔政管理局. 2019 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019: 15-84. Fishery administration bureau of ministry of agriculture. China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019: 15-84.
- [5] 廖玉麟. 中国动物志棘皮动物门海参纲[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 51. Liao Yulin. Fauna Sinica-Phylum Echinodermata-Class Holothuroidea. Beijing: Science Press, 1997: 51.
- [6] Conand C, Byrne M. A review of recent developments in the world sea cucumber fisheries[J]. Marine fisheries review, 1993, 55(4): 1-13.
- [7] Purcell S W, Samyn Y, Conand C. Commercially Important Sea Cucumbers of the World[M]. FAO, 2012: 87.
- [8] Xing Lili, Sun Lina, Liu Shilin, et al. Transcriptome analysis provides insights into the mechanism of albinism during different pigmentation stages of the albino

- sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. Aquaculture, 2018, 486: 148-160.
- [9] Xing Lili, Sun Lina, Liu Shilin, et al. Growth, histology, ultrastructure and expression of MITF and astacin in the pigmentation stages of green, white and purple morphs of the sea cucumber, *Apostichopus japonicus*[J]. Aquaculture research, 2018, 49(1): 177-187.
- [10] Xing Lili, Sun Lina, Liu Shilin, et al. IBT-based quantitative proteomics identifies potential regulatory proteins involved in pigmentation of purple sea cucumber, *Apostichopus japonicus*[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics, 2017, 23: 17-26.
- [11] Xing Lili, Sun Lina, Liu Shilin, et al. De Novo assembly and comparative transcriptome analyses of purple and green morphs of *Apostichopus japonicus* during body wall pigmentation process[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics, 2018, 28: 151-161.
- [12] 杨红生. 现代水产种业硅谷建设的几点思考[J]. 海洋科学, 2018, 42(10): 1-7.
Yang Hongsheng. Several strategies for the modernization of the construction of the aquaculture seed industry silicon valley[J]. Marine Sciences, 2018, 42(10): 1-7.
- [13] Chang Yaqing, Shi Shengbao, Zhao Chong, et al. Characteristics of papillae in wild, cultivated and hybrid sea cucumbers (*Apostichopus japonicus*)[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(63): 13780-13788.
- [14] 杨建敏, 宋志乐, 王卫军, 等. 刺参“崆峒岛 1 号”[J]. 中国水产, 2015, (12): 55-57.
Yang Jianmin, Song Zhile, Wang Weijun, et al. New aquaculture variety of sea cucumber “Kongtongdao No.1”[J]. China Fisheries, 2015, (12): 55-57.
- [15] Zhang Sicong, Yang Hongsheng, Liu Shilin, et al. The influence of genetics factor on key growth traits and quantitative genetic analysis of sea cucumber *Apostichopus Japonicus* (Selenka) heat-resistant and fast-growing strain[J]. Aquaculture international, 2015, 23(1): 219-233.
- [16] Zhang Sicong, Liu Shilin, Zhang Libin, et al. Effect of stocking density on key growth traits of a fast - growing and heat - resistant strain of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*)[J]. Aquaculture research, 2016, 47(11): 3636-3643.
- [17] Liu Shilin, Sun Jingchun, Ru Xiaoshang, et al. Differences in feeding, intestinal mass and metabolites between a thermotolerant strain and common *Apostichopus japonicus* under high summer temperature[J]. Aquaculture research, 2018, 49(5): 1957-1966.
- [18] Liu Shilin, Zhou Yi, Ru Xiaoshang, et al. Differences in immune function and metabolites between aestivating and non-aestivating *Apostichopus japonicus*[J]. Aquaculture, 2016, 459: 36-42.
- [19] 宋坚, 王增东. 刺参“安源 1 号”[J]. 中国水产, 2019, (3): 75-79.
Song Jian, Wang Zengdong. New aquaculture variety of sea cucumber “Anyuan No. 1”[J]. China Fisheries, 2019, (3): 75-79.
- [20] 王印庚, 廖梅杰, 李彬, 等. 刺参“参优 1 号”[J]. 中国水产, 2019, (10): 96-101.
Wang Yingeng, Liao Meijie, Li Bin, et al. New aquaculture variety of sea cucumber “Shenyao No. 1”[J]. China Fisheries, 2019, (10): 96-101.
- [21] Yang Hongsheng, Zhou Yi, Zhang Tao, et al. Metabolic characteristics of sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka) during aestivation[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2006, 330(2): 505-510.
- [22] Dong Yunwei, Dong Shuanglin, Meng Xianliang. Effects of thermal and osmotic stress on growth, osmoregulation and Hsp70 in sea cucumber (*Apostichopus japonicus* Selenka)[J]. Aquaculture, 2008, 276(1-4): 179-186.
- [23] Xu Dongxue, Sun Lina, Liu Shilin, et al. Polymorphisms of heat shock protein 90 (Hsp90) in the sea cucumber *Apostichopus japonicus* and their association with heat-resistance[J]. Fish & shellfish immunology, 2014, 41(2): 428-436.
- [24] Ru Xiaoshang, Zhang Libin, Liu Shilin, et al. Reproduction affects locomotor behaviour and muscle physiology in the sea cucumber, *Apostichopus japonicus*[J]. Animal Behaviour, 2017, 133: 223-228.
- [25] Pan Yang, Zhang Libin, Lin Chenggang, et al. Influence of flow velocity on motor behavior of sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. Physiology & behavior, 2015, 144(5): 52-59.
- [26] Ru Xiaoshang, Zhang Libin, Liu Shilin, et al. Energy budget adjustment of sea cucumber *Apostichopus japonicus* during breeding period[J]. Aquaculture research, 2018, 49(4): 1657-1663.
- [27] Fujiwara A, Yamano K, Ohno K, et al. Spawning induced by cubifrin in the Japanese common sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. Fisheries Science, 2010, 76(5): 795-801.
- [28] 辛孝科, 张立斌, 于正林, 等. 栖息地分布与种内竞争对刺参集群特征的影响[J]. 海洋科学, 2018, 42(5): 138-144.
Xin Xiaoke, Zhang Libin, Yu Zhenglin, et al. Effects of habitat distribution and intraspecific competition on aggregation features of sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. Marine Sciences, 2018, 42(5): 138-144.

Current advances and technological prospects of the sea cucumber seed industry in China

YANG Hong-sheng^{1, 2, 3, 4, 5}, SUN Jing-chun^{1, 2, 3, 4}, RU Xiao-shang^{1, 2, 3, 4},
ZHANG Can-ying⁶, XING Li-li^{1, 2, 3, 4}, SUN Li-na^{1, 2, 3, 4}, LIN Cheng-gang^{1, 2, 3, 4},
LIU Shi-lin^{1, 2, 3, 4}, ZHANG Li-bin^{1, 2, 3, 4}

(1. CAS Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. Center for Ocean Mega-Sciences, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4. CAS Engineering Laboratory for Marine Ranching, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 5. The Innovation of Seed Design, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 6. Document Information Center, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Jan. 19, 2020

Key words: sea cucumber; genetic breeding; trait; technological innovation

Abstract: Sea cucumber is an important marine aquaculture species in China. The seed industry plays a key role in sustainable development of the sea cucumber industry chain. However, the coverage ratio of good varieties is still relatively low in sea cucumber aquaculture. In this report, the current advances in the sea cucumber seed industry are discussed in terms of the traits of new sea cucumber varieties. Subsequently, the development of the seed industry is discussed vis-à-vis the challenges caused by global climate change. Finally, three strategies are presented that might contribute to sustainable development of the seed industry. Our work can provide new insights into the transformation and upgrading of the seed industry in the future.

(本文编辑: 丛培秀)