

水产动物对环境胁迫的应对策略

李美慧¹, 匡少平¹, 霍 达^{2, 3, 4, 5}

(1. 青岛科技大学环境与安全工程学院, 山东 青岛 266042; 2. 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 266000; 3. 青岛海洋科技中心 海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266237; 4. 水产品种创制与高效养殖全国重点实验室, 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266000; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 气候变化正在以前所未有的广度和深度重塑水生生态系统, 驱动温度、pH、溶解氧含量等多个环境因子发生变化, 对水产动物造成诸多不利影响, 阻碍了水产养殖发展, 造成经济损失和生态环境失衡。据 IPCC 第 6 次评估报告显示, 自工业革命以来, 全球地表温度升高约 1.1 °C, 2011—2020 年海洋表层温度较 1850—1900 年平均值升高 0.88 °C, 海洋表层 pH 从 8.32 降至 8.1, 开放海洋中溶解氧含量平均减少 1%~2%, 沿海低氧区缺氧现象加剧。多种环境参数的协同变化对水产动物构成的复合胁迫, 影响其各种生理机能和生长、发育、繁殖过程, 造成数量和分布的变化; 扰乱海洋碳氮磷循环, 打破海洋生态系统原有的平衡。虽然水产动物可通过调节生理、分子与行为特征在短期内缓解弱胁迫, 但自我调节能力有限, 加之气候变化的复杂性, 使其难以仅通过自身响应以抵消长期复合胁迫的累积损伤。为解决这一问题, 研究人员已提出诸多应对策略, 包括培养抗逆品系、使用新型养殖设备和模式、借助人工智能技术等, 以提高水产动物在面对环境胁迫时的抗逆能力, 降低气候变化对其造成的负面影响, 维持海洋生态系统结构和功能的稳定。尽管上述几种方法已在实际应用中取得显著成效, 但在规模化应用中仍存在一定困难。为应对目前面临的挑战, 拟进一步通过研发新型平台与系统、构建新兴养殖模式, 以及结合多种先进科技方法等提升水产养殖的应对能力。并通过建立水产动物环境胁迫分级预警制度进一步提升风险防控能力。本文综述了气候变化对水产动物的影响及其应对策略, 为水产养殖行业的可持续发展提供科学依据和实践指导。

关键词: 全球气候变化; 环境胁迫; 水产动物; 适应策略

中图分类号: S941(水产养殖学) 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2025)9-0000-00

DOI: 10.11759/20250714002

气候变化指在一定的时间区间内, 气候的平均状态随时间的推移而发生显著变化^[1]。目前, 生态系统中过量的二氧化碳(CO₂)被认为是导致气候变化的重要原因之一^[2]。过量化石燃料的燃烧等人类活动导致大量 CO₂ 在环境中存积, 引发了温室效应, 进而引发一系列生态问题, 包括全球气候变暖、冰川融化加速、海平面上升等^[3]。与此同时, 海洋生态系统正经历着剧烈变化。海水温度持续上升、海水酸化程度加深、海洋中溶解氧含量降低、盐分分布变化和极端天气事件频发等现象日益显著。根据世界气象组织的最新数据, 2021 年全球平均海平面达到历史新高; 在 2013 至 2021 年间, 海平面以平均每年 4.5 mm 的速率上升, 热带气旋不断加强, 极端事件发生的频率显著增加。据统计, 2010 至 2020 年间, 全球海洋热

浪发生天数较 1982 至 1999 年增加了 54%, 且其强度更高、持续时间更长。此外, 政府间气候变化专门委

收稿日期: 2025-07-14; 修回日期: 2025-8-10

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF0802202); 水产品种创制与高效养殖全国重点实验室开放课题(2025BBSA03); 山东省重大科技创新工程(2021CXGC11206); 泰山学者工程资助(tsqn202306287)

[Foundation: the National Key Research and Development Program of China, No. 2022YFF0802202; Open Research of the State Key Laboratory of Breeding Biotechnology and Sustainable Aquaculture, No. 2025BBSA03; Shandong Province Major Science and Technology Innovation Project, No. 2021CXGC11206; Taishan Scholars Program, No. tsqn202306287]

作者简介: 李美慧(2001—), 女, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事环境压力下刺参的综合响应研究, E-mail: LMH25599@163.com; 匡少平(1966—), 通信作者, 男, 湖南株洲人, 教授, 博士, 主要从事固体废物污染化学与控制、土壤环境化学与污染控制、环境材料技术研发与应用等研究, E-mail: kuangshaoping@126.com; 霍达(1994—), 通信作者, 女, 辽宁铁岭人, 副研究员, 博士, 主要从事海参逆境生物学与系统生物学研究, E-mail: huoda@qdio.ac.cn

员会(IPCC)第6次评估报告(AR6)指出,自1980年以来,全球热带气旋的潜在破坏力每十年增加约5%。据世界气象组织(WMO)公布的信息,1970~2021年间,天气、气候和水极端事件高达11 778个,造成200万人死亡,经济损失达4.3亿万美元。频繁且强烈的恶劣天气对沿海生态系统及沿海养殖行业造成了严重的破坏。例如,2021年7月下旬,台风“烟花”登陆中国浙江舟山和平湖沿海,造成大量人口受灾和经济损失,大量沿海对虾养殖基地被淹没,造成数万吨对虾死亡。据中国水生动物卫生状况报告,2023年,我国水产养殖因极端环境胁迫等造成的异常死亡经济损失约498亿元,约占水产养殖总产值的3.8%,水产养殖行业在气候变化影响下遭受了极为严重的损失。

为有效应对气候变化对水产动物的影响,国内外学者和产业界正从适应能力提升、遗传育种改良、养殖模式创新等多个角度探索应对策略。目前,我国在养殖技术方面,如循环水养殖系统(RAS)、深远海养殖技术等,已位于国际先进水平,但在基因育种领域仍有较大突破空间。本文系统阐述了几种主要环境因素变化对水产动物造成的影响,并对水产动物自身响应及现有的应对策略研究进展进行了综述。

1 水产动物常见的环境胁迫种类

1.1 海洋变暖

海洋变暖是全球气候变化的主要表现形式之一。大气中不断增加的温室气体捕获了从地球表面辐射出的热量,导致气温升高,进而引发全球气候变暖^[4]。据估计,若大气中温室气体的含量继续以当前速率增加,全球温度到2100年将升高3~3.5℃^[5]。2024年全球海洋表面温度和海洋上层2 000 m的热含量均达到人类有观测记录以来的最高值。与2023年相比,海洋上层2 000 m热含量增加了(16±8) ZJ(1 ZJ = 10²¹ J)。过去20年间,全球海洋变暖速率已从0.58 w/m²增至1.05 w/m²,并且预计将继续加速,尤其是在中高纬度地区,其海洋变暖的情况将更加明显。

海洋整体温度的持续上升,将导致更频繁和更强烈的海洋热浪、飓风等极端天气现象的发生,对海洋生态系统的平衡和生物多样性构成严重威胁。海水温度升高会干扰水产动物的生理过程,打乱其繁殖周期^[6]。同时,海洋变暖导致有限的生存资源和栖息空间减少,水产动物之间的竞争愈发激烈^[7]。各种不利因素相互叠加,极大地阻碍了生物多样性的发展,许多

物种的生存面临极大威胁,数量不断减少,甚至面临灭绝风险。海水温度的持续升高将破坏海洋生态系统结构和功能,打破原有的生态平衡,对全球生态稳定和人类的可持续发展产生难以预估的负面影响。

1.2 海水酸化

海水酸化是由于环境中大量的CO₂进入海洋,导致水体的pH值下降。正常海水的pH值约在7.5~8.4之间,表层海水通常稳定在8.1 ± 0.2。自工业革命以来,海水pH值已下降约0.1个单位,并且预计将继续下降^[8]。海洋是生态系统中最大的碳库,同时也是生物泵的重要组成部分。在自然状态下,海洋可以通过生物的生命活动将吸收的CO₂转化为有机碳,部分有机碳随生物的死亡和沉降进入深海^[9]。然而,气候变化加剧了海水酸化程度,导致海洋中碳酸盐饱和度降低。这不仅抑制了海洋中的能量流动,同时增加了溶解有机物(DOC)的浓度,降低了海洋对CO₂的吸收能力,进而影响全球碳循环的平衡。此外,碳库状态的变化也影响了碳在不同海洋层次中的分布。

海水酸化会损害贝类、虾、蟹等钙化生物的部分功能,增加它们从海水中获取碳酸根离子的难度,从而影响外壳和骨骼的构建^[10]。此外,海水pH的降低还会改变鱼类和其他生物的生理和行为,造成感官系统紊乱,干扰了其嗅觉系统和听觉系统。同时,海水酸化也会影响鱼类的呼吸和血液酸碱平衡,进而干扰其生长和繁殖过程,具体表现为水产动物生长速度缓慢、生殖细胞质量下降、受精率降低等^[11]。

1.3 溶解氧含量降低

海水中溶解氧含量降低不仅受海水温度升高的影响,还受人为因素的显著影响。根据Oxyformer(一种用于估计全球海洋溶解氧含量的深度学习方法)的研究结果,在2003~2020年间,海水中溶解氧含量下降速度为(1 045 ± 665) Tmol·decade⁻¹,且在未来其下降速率将继续增加^[12]。在热带海域,受热塘效应和风暴活动的影响,海水中溶解氧含量普遍偏低。若全球气候变暖持续加剧,低纬度地区海水的缺氧状态将进一步恶化^[13]。不仅如此,水体分层现象也将更加明显。表层温暖且富氧的海水难以和深层缺氧的海水充分混合,导致下层海水的溶解氧难以得到补充,氧气浓度在垂直方向上的差异将进一步扩大^[14]。

绝大部分水产动物对溶解氧有较高的需求,长期处于低氧环境下会导致其呼吸困难和代谢紊乱,

严重时甚至可导致死亡^[15]。对整个生态系统而言,溶解氧含量的降低会改变群落结构,对溶解氧要求高的生物将逐渐衰退,进而导致生物多样性降低^[16]。多种因素共同作用,使水产动物种类组成发生变化,海洋生态系统的结构趋于简化,对其稳定性和功能构成严重威胁。

1.4 盐度变化

海水盐度分布不仅受大气降水和蒸发的影响,也受到海洋变暖和风场变化的显著影响。气候变化促使全球水循环的加速,改变了降水和蒸发这2个影响盐度变化的关键因素的模式,进而导致降水量和海洋洋流随之发生变化。由于全球降水量分布不均,海洋中盐度的原始分布被打破,盐度差异不断扩大,直接影响了水产动物的生存空间和分布范围^[17]。同时,洋流对海洋中盐分进行重新分配,使其在空间上发生变化。

盐度变化还会对水产动物的生理功能产生多方面的影响。在高盐环境下,生物需要消耗额外能量来排除体内多余的盐分,以维持细胞水分的平衡,导致用于生长发育的能量随之减少。此外,盐度变化还将影响生物的呼吸功能,使代谢速率减缓^[18]。盐度作为许多水产动物生长、发育的重要环境因素,其不适宜的变化会导致幼体生长缓慢、胚胎发育畸形乃至死亡^[19]。对于盐度敏感的水产动物而言,无法适应盐度变化将影响其生长发育和种群繁殖,最终导致个体死亡及种群数量下降。

1.5 其他环境胁迫因素

除了温度等主要环境因素外,各种污染物质(如重金属、微塑料、石油等)以及细菌病毒也会随着海洋洋流的变化影响水产动物。不断上升的海平面可能会淹没沿海的垃圾填埋场、工业废物堆放点以及一些废弃的沿海设施。一旦发生这种情况,其中所含的大量污染物质将进入海洋环境中,从而造成海洋污染,影响水产动物生命活动。此外,频发的海洋极端气候事件,如飓风、暴雨和海洋热浪等,也会通过地表径流将陆地的污染物大量带入海洋^[20]。除此之外,海洋温度升高还会导致一些原本生活在特定温度区域的病毒向更广泛的海域扩散,从而增加病毒传播的机会。同时,海洋热浪会导致水产动物免疫能力的降低,进而导致病毒传播速度加快,致病风险显著升高^[21]。海洋噪音作为一种新兴的胁迫因素,其影响范围因气候变化而日趋扩大,且海水温度升高和盐度上升会使声速增加,进一步扩大海洋噪音的

传播范围,对依靠声音进行信息交流的水产动物造成损害。

2 气候变化对水产动物产生的影响

2.1 个体层面影响

2.1.1 生理机能

气候变化直接影响水产动物个体的生理机能,其代谢率、血氧含量、酸碱平衡和渗透压等多个生理指标均会在环境条件改变的情况下发生变化。

海水升温提高了水产动物个体的基础代谢率,使其呼吸速率加快。研究表明,水温每升高 10 °C,水产动物的代谢率将提高 2~3 倍^[22]。这一变化与线粒体的功能密切相关。作为水产动物体内生理代谢的核心细胞器,线粒体内多种酶对温度具有依赖性。在一定的范围内,温度的升高会促进线粒体内关键酶(如细胞色素 c 氧化酶(CCO)、柠檬酸合酶(CS)等)的活性。当水温超过水产动物的耐受温度上限时,这些酶的活性就会因温度的升高而急剧下降^[23-24]。线粒体功能因此受到损伤,降低了 ATP 的合成速率,造成水产动物体内能量收支失衡、供应不足,最终破坏整个代谢过程的稳定。

海水酸化打破了水体原本的酸碱平衡,引发水产动物的代谢和功能的异常。当生存环境 pH 偏离最适值时,水产动物体内与糖酵解过程相关酶(如己糖激酶(HK)、丙酮酸激酶(PK)和磷酸果糖激酶(PFK))的活性受到显著抑制,同时降低了线粒体琥珀酸脱氢酶(SDH)的催化效率。这种酶活性的抑制会阻碍三羧酸循环的正常运行,最终导致氧化磷酸化受阻和 ATP 合成的不足。Heuer 和 Grosell^[25]发现,海水酸化导致 $p\text{CO}_2$ 和 HCO_3^- 含量增加,干扰线粒体功能,降低 ATP 生成效率,破坏能量代谢。同时神经递质功能异常,导致神经信号传导紊乱,血浆氨浓度升高,引发神经中毒。即便细胞内 pH 在合理范围,糖酵解过程仍会受影响。酸化还干扰了水产动物的离子调节机制,导致细胞内外的离子动态平衡被打破,钙离子调节发生障碍。例如,当 pH 为 4.0 时,赤眼鲟(*Squaliobarbus oourriculus*)血浆中的 Na^+ 和 Cl^- 将快速流失,使其在 28 h 内死亡。长期生存在酸化环境中还会对水产动物有氧呼吸过程造成影响。以对环境 pH 非常敏感的虹鳟鱼(*Oncorhynchus mykiss*)为例,在酸性环境(pH=4.2)中,因血液的 pH 值显著下降导致其在水中获取的氧气无法有效输送到组织中从而使其长期处在缺氧状态,导致虹鳟鱼的摄食量大幅

下降,生长速度减缓,甚至出现呼吸急促、鳍部发红等应激反应。

受气候变化影响,部分水体溶解氧含量降低从而形成低氧环境($DO \leq 2$ mg/L)。若水产动物长期处于这种缺氧状态会使体内的乳酸脱氢酶活性显著提高,促使乳酸积累,从而引发酸性中毒,干扰细胞内正常的代谢过程。此外,溶解氧含量的降低会改变水产动物的能量代谢方式。在低氧条件下,水产动物的有氧代谢被抑制,无氧代谢增强。三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)在低氧环境下,因无氧代谢强度增加使其肝糖原含量降低,使得葡萄糖和乳酸含量增加。同时能量供应效率降低,成本增加,长时间的低氧胁迫导致自身的能量储备耗尽,最终可能导致其生理机能受损,甚至死亡^[26]。

2.1.2 生长发育

气候变化导致水产动物新陈代谢紊乱,进而影响其个体的生长发育过程。虽然有研究表明,水温的短暂升高可能会促进水产动物的生长效率。但长期处于高温环境下会使生物体生长不均衡,个体提前发育成熟,导致体型变小。例如,Liu 等^[27]发现长期高温下香港塘鲡鱼(*Clarias fuscus*)的体重和体长显著低于适宜温度中生存的个体。这种现象在长期生活于较冷水域的水产动物中尤为明显,因为水温的升高使它们将体内大部分能量用于维持各种生理代谢过程,从而减少了分配给生长发育的能量,增加了幼体死亡率和个体发育不良、畸形的概率。

海洋酸化会对水产动物的生长发育产生许多负面影响。一方面,酸化的环境增加了水产动物的代谢成本,阻碍了生长发育过程。研究表明,受到海洋酸化的影响,钙化生物类群平均生长速率降低 11%~19%,非钙化类群虽差异并不显著,但整体生长率同样呈下降趋势^[28]。除此之外,对于钙化生物,水体酸化程度加深导致它们不正常成壳,壳边缘呈卷曲、壳厚减薄、变态时间略有推迟、畸形率显著提高。另一方面,酸化环境还影响水产动物的存活率,特别是它们的幼体会对环境因子的变化更加敏感。Dickinson 等^[29]通过研究发现,当美洲牡蛎(*Crassostrea virginica*)的幼体暴露在高 CO_2 和低盐度的环境中时,其死亡率显著上升。进一步分析其各种组织生长状况后发现,不利的生存条件可能造成吸收能力的下降,导致美洲牡蛎幼体能量获取不足。

溶解氧含量的降低会导致水产动物的摄食量显著下降,同时降低其消化吸收率,进而使得动物获

取的能量和营养物质减少,最终导致生长速度明显减缓。有研究发现,与常氧条件(90%DO)相比,大西洋鲑(*Salmo salar*)在轻度缺氧(60%DO)和中度缺氧(50%DO)条件下,摄食量分别降至正常值的 72%和 60%^[30]。此外,低氧环境还会对水产动物的免疫系统造成严重损害,从而更容易受到病原体的侵袭,引发各种疾病,这不仅会进一步阻碍其正常生长,还会显著降低其存活率,造成巨大的经济损失。例如凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)生存环境中溶解氧量的减少降低其摄食率,同时免疫系统功能也因长期生存在低氧环境中受到损伤,血淋巴中的免疫细胞数量减少,免疫相关基因的表达水平下降,更容易受到病原体(如白斑综合征病毒)的侵袭。

2.1.3 繁殖

水产动物的繁殖过程同样受到温度、盐度、溶解氧等环境因素的显著影响^[31]。水温升高会使部分鱼类的繁殖周期发生变化,导致传统渔场的获取量急剧下降^[32]。鱼苗孵化后还可能会因环境条件不适合和食物资源不足而导致存活率的降低。高温环境还会显著影响水产动物性成熟和繁殖能力。以头足类为例,高温条件下其性成熟率低,胚胎存活率下降。例如当水温超过 19 °C 时,枪乌贼(*Loligo chinensis*)的胚胎成活率从 92%~96%急剧下降至 47%^[33]。此外,高温还会导致配子的质量下降,进而影响受精能力,降低繁殖成功率^[34]。

pH 值和盐度的变化会显著影响受精作用甚至导致受精卵死亡。低 pH 值会干扰部分水产动物卵周胶体的生理活动,导致卵吸水减少,进而降低受精成功率。研究表明,当水体的 pH 低于正常值时,多种鱼类的卵受精失败率明显上升。低 pH 值还会抑制负责鱼类卵孵化的酶绒毛膜酶(chorionase)的活性,不同鱼类的孵化酶活性与 pH 值有关,如虹鳟鱼(*Oncorhynchus mykiss*)卵在 pH 值超过 6.5 时绒毛膜酶活性最高^[35]。此外,低 pH 值还会导致卵黄囊吸收延迟,影响胚胎的正常发育。盐度异常同样影响水产动物繁殖情况。雌性褐虾(*Crangon crangon*)长期生存在低盐环境中会使卵巢发育受到抑制,影响繁殖的成功率^[36]。鱼类胚胎在盐度异常的环境下可能会出现发育畸形,如脊柱弯曲、器官发育不全等情况,严重影响其孵化后的生存能力和繁殖能力^[37]。

一些鱼类在产卵前需要消耗更多的能量来进行性腺发育和求偶行为,因此需要充足的氧气供应。如果水体中的溶解氧含量下降,可能会导致它们的繁殖性能降低。例如,雌性鱼类可能会减少产卵数量,

雄性鱼类的精子活力也会受到影响^[38]。对于需要在水体底层繁殖的一些贝类生物,低氧环境可能会使它们无法正常产卵,或卵子无法正常受精^[39]。Keita等^[40]对菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)在早期发育阶段对缺氧和对硫化氢(H₂S)耐受性进行研究,发现在缺氧条件下,海水中的硫酸盐会被转化为硫化氢,这种物质对水产动物具有剧毒,从而严重影响菲律宾蛤仔的繁殖过程。

2.2 种群层面影响

2.2.1 种群的数量

气候变化对水产动物种群规模的影响十分复杂。全球约30%的海洋鱼类种群已因升温、酸化等压力呈现数量下降趋势,其中热带珊瑚礁鱼类、冷水性鱼类、钙化贝类是最脆弱的类群。特别是对生存在极地区区的鱼类,因其本身对温度的耐受能力较弱,一旦温度升高就会导致整个种群的生存率大幅度降低。北极鳕鱼(*Boreogadus saida*)是北极地区重要的经济鱼类,但随着水温升高,其适宜生活温度范围变窄,热耐受能力有限,很可能会因环境温度的不适宜大规模死亡^[41]。据IPCC发布的《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》,若不控制温室气体排放20.5%~24.1%海洋渔业最大捕捞潜力可能减少20.5%~24.1%,淡水水产动物数量下降幅度或更高。

这种种群规模下降的趋势不仅受到直接的环境压力影响,还受到一系列间接因素的综合作用。一方面,频繁波动的环境因子通过影响水产动物的代谢和生长发育,导致个体发育缓慢,推迟其性腺发育成熟的时间,进而使种群数量无法及时得到补充,难以扩大种群规模^[42]。另一方面,气候变化通过影响繁殖率来改变种群规模。不适宜的环境条件导致水产动物的性别比例失衡,繁殖量降低,种群内的出生率逐渐接近甚至低于死亡率,而幼体存活率的降低进一步加剧了种群规模的缩小^[43]。此外,恶劣的环境条件导致水质变差和疾病传播,同样会降低水产动物的种群规模。Marcos-López等^[44]对英国的鱼类进行研究,发现鱼类的免疫行为和病原体的传播与水温密切相关。随着水温升高,当地鲑鱼的地方病发病率显著上升,夏季鲤鱼渔业中锦鲤疱疹病毒的暴发也会持续较长时间。

2.2.2 种群的分布

在不利环境条件的影响下,水产动物会本能地向更适宜的环境迁移,从而导致其种群分布发生改

变^[45]。海水升温导致许多原本生活在温带海域的鱼类逐渐向高纬度或者高海拔地区迁移,造成其分布范围缩小。与此同时,赤道附近的物种数量逐渐减少,两极地区的物种数量呈现增加趋势^[46]。例如,大西洋鲑等体型较大的洄游物种在其栖息地较高纬度区域种群数量增加,而在赤道附近地区则减少。

珊瑚礁作为生物多样性最为丰富的区域之一,为多种水产动物提供了栖息地、食物来源和繁殖场所,但因海水酸化造成珊瑚礁的大量破坏,使以珊瑚礁为栖息地的水产动物分布范围缩小。此外,许多水产动物还会根据盐度变化调整其栖息地选择。一些生活在河口海岸潮间带的广盐性鱼类对盐度变化的适应范围广,而生活在盐度稳定区域的狭盐性鱼类则对盐度变化非常敏感,当盐度发生变化时会迫使它们离开原本的栖息地寻找更合适的生存场所。不仅如此,全球变暖导致的海平面升高会淹没部分沿海湿地和浅滩,迫使原本栖息在这些区域的水产动物向内陆迁移或寻找其他适宜的栖息地^[47]。

极端的天气事件同样会改变水产动物的分布。南美洲西海岸的洪堡洋流变暖、贫氧,导致凤尾鱼(*Coilia mystus*)种群转移、渔获量下降。在2015—2016年的海洋热浪期间,一些底栖鱼类为减少自身受到的影响而向更深、更凉爽的水域迁移。这种迁移行为不仅影响了鱼类的分布范围,还可能对深海生态系统产生连锁反应,导致某些物种的栖息地缩小或消失,特别是对温度敏感的物种。

2.3 生态系统层面影响

气候变化影响海洋生态系统的氮磷循环、平衡和功能。在剧烈的环境条件变化下,海洋生态系统及其功能受到破坏,导致碳、氮、磷循环异常以及生物栖息地的退化^[48]。作为影响碳循环的主要因素,大量CO₂进入海洋造成海水中碳酸盐体系失衡,削弱了钙化生物形成外壳的能力,进而影响其生存并对食物链造成破坏。海水温度升高及营养盐分布变化影响了固氮蓝藻的分布和活性,降低了海洋固氮速度,影响了以此为食的水产动物^[49]。同时,溶解氧含量的降低影响了硝化和反硝化过程,改变了氮在海洋生态系统中的存在形式,进而影响了生态系统的氮供应^[50]。此外,氮沉积量的增加导致海洋富营养化加剧,赤潮现象频发。在磷循环中,气候变化导致海洋上升流和混合层深度的变化,阻碍了深层磷向表层供应,从而影响了浮游植物的生长^[51]。

环境条件的变化还破坏了水产动物的栖息地。作为海洋生物重要的栖息地之一,珊瑚礁因气候急剧变化大量白化,导致海洋生物多样性降低。不仅如此,珊瑚礁的破坏还削弱了其作为天然防波堤的功能,加剧了海岸带被侵蚀的风险^[52]。气候变化还打破了生态系统中原本的食物链结构,影响了食物供应的稳定性,导致水产动物的迁移和食物链的重组。海洋生态系统的生态服务功能因此下降,表现为渔业资源减少、气候调节功能削弱、初级生产力减少等。气候变化导致生态系统的稳定性减弱,表现为生物多样性的丧失和生态系统功能的退化。例如,气候变化可能通过改变物种间的竞争和共生关系,影响生态系统的结构和功能生态障碍(如生物群落边界、海岸线和海拔)会影响群落响应气候变化而迁移的能力。

3 水产动物对环境胁迫的自身响应及应对策略

3.1 分子响应

3.1.1 基因表达层面

环境胁迫下,水产动物一系列相关基因被快速激活。这些基因通过编码关键蛋白质,参与损伤修复和稳态维持,帮助水产动物适应复杂的环境变化。热休克蛋白(HSP)作为水产动物体内最保守的应急响应分子之一,在高温、缺氧、盐度等胁迫下表达量均明显上调。例如尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)在34℃高温胁迫6h后,肝脏中HSP70基因表达量较对照组升高80倍,HSP90基因表达量升高30倍,通过稳定细胞内蛋白质结构减少损伤^[53]。在低盐胁迫下,斑节对虾(*Penaeus monodon*)血细胞中的HSP90基因表达量上调,通过诱导免疫蛋白的合成,清除受损细胞外来有害物质,使其抗性增强^[54]。

水产动物面对环境胁迫时会产生大量的活性氧(ROS),引发氧化应激,为了应对这种应激状态,水产动物体内的抗氧化基因会被激活,进而增强清除ROS的能力,以减轻氧化损伤并维持细胞的正常功能和稳态。缺氧胁迫下,中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)的CAT(过氧化氢酶)基因表达量显著增加。CAT能够将过氧化氢(H₂O₂)分解为水(H₂O)和氧气(O₂),从而减少过氧化氢对细胞的氧化损伤^[55-56]。凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)在氧化应激下,核因子E2相关因子2(Nrf2)基因表达显著上调,进而激活下游抗氧化基因的表达,增强其抗氧化防御能力^[57]。

盐度胁迫破坏了水产动物体内的渗透压平衡,体内与离子转运相关的基因被激活,维持体内水盐稳定。高盐胁迫时,水产动物体内失水,离子浓度升高。鳃和肾脏通过增强离子转运蛋白表达,将多余的离子排出体外。广盐性鱼类,如鳗鲡(*Anguilla japonica*)从低盐度水域进入高盐水体后,鳃组织的钠钾泵(*Na⁺/K⁺-ATPase gene, NKA*)基因表达量显著增强,通过NKA将体内过量的Na⁺和Cl⁻^[58],同时肾脏中水通道蛋白(*Aquaporins, AQP*)基因表达上调,减少体内水分的流失以适应高盐环境^[59]。面对低盐胁迫时,肾脏和肠道增强离子重吸收功能,减少离子流失。为应对缺氧胁迫,水产动物通过上调氧气运输,无氧代谢及抗凋亡相关基因维持能量供应和细胞存活。通过缺氧诱导因子(HIF)调控下游基因表达,对溶解氧的利用率进行优化。

3.1.2 表观修饰层面

除了基因表达的变化,表观遗传修饰在短期和长期胁迫适应中起关键作用,特别是在慢性胁迫或跨代适应中有显著意义。在水产动物体内,参与环境胁迫响应的表观遗传修饰主要有三类:DNA甲基化、组蛋白修饰和非编码RNA调控,其核心功能是通过改变染色质结构或基因转录效率,实现对胁迫相关基因的精准调控。

环境胁迫能够通过改变基因启动子区的甲基化水平来调控基因的表达。DNA甲基化主要是通过向基因启动子区添加甲基基团来实现对基因表达的调控。当水产动物面临环境胁迫时,基因启动子区的甲基化水平会发生变化,进而影响基因的转录活性。例如,太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)长期暴露于低氧环境后,HIF-1 α 基因启动子区甲基化水平降低,解除对基因转录的抑制,从而增强HIF-1 α 蛋白表达^[60]。欧洲鲈(*Dicentrarchus labrax*)在高温环境下,雄性比例大于雌性,且雄性鲈鱼幼鱼性腺内的CYP19A启动子甲基化水平显著高于雌性幼鱼。在高温刺激下,雌鱼CYP19A基因的启动子甲基化水平明显上升,表明DNA甲基化参与基因调控诱导性别分化^[61]。

组蛋白修饰是表观遗传调控的重要机制之一,主要包括组蛋白的乙酰化、甲基化等多种修饰方式。这些修饰通过改变染色质的结构和状态,进而影响基因的转录活性。刺参在对高温胁迫进行响应的过程中涉及组蛋白乙酰化动态调控,表现为肠道H3K9乙酰化水平先升后降,并伴随4种组蛋白乙酰转移酶基因的显著上调^[62]。许氏平鲷(*Sebastes schlegelii*)

受到慢性高温胁迫后,其鳃、肝脏和肠道组织中多个基因的表达发生变化,其中一些基因的启动子区组蛋白 H3K27 三甲基化水平可能发生变化,影响基因的转录活性^[63]。

非编码 RNA(ncRNA)在水产动物的环境胁迫响应中发挥着重要的调控作用。它们通过多种机制调节基因表达,从而帮助水产动物适应不利的环境条件。miRNA、lncRNA 等非编码 RNA 通过靶向 mRNA 抑制翻译或促进降解,参与胁迫响应。例如 miR-122 在鱼类肝脏中可靶向 CYP450 基因,在正常状态下抑制其表达;当暴露于污染物时,miR-122 表达下调,解除对 CYP450 的抑制,增强解毒功能。低盐胁迫下香港巨牡蛎(*Magallana hongkongensis*)中 miR-3205 表达显著上调,miR-2353 表达显著下调,这些 miRNA 的表达变化有助于其适应盐度变化^[64]。

3.1.3 遗传进化层面

水产动物在面对环境胁迫时通过选择压力下基因频率的变化、跨代记忆以及微生物组协同进化等机制,显著提高自身的耐受性。这些机制不仅帮助个体在短期内适应环境变化,还通过遗传等方式传递给后代,增强了整个种群的耐受能力。

在选择压力下,基因频率的变化是水产动物适应环境变化的重要机制之一。这种压力通过多种方式影响水产动物的基因频率,包括功能突变、拷贝数据异常等,这些变化有助于水产动物在特定的环境中提高生存和繁殖的成功率。受到环境胁迫的影响,部分水产动物可能会发生基因序列的突变,从而改变蛋白质的结构和功能,从而更好地适应当下的环境。拷贝数据异常是由于基因组中基因拷贝数据的增加或减少,显著影响基因表达水平。这种机制可以帮助水产动物在不同的环境压力下调节基因表达,增强自身的适应能力。例如, Wu 等^[65]在大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*) 4 条染色体上鉴定出 5 个显著的单核苷酸多态性(SNP),基于此预测了 30 个候选基因在热胁迫期间表现出差异表达,包括热休克因子蛋白 1、DnaJ 同源物亚家族 B 成员 4、蛋白 Hikeshi、蛋白二硫键异构酶 A3 等,证实了在介导大黄鱼个体间 AHT 变异中的重要性。

跨代记忆是指生物体利用表观遗传机制,将自身经历的环境信息传递给后代。这一过程能够加速适应性性状在不同世代间的传递,从而使后代更好地应对相似的环境胁迫。例如悉尼岩牡蛎(*Saccostrea glomerata*)在跨代暴露于海洋酸化条件下,其适应性性状在不同世代间会进行传递,亲代牡蛎暴露在高

二氧化碳环境后,其后代在酸化环境中表现出更好的适应性,这种适应性即便在成年个体中也能持续,并传递给下一代^[66]。

微生物与宿主之间的协同进化是生物适应环境胁迫的另一种重要机制。通过宿主-微生物功能互补,生物可以提高对胁迫的耐受性。有研究证实了生存环境的盐度会对斑节对虾(*Penaeus monodon*)肠道微生物群和转录基因造成影响。部分有益菌群的相对丰度增加,可能有助于增强虾的免疫防御能力,从而在低盐度环境中维持肠道健康。同时,根据转录组分析可知这种免疫防御能力的变化还会影响黑虎虾相关基因表达,从而进一步适应环境盐度变化^[67]。

3.2 生理、行为响应

3.2.1 生理响应

对水产动物而言,环境胁迫对其生长发育等一系列生理生命活动造成不良影响,但在一定耐受范围内水产动物可以通过调整自身的代谢率、能量分配、渗透压等维持内环境的稳定,进行正常的生命活动。

在高温条件下,水产动物通常以提高代谢率和呼吸速率的方式维持自身正常的生理功能。例如铁饼鱼(*Sparus aurata*)的耗氧率随着温度的升高而增加,表明其代谢率也相应加快^[68]。线粒体也通过调整自身功能形态进行调节。高温驯化下通过降低线粒体体积密度减少能量的消耗,但会造成多种危害。水产动物在低氧环境中的应对机制与在高温环境中类似。短期低氧环境下,水产动物为了补偿代谢率的升高,通过加快自身呼吸频率提高对环境中的氧的摄取率。若长期暴露在低氧环境中,水产动物的代谢率下降,呼吸频率也相应降低以减少对氧气的消耗。在缺氧环境下,水产动物还会通过糖酵解和向无氧代谢的方式维持自身能量的供应。

正常细胞代谢过程中线粒体会产生一定的活性氧(ROS),在一定浓度下可作为信号分子参与细胞的生理调节,但在高温、酸化、缺氧等胁迫下会使 ROS 的浓度显著提高从而在体内积累,产生氧化应激。这时水产动物体内的抗氧化防御系统就会被快速激活对 ROS 进行清除,维持细胞功能的稳定。水产动物自身主要通过酶系防御途径进行调节。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)和谷胱甘肽还原酶(GR)构成第一道防线,将 O₂⁻、H₂O₂ 等自由基转化为无害的水和氧。

水产动物通过调节渗透压的方式应对环境中盐度的变化。研究表明,黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)在从海水转移到淡水时,其脑和鳃的生理响应表现出显著的时空转录动态变化,帮助其适应盐度变化^[69]。此外,酸化环境也会对水产动物的渗透压调节产生影响。例如,低 pH 值会干扰鳃的离子交换机能,导致 Na^+ 、 Cl^- 等离子损失增多,血液黏度增大,进而影响其渗透压调节。

3.2.2 行为响应

水产动物在应对环境胁迫时表现出多种行为响应,最大程度地降低能量的消耗、维持生存。在高温或低氧环境中,鱼类会立即作出逃避反应,通过暴发式摆尾迅速提升游泳速度寻找并占据适宜生存环境^[70]。例如金枪鱼(*Katsuwonus pelamis*)在低氧刺激下增加游泳速度快速逃离低氧区域^[71]。若短时间内无法找到适温或富氧区域,鱼类将进入滑行或静止状态减少体内能量的损耗,从而在胁迫下获得最大生存概率。在面对低氧胁迫时,部分鱼类试图通过增加浮头频率以获取氧气,但仍会造成生长速率和生育能力的下降^[72]。不仅如此,水产动物还会对种群的分布密度进行调整以满足个体的有氧呼吸需求。大西洋鲱鱼(*Clupea harengus*)在低氧胁迫下个体间距增加以缓解个体呼吸困难,降低种群总体需氧量^[73]。

温度作为另一个重要的胁迫因子,当其升高超过适宜范围后,水产动物为减少体内热量的产生,维持体温的稳定,会主动降低摄食量甚至停止进食。例如在 34 °C 长期胁迫下,尽管脑内促食欲基因 *agrp* 表达上调,军曹鱼(*Rachycentron canadum*)仍因整体厌食机制而摄食量显著下降,以平衡高温导致的额外能量消耗^[74]。高温还使表层水体升温,水产动物会主动向水温较低的底层或阴凉处聚集,以避免高温对个体的直接伤害。海参为应对夏季高温会寻找相对阴凉隐蔽的区域进入夏眠状态,减少能量消耗,保持体力以等待环境条件适宜后重新恢复正常生理活动。

海水酸化影响水产动物的化学感觉、神经传递和能量代谢,迫使水产动物对其作出响应维持生存。北极蛤(*Arctica islandica*)在 pH 6.2 时,瓣膜开合频率增加 2 倍,以提高水交换速率、缓解酸中毒^[75]。为了对抗酸性环境,贻贝、海胆、螃蟹开始溶解保护壳以对抗体液中酸度的提高。可即便这些水产动物最终适应这种酸性环境,仍不可避免地会对其健康造成损害。

当盐度发生骤变时,凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)会产生应激性提前或延迟退壳,表面渗透压也因退壳发生变化,同时主动游向盐度较低的区域以减少渗透压调节负担。大部分贝类(如缢蛏、紫贻贝等)在受到急性盐度胁迫后会迅速紧闭外壳同时关闭进、出水管,主动与外环境隔离,在短时间内减少盐度冲击。

4 水产动物应对环境胁迫的外部策略进展

随着全球气候变化及各种环境问题的日益突出,水产动物面临的各种胁迫压力不断增加。为应对这些挑战,目前已有的应对措施主要集中在以下 4 个方面。首先,通过育种技术培育具备良好抗逆性能的新型水产品种和品系,使其在不良环境条件下仍能表现出较好的抗逆能力,从根本上增强水产动物对环境胁迫的适应能力。其次,在水产养殖过程中,利用新型养殖设备对水产动物的生存环境进行实时监测和调控,维持水体环境的稳定性,从而最大程度降低环境胁迫对其造成的负面影响。再次,新型养殖模式的探索和应用也在一定程度上为水产动物应对环境胁迫提供了有力支持。通过优化养殖结构,增强系统整体的抗逆能力,能够有效提高水产动物的生存率和生长性能。最后,人工智能机器人和大数据技术的应用为水产动物应对各种环境胁迫提供了更精准化、智能化的方法。这些技术可以实时监测环境变化,预测潜在风险,并通过智能化管理措施及时调整养殖策略,从而提高水产动物对环境胁迫的应对能力。

4.1 研发抗逆品系、抗逆品种

培育具有良好抗逆能力的品种和品系是当前水产动物应对气候变化的重要策略之一。尽管水产动物对环境条件的变化具有一定的耐受范围,但气候变化的复杂性和多变性导致各种环境因子的波动已超出其承受阈值。因此,研发具有良好抗逆能力的品种品系对水产动物应对气候变化具有重要意义。传统的育种方式包括家系育种、群体选育和杂交选育,通常通过环境胁迫选育的方法筛选耐盐碱、耐低氧、耐高温或低温等性状的品种。近年来,我国在研发抗逆品系方面取得了显著成果。例如,刺参“东科 1 号”(GS-01-015-2017)经选育后,24 月龄个体的平均体重较未选育普通群体约提高 23.2%,在高温条件下成活率提高了

13.6%; 大菱鲆“多宝 2 号”(GS-02-004-2022)以耐高温为目标性状, 经过杂交培育成功; 与未育种个体相比, 该品种在耐高温方面表现出显著提升, 且在水温 10~25 °C 的相同培养条件下, 15 月龄体重和存活率分别提高 30.6%和 26.7%; 栉孔扇贝蓬莱红 4 号(GS-01-012-2023)与未经选育的个体相比, 24 月龄耐温上限和壳高分别提高了 3.50 °C和 20.86%。表 1 对近年来我国在抗逆品系育种成果进行了整理。

虽然传统选育种技术在水产养殖过程中具有重要的应用价值, 但其不可避免地存在局限性, 例如选育周期长、效率低、基因多样性受限等。随着基因工程的兴起, 分子育种技术逐渐成为现代水产育

种的重要发展方向。该技术结合了分子生物学、基因组学等多种前沿科学, 通过精准的基因操作实现对水产动物优良性状的改良和新品种的培育^[76]。利用多基因编辑技术和复合胁迫育种, 可获得具有复合抗逆能力、能耐受多种环境胁迫的水产新品种。尽管分子育种技术面临技术成本高、转基因和基因编辑技术争议大等挑战, 但其带来的经济效益和生态效益不容忽视。抗逆品系的培养不仅能提高水产动物抵抗不良环境条件的能力, 将其投入到海洋牧场中还可以提高其整体的抗逆能力, 促进生态环境的恢复, 提升生态系统应对全球变化下极端环境胁迫的能力。

表 1 农业农村部公布的具有抗逆特性的水产新品种(2014—2024 年)

Tab. 1 New aquatic species exhibiting stress-resistance characteristics recognized by the Ministry of Agriculture and Rural Affairs (2014–2024)

品种名称	选育性状	登记号
中国对虾“黄海 6 号”	低温耐受性 WSSV(白斑综合征病毒)抗性和收获体重	GS-01-008-2023
栉孔扇贝“蓬莱红 4 号”	耐温和壳高	GS-01-012-2023
海湾扇贝“海益丰 11”	壳色、壳高和耐温性	GS-01-012-2022
刺参“鲁海 2 号”	体重和耐低盐	GS-01-013-2022
刺参“华春 1 号”	高温耐受力和体重	GS-01-014-2022
大菱鲆“多宝 2 号”	体重和耐高温	GS-02-004-2022
凡纳滨对虾“渤海 1 号”	生长快速兼耐高盐	GS-02-006-2022
凡纳滨对虾“海茂 1 号”	抗哈氏弧菌和生长快速	GS-02-007-2022
半滑舌鳎“鳎优 1 号”	抗哈维氏弧菌, 生长快速和成活率高	GS-01-005-2021
菲律宾蛤仔“斑马蛤 2 号”	壳色, 生长快速和耐低温	GS-01-007-2021
文蛤“科浙 2 号”	抗副溶血弧菌, 成活率和产量	GS-02-001-2021
中国对虾“黄海 4 号”	耐高 pH 胁迫, 生长快速和养殖成活率	GS-01-003-2020
缢蛏“甬乐 1 号”	生长快速和耐低盐	GS-01-004-2020
坛紫菜“闽丰 2 号”	耐高温和生长快速	GS-01-010-2020
暗纹东方鲀“中洋 1 号”	耐低温	GS-01-003-2018
罗非鱼“壮罗 1 号”	抗病性状和生长性状	GS-01-004-2018
鲃鲂“先锋 2 号”	生长快速、抗病能力	GS-01-005-2018
刺参“鲁海 1 号”	耐低盐和成活率	GS-01-011-2018
云龙石斑鱼	生长快速和耐低温	GS-02-002-2018
绿盘鲍	耐高温、生长快速、规格大	GS-02-003-2018
异育银鲫“中科 5 号”	生长快速和抗病性	GS-01-001-2017
凡纳滨对虾“正金阳 1 号”	耐低温、耐低盐、成活率和生长快速	GS-01-006-2017
中国对虾“黄海 5 号”	抗病性和生长快速	GS-01-008-2017
刺参“东科 1 号”	体重和度夏成活率	GS-01-015-2017
刺参“参优 1 号”	体重和抗病性	GS-01-016-2017
团头鲂“华海 1 号”	抗病力强、生长快速	GS-01-001-2016
海湾扇贝“海益丰 12”	高产、抗逆	GS-01-006-2016
菲律宾蛤仔“白斑马蛤”	壳色, 壳长和耐低温	GS-01-009-2016
合方鲫	生长快速, 抗逆性和肉质	GS-02-001-2016

续表

品种名称	选育性状	登记号
长珠杂交鳊	生长快速, 抗逆性和肉质	GS-02-003-2016
牙鲆“鲆优 2 号”	抗病, 养殖存活率和生长快速	GS-02-005-2016
吉富罗非鱼“中威 1 号”	生长快速和抗逆性(对链球菌引起的细菌性疾病敏感性降低)	GS-01-003-2014
乌斑杂交鳊	耐低温和生长快速	GS-02-002-2014
西盘鲍	高温适应性好, 生长快速和养殖成活率	GS-02-008-2014
皱纹盘鲍“福海 1 号”	壳长和耐高温	GS-01-013-2024
缢蛏“甬乐 2 号”	耐氨氮和体重	GS-01-014-2024
牙鲆“圣航 1 号”	耐高温和体重	GS-02-004-2024
凡纳滨对虾“海景洲 1 号”	白斑综合征病毒抗性、养殖成活率和体重	GS-01-008-2024

4.2 新型养殖设施

在水产养殖过程中, 新型养殖设备的投入使用可在一定程度上降低不良环境因素对水产动物造成的影响。高精度传感器和自动化调控设备的应用使养殖人员能够对各种水质指标(如溶解氧、温度、盐度等)进行实时监测和调控。目前的新型养殖设备不仅能够对温度、溶解氧含量等单个因素进行控制调节, 还能通过动态调控使水体整体环境始终保持在适宜范围内。此外, 作为重要的养殖设备之一, 网箱结构也随科技进步不断更新迭代, 在抗风浪、防逃逸等方面不断优化, 增强了其应对极端天气事件的能力。图 1 对当前几种主要的养殖设备进行了总结。

溶解氧含量不足是养殖过程中的常见问题, 严重影响水产动物的生长发育。为有效解决这一问题, 通常在养殖环境中安装增氧设备以补充水体溶解氧。随着集约化高密度水产养殖系统的发展, 对更加高效节能的供氧设备需求日益增加。Zhang 等^[77]对一种新型管式曝气设备进行了研究, 结果表明这种新型充氧设备在循环水养殖系统(recirculating aquaculture system, RAS)系统中具备良好的曝气效果, 其标准氧转移效率可达到 $(0.07 \pm 0.0074) \text{ kg O}_2 \text{ h}^{-1}$, 循环体积为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 。与传统设备相比, 这种设备体积小、成本低、无附加功率, 仅依赖进水功率即可完成加氧。

气候变化导致水产动物生存环境的温度波动加剧, 为维持养殖环境温度的稳定, 通常需要使用水温调节设备。与传统的控温设备相比, 新型控温设备可以根据实际情况对养殖水温进行精准调控, 不仅提高了控温的精度和效率, 还降低了养殖成本。例如, 目前已有的各系列数字控温器, 不仅具有较大的控温范围和灵活的控制方式, 还具备高效节能和耐用性强的特点, 显示出良好的应用前景。此外, 一些新

兴设备能够利用自然资源减少能源的消耗。例如, 一种太阳能辅助加热设备通过将太阳能转化为热能对水温进行加热, 并通过循环系统将热水输送到养殖场, 有效解决了气候变化下能源成本高和可持续性差的问题^[78]。

智能水质检测系统能够实时监测水体中各项指标参数, 并将结果及时传送到终端设备, 方便工作人员随时查看。一旦水体指标出现异常, 检测系统会立即发出警报, 提醒工作人员及时进行调节^[79]。近期, 有一种基于多元深度学习技术的水质传感器可对养殖水质进行实时监测, 该传感器具备长短期记忆的多元多重卷积网络(MCN-LSTM), 对水质检测的准确率可达到 92.3%^[80]。

深水网箱因其抗风浪能力强、养殖容量大、鱼类生长速度快以及能够应对复杂海洋环境等优点, 已成为海水养殖的重要方式之一。随着技术的不断更新迭代, 新型智能化网箱采用先进的材料和技术, 在加固网箱结构的同时, 显著提升了其抗风浪和抗流性能。网箱内部配备了多种检测传感器, 能够实时监测环境因子和水产动物的活动信息。所获数据通过无线传输上传至云端平台, 可使工作人员及时调节养殖环境。此外, 网箱内配备的高清摄像头可以实时观测鱼群动态, 便于及时清理死亡个体, 进一步优化养殖管理。

为有效应对全球气温不断升高对刺参养殖行业造成的损失, 降低夏季高温期池塘底部礁体构型对刺参成活率的影响, 中国科学院海洋研究所的孙景春等^[81]发明了一种刺参安全度夏的池塘养殖系统及养殖方法(CN118947607A)。该系统通过水体冷气降温单元降低池塘水体温度, 实验结果表明, 与未设置组相比, 池塘水体温度可降低约 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。该发明通过在适宜位置设置礁体模块及冷气降温单元, 为刺参

提供了有利的栖息场所。设置在礁体模块上的栽培单元能够阻隔阳光,防止其直接照射到池塘水体。同时,利用池塘水环境种植植物形成植物层,有效阻挡了外部高温向水体内部传导。通过构建上(遮阳单元)—中(栽培单元)—下(水体冷气降温单元和礁体模块)的立体化刺参养殖池塘系统,为池塘刺参度夏提供了良好的环境保障,有效解决了因高温导致刺参死亡率升高的问题。

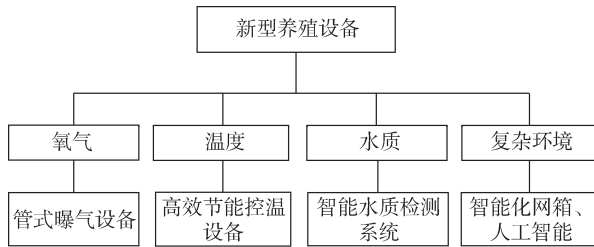


图1 新型养殖设备分类

Fig. 1 Classification of novel aquaculture equipment

4.3 新养殖理念及模式

新型养殖模式和理念的提出应用,为水产动物应对气候变化提供了新的方向,并在实现可持续化方面具有重要意义。当前,水产养殖模式正通过技术融合加速智能化转型,形成“监测—预警—闭环”管理模式,同时,养殖模式也在向生态养殖多样化方向发展,优化系统结构和功能,增强整个系统的自我调节能力,以实现可持续发展。这不仅提高了资源利用率,还推动了低碳养殖的实现。常见的新型养殖理念(模式)包括陆海接力养殖、多营养层次综合养殖等。

4.3.1 陆海接力养殖模式

陆海接力养殖模式是一种将陆基工厂化循环水养殖系统与海上养殖相结合的综合养殖模式。该模式通过陆地与海洋进行空间与时间上的衔接,充分利用了陆基养殖和近海养殖各自的优势及适宜的环境条件,从而提高了水产动物的存活率及生长速度、增加了养殖效应、减少了对近海的环境压力^[82]。通过分段式管理,这种模式在应对气候变化方面更加灵活,能够科学规划养殖的时空分布,有效避免传统单一模式下气候变化对水产动物造成的胁迫,维持养殖环境的相对稳定和适宜性,进而提高水产动物的存活率。陆海接力养殖模式目前已被广泛应用于三文鱼、罗非鱼和大黄鱼等鱼类的养殖过程中,并显著提升了鱼群的产量与质量。一项基于生命周期评估(life cycle assessment, LCA)和生命周期成本(life

cycle cost, LCC)的研究对黄条鰺(*Seriola aureovittata*)陆海接力养殖模式的环境影响和经济效益进行了分析。结果表明,这种陆海接力养殖模式结合了陆基工厂化循环水养殖和深海网箱养殖的优势,在陆基工厂进行苗种培育和越冬,随后将鱼苗转移至深海网箱中进行夏季养殖。通过充分利用陆基和海洋环境的优势,该模式不仅提高了鱼类的生长速度和存活率,还有效减少了近海环境的压力^[83]。

4.3.2 多营养层次综合养殖模式

多营养层次综合养殖模式(integrated multi-trophic aquaculture, IMTA)是一种通过在同一空间内培养不同营养层次和种类的生物,形成一个小型的生态循环系统,利用生物之间的相互作用实现资源的循环利用和生态平衡的养殖模式^[84]。IMTA 应对环境胁迫的机制主要包括生物多样性缓冲、物质循环与污染削减和微环境的改良。通过不同营养级之间的互补和冗余设计,该模式能够分散环境胁迫风险,提高系统的稳定性。系统中产生的废物被多级利用,减少了富营养化现象的发生,降低了水体缺氧的风险。在系统表层生活的藻类不仅具有遮荫降温的功能,其表面形成的天然生物膜还能优化局部微环境,增强系统的抗逆能力,缓解如高温、低氧等胁迫因素的影响。目前,IMTA 已在全球多地得到应用并取得了显著成效。例如,秘鲁的萨曼科湾将 IMTA 应用于海水养殖,不仅降低了气候变化对水产动物影响,还促进了当地经济的发展^[85]。在欧洲大西洋沿岸,IMTA 的建设不仅降低了气候变化带来的威胁,还提高了当地水产动物的质量和数量,对周边地区的生态环境也产生了积极影响^[86]。在希腊,IMTA 被应用于双壳类和全壳类水产动物的养殖,与自然种群相比,养殖动物在存活率以及生长状况等方面都有较好的表现^[87]。

该模式不仅能够维持养殖环境的稳定,减少气候变化对水产动物造成的影响,还能显著提升经济效益,同时降低碳排放,为应对气候变化和实现碳中和目标提供强有力支持。例如,位于山东荣成桑沟湾的 IMTA 模式通过藻类和贝类协同养殖^[88],每年固碳量可达 42.5 万吨,有效减少了温室气体排放,同时提高了海洋生态系统的碳汇能力。

4.4 人工智能与大数据应用

随着科学技术的不断发展,人工智能机器人逐渐被应用于水产养殖领域。结合人工智能(artificial intelligence, AI)和物联网(Internet of Things, IoT)技

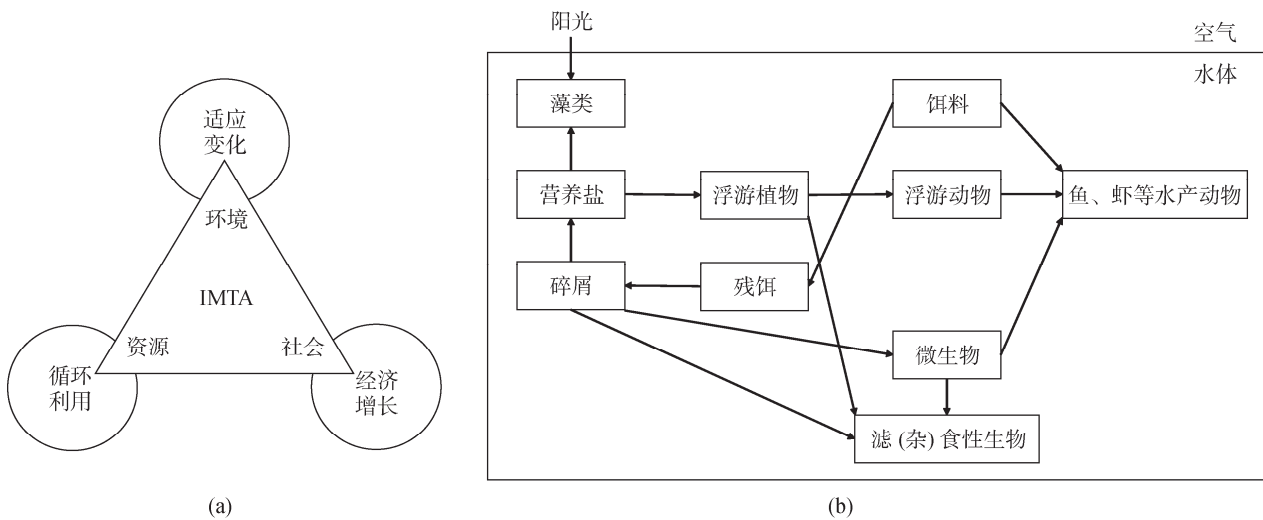


图 2 IMTA 优势(a)及模式(b)
Fig. 2 Integrated multitrophic aquaculture (IMTA): (a) advantages and (b) operational modes

术, 水产养殖逐渐从传统的养殖模式向智能化、数字化模式转变。配备高精度智能传感器的机器人能够对养殖水体进行实时监测, 一旦发现水质异常现象, 即可及时提醒并调控。通过整理分析历史和实时数据, 人工智能预测水质参数变化, 从而便于提前采取保护措施。此外, 部分 AI 机器人利用图像识别技术监测水产动物的健康状况, 通过分析水下摄像头拍摄的图像, 识别水产动物异常行为或病变, 并结合环境数据和健康数据预测疾病暴发的可能性。物联网技术在水产养殖领域的应用, 使得养殖过程产生的大量数据得以存储和分析。与人工智能相结合形成的 AioT 系统, 不仅可以监测水质和微气候变化并发出预警, 还能连接各种养殖设备进行精准操控^[89]。目前, 人工智能和大数据分析在水产养殖领域的应用逐渐向数字孪生、区块链溯源方向发展。通过构建养殖池的虚拟映射, 可以进行仿真优化管理; AI 与区块链的结合则可以实现养殖全过程追踪, 从而提高养殖管理的效率和透明度, 助力水产养殖应对全球变化。

5 存在问题与展望

全球气候变化导致环境因子发生变化, 对水产动物造成了诸多不利影响, 威胁了水产养殖行业的可持续发展, 并导致了经济损失和生态环境的破坏。针对当前所面临的问题与威胁, 许多科研人员已经开展了相关研究并提出了培育抗逆品系、研发新型养殖设施等相应的解决措施。尽管现有应对策略已取得一定成

效, 但在规模化应用过程中, 仍面临诸多挑战。例如, 环境胁迫情况日趋复杂, 定向基因育种技术存在瓶颈, 新型养殖模式大范围应用成本较高, 部分 AI 预警模型在跨区域作业时无法及时适应, 导致预测失误等。此外, 新型养殖设施和养殖模式在使用过程中还面临着环境挑战和社会因素等方面的问题^[90]。为应对上述挑战, 可进一步搭建多因子胁迫实验平台, 开发环境模拟系统, 对多个环境参数同时进行调控。采用相应曲面法(response surface methodology, RSM)对多因子交互效应进行分析。在育种方面, 结合全基因组关联分析(genome-wide association study, GWAS)和基因编辑技术, 提升水产动物的抗逆性能。提升新型生态养殖模式的适配性, 并建立生物安全防御体系, 以保证系统整体正常稳定运行。同时, 继续优化人工智能系统, 降低其应用成本。未来还可通过搭建水产动物环境胁迫分级预警制度, 提升水产养殖风险防控能力, 实现对胁迫的快速响应和分级处理, 从而推动水产养殖的高质量发展。通过多方面的共同努力, 有效解决气候变化对水产动物造成的环境胁迫, 保障水产养殖行业健康发展, 同时提高经济效益, 促进海洋生态系统可持续发展。

参考文献:

- [1] ABBASS K, QASIM M Z, SONG H, et al. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(28): 42539-42559.
- [2] FLORIDES G A, CHRISTODOULIDES P. Global

- warming and carbon dioxide through sciences[J]. *Environment International*, 2009, 35(2): 390-401.
- [3] FILONCHYK M, PETERSON M P, ZHANG L F, et al. Greenhouse gases emissions and global climate change: examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 935: 133-145.
- [4] BOER G J, FLATO G, RAMSDEN D, et al. A transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing: projected climate to the twenty-first century[J]. *Climate dynamics*, 2000, 16(6): 427-450.
- [5] CHENG L J, VON SCHUCKMANN K, ABRAHAM J P, et al. Past and future ocean warming[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(11): 776-794.
- [6] ALTER K, JACQUEMONT J, CLAUDET J, et al. Hidden impacts of ocean warming and acidification on biological responses of marine animals revealed through meta-analysis[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 1-12.
- [7] YANIK T, ASLAN I. Impact of global warming on aquatic animals[J]. *Pakistan Journal of Zoology*, 2018, 50(1): 1-10.
- [8] GIBSON R, ATKINSON R, GORDON J, et al. Impact of ocean warming and ocean acidification on marine invertebrate life history stages: vulnerabilities and potential for persistence in a changing ocean[J]. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 2011, 49: 1-42.
- [9] GIERING S L C, HUMPHREYS M P. Biological pump[M]//*Encyclopedia of Engineering Geology*. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, c2018: 1-6.
- [10] RIES J B, COHEN A L, MCCORKLE D C. Marine calcifiers exhibit mixed responses to CO₂-induced ocean acidification[J]. *Geology*, 2009, 37(12): 1131-1134.
- [11] KROEKER K J, KORDAS R L, CRIM R, et al. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(6): 1884-1896.
- [12] MA D L, ZHAO F, ZHU L K, et al. Deep learning reveals hotspots of global oceanic oxygen changes from 2003 to 2020[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2025, 136: 102-115.
- [13] KEELING R F, GARCIA H E. The change in oceanic O₂ inventory associated with recent global warming[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, 99(12): 7848-7853.
- [14] LI G C, CHENG L J, ZHU J, et al. Increasing ocean stratification over the past half-century[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10(12): 1116-1123.
- [15] SHEN Y W, YOU W W, LUO X, et al. An overview of the mechanisms underlying hypoxia tolerance differences in aquatic animals and their inspirations for aquaculture[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2023, 33(4): 1223-1236.
- [16] SAMPAIO E, SANTOS C, ROSA I C, et al. Impacts of hypoxic events surpass those of future ocean warming and acidification[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2021, 5(3): 311-321.
- [17] SHI H Y, DU L, NI X B. Amplified vertical salinity contrasts in the northwestern tropical Pacific under ocean warming[J]. *Climate Dynamics*, 2024, 62(12): 10465-10481.
- [18] BAL A, PANDA F, PATI S G, et al. Modulation of physiological oxidative stress and antioxidant status by abiotic factors especially salinity in aquatic organisms[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2021, 241: 108-120.
- [19] 柳旭东, 王际英, 张利民, 等. 盐度对水产动物生长代谢与生殖发育相关指标影响的研究[J]. *水产养殖*, 2009, 30(4): 42-46.
- [20] BOLAN S, PADHYE L P, JASEMIZAD T, et al. Impacts of climate change on the fate of contaminants through extreme weather events[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 909: 168-180.
- [21] HOLBROOK N J, SCANNELL H A, SEN GUPTA A, et al. A global assessment of marine heatwaves and their drivers[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-13.
- [22] SCHULTE P M, PODRABSKY J E, STILLMAN J H, et al. The effects of temperature on aerobic metabolism: towards a mechanistic understanding of the responses of ectotherms to a changing environment[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2015, 218(12): 1856-1866.
- [23] DAHLHOFF E, SOMERO G N. Effects of temperature on mitochondria from abalone (genus *Haliotis*): adaptive plasticity and its limits[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1993, 185(1): 151-168.
- [24] WEINSTEIN R B, SOMERO G N. Effects of temperature on mitochondrial function in the Antarctic fish *Trematomus bernacchii*[J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 1998, 168: 190-196.
- [25] HEUER R M, GROSELL M. Physiological impacts of elevated carbon dioxide and ocean acidification on fish[J]. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2014, 307(9): R1061-R1084.
- [26] 李叶森, 刘晶晶, 宿宪朋, 等. 溶解氧对三疣梭子蟹争斗行为和能量代谢的影响[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(10): 1311-1318.
- LI Yesen, LIU Jingjing, SU Xianpeng, et al. Effect of dissolved oxygen on agonistic behavior and energy metabolism of the swimming crab (*Portunus trituberculatus*)[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021,

- 28(10): 1311-1318.
- [27] LIU Y, TIAN C X, YANG Z H, et al. Effects of chronic heat stress on growth, apoptosis, antioxidant enzymes, transcriptomic profiles, and immune-related genes of Hong Kong catfish (*Clarias fuscus*)[J]. *Animals*, 2024, 14(7): 1006.
- [28] KROEKER K J, KORDAS R L, CRIM R, et al. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(6): 1884-1896.
- [29] DICKINSON G H, IVANINA A V, MATOO O B, et al. Interactive effects of salinity and elevated CO₂ levels on juvenile eastern oysters, *Crassostrea virginica*[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2012, 215(1): 29-43.
- [30] LILAND N S, LAI F, SICURO A, et al. On-growing Atlantic salmon (*Salmo salar*, L.) acclimate behaviourally and physiologically to chronic hypoxia, but exhibit reduced feed intake, growth and lipid retention[J]. *Aquaculture*, 2025, 611: 743043.
- [31] 陈永进, 徐东坡, 施炜纲. 水生动物对环境因子行为偏好研究进展[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(20): 18-24.
CHEN Yongjin, XIU Dongpo, SHI Weigang. Effects of environmental factors on behavior preference of aquatic animal[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(20): 18-24.
- [32] MUHLING B A, ZWOLINSKI J P, KURIYAMA P T, et al. Marine heatwaves and climate-driven warming impact availability of sardine subpopulations to northeast pacific fishing ports[J]. *Fisheries Oceanography*, 2025, 34: e12730.
- [33] 陆化杰, 陈子越, 陈新军. 气候变化事件对头足类繁殖、年龄生长与早期生活史影响的研究进展[J]. *水产学报*, 2024, 48(4): 049305.
LU Huajie, CHEN Ziyue, CHEN Xinjun. Research progress on the impact of climate change events on reproduction, age and growth, and early life history of cephalopods[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2024, 48(4): 049305.
- [34] PANKHURST N W, PORTER M J R. Cold and dark or warm and light: variations on the theme of environmental control of reproduction[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2003, 28(1): 385-389.
- [35] SWAIN S, SAWANT P B, CHADHA N K, et al. Significance of water pH and hardness on fish biological processes: a review[J]. *International Journal of Chemical Studies*, 2020, 8(4): 330-337.
- [36] GELIN A, CHARMANTIER G, CHARMANTIER-DAURES M, et al. Can salinity changes affect reproductive success in the brown shrimp *Crangon crangon*?[J]. *Journal of Crustacean Biology*, 2001, 21(4): 905-911.
- [37] CHANDRA G, SAINI V P, KUMAR S, et al. Deformities in fish: a barrier for responsible aquaculture and sustainable fisheries[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2023, 16(2): 872-891.
- [38] SCHRECK C B, TORT L. The concept of stress in fish[M]//Fish physiology. Heidelberg: Springer Berlin, c2016: 1-34.
- [39] CLARK H R, GOBLER C J. Diurnal fluctuations in CO₂ and dissolved oxygen concentrations do not provide a refuge from hypoxia and acidification for early-life-stage bivalves[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2016, 558: 1-14.
- [40] KODAMA K, WAKU M, SONE R, et al. Ontogenetic and temperature-dependent changes in tolerance to hypoxia and hydrogen sulfide during the early life stages of the manila clam *Ruditapes philippinarum*[J]. *Marine Environmental Research*, 2018, 137: 177-187.
- [41] GEOFFROY M, BOUCHARD C, FLORES H, et al. The circumpolar impacts of climate change and anthropogenic stressors on Arctic cod (*Boreogadus saida*) and its ecosystem[J]. *Elementa-Science of the Anthropocene*, 2023, 11(1): 00097.
- [42] MUNDAY P L, DIXSON D L, MCCORMICK M I, et al. Replenishment of fish populations is threatened by ocean acidification[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(29): 12930-12934.
- [43] BORGES F O, SAMPAIO E, SANTOS C P, et al. Impacts of low oxygen on marine life: neglected, but a crucial priority for research[J]. *The Biological Bulletin*, 2022, 243(2): 104-119.
- [44] MARCOS-LÓPEZ M, GALE P, OIDTMANN B C, et al. Assessing the impact of climate change on disease emergence in freshwater fish in the United Kingdom[J]. *Transboundary and Emerging Diseases*, 2010, 57(5): 293-304.
- [45] TAMARIO C, SUNDE J, PETERSSON E, et al. Ecological and evolutionary consequences of environmental change and management actions for migrating fish[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2019, 7: 1-15.
- [46] HASTINGS R A, RUTTERFORD L A, FREER J J, et al. Climate change drives poleward increases and equatorward declines in marine species[J]. *Current Biology*, 2020, 30(8): 1572-1577.
- [47] DANYLCHUK A J, GRIFFIN L P, AHRENS R, et al. Cascading effects of climate change on recreational marine flats fishes and fisheries[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2022, 106(2): 381-416.
- [48] DONEY S C, RUCKELSHAUS M, DUFFY J E, et al. Climate change impacts on marine ecosystems[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2012, 4(1): 11-37.

- [49] JING H B, FU F X, RIVERO-CALLE S, et al. Ocean warming alleviates iron limitation of marine nitrogen fixation[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(8): 709-712.
- [50] LANDOLFI A, KÄHLER P, KOEVE W, et al. Global marine N₂ fixation estimates: from observations to models[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 1-12.
- [51] BURNETT W C, ROE K K, PIPER D Z. Upwelling and phosphorite formation in the ocean[M]//SUESS E, THIEDE J. *Coastal Upwelling Its Sediment Record: Part A: Responses of the Sedimentary Regime to Present Coastal Upwelling*. Boston: Springer US, c1983: 377-397.
- [52] TRÉGAROT E, D'OLIVO J P, BOTELHO A Z, et al. Effects of climate change on marine coastal ecosystems: a review to guide research and management[J]. *Biological Conservation*, 2024, 289: 1-15.
- [53] 魏亚丽, 周艳, 黄思婕, 等. 高温胁迫下尼罗罗非鱼肝脏组织的转录组分析[J]. *大连海洋大学学报*, 2021, 36(2): 222-228.
WEI Yali, ZHOU Yan, HUANG Sijie, et al. Transcriptome analysis of liver tissue of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* exposed to high temperature stress[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2021, 36(2): 222-228.
- [54] JI J, WANG Q H, LI S G, et al. Transcriptomic analysis of *Penaeus monodon* in response to acute and chronic hypotonic stress[J]. *Frontiers in Veterinary Science*, 2024, 11: 1464291.
- [55] LIU Z M, ZHU X L, LU J, et al. Effect of high temperature stress on heat shock protein expression and antioxidant enzyme activity of two morphs of the mud crab *Scylla paramamosain*[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2018, 223: 10-17.
- [56] HONG Y H, HUANG Y, YAN G W, et al. Antioxidative status, immunological responses, and heat shock protein expression in hepatopancreas of Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* under the exposure of glyphosate[J]. *Fish & shellfish immunology*, 2019, 86: 840-845.
- [57] SHAO J C, ZHENG Q Y, CHEN Z B, et al. Enzyme-treated soybean meal serves as an effective alternative to fishmeal in the diet of the shrimp *Penaeus vannamei*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2025, 2025(1): 2312302.
- [58] TANG C H, LAI D Y, LEE T H. Effects of salinity acclimation on Na⁺/K⁺-ATPase responses and FXD11 expression in the gills and kidneys of the Japanese eel (*Anguilla japonica*)[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2012, 163(3/4): 302-310.
- [59] CUTLER C P, CRAMB G. Branchial expression of an aquaporin 3 (AQP-3) homologue is downregulated in the European eel *Anguilla anguilla* following seawater acclimation[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2002, 205(17): 2643-2651.
- [60] FU H R, LI Y L, TIAN J, et al. Contribution of HIF-1 α to heat shock response by transcriptional regulation of HSF1/HSP70 signaling pathway in Pacific oyster, *Crassostrea gigas*[J]. *Marine Biotechnology*, 2023, 25(5): 691-700.
- [61] 王昊泽, 王秀利. DNA 甲基化及其在水产养殖动物中的应用研究进展[J]. *河北渔业*, 2017(8): 48-53.
- [62] 张京京, 徐冬雪, 宋文琦, 等. 高温胁迫下刺参 H3K9ac 特征及 *HATs*、*HDACs* 的表达[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(2): 44-54.
ZHANG Jingjing, XIU Dongxue SONG Wenqi, et al. The acetylation characteristics of H3K9 and the expression of *HATs* and *HDACS* under heat stress in sea cucumber(*Apostichopus japonicus*)[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2024, 54(2): 44-54.
- [63] 谭杰,, 张正, 刘长琳, 等. 许氏平鲈对慢性高温胁迫响应的转录组学分析[J]. *中国水产科学*, 2024, 31(12): 1453-1463.
TAN Jie, ZHANG Zheng, LIU Changlin, et al. Transcriptomic responses to chronic heat stress in black rockfish(*Sebastes schlegelii*)[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2024, 31(12): 1453-1463.
- [64] 牛东红, 王宏蕾, 李家乐. 海洋贝类对盐度胁迫适应机制的研究进展[J]. *水产学报*, 2024, 48(4): 049104.
NIU Donghong, WANG Honglei, LI Jiale. Research progress on adaptation mechanism of marine shellfish to salinity stress[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2024, 48(4): 049104.
- [65] WU Y D, ZHOU Z X, PAN Y, et al. GWAS identified candidate variants and genes associated with acute heat tolerance of large yellow croaker[J]. *Aquaculture*, 2021, 540: 736696.
- [66] PARKER L M, O'CONNOR W A, RAFTOS D A, et al., Ross P M. persistence of positive carryover effects in the oyster, *Saccostrea glomerata*, following transgenerational exposure to ocean acidification[J]. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0132276.
- [67] CHAIYAPECHARA S, UENGWETWANIT T, ARAYAMETHAKORN S, et al. Understanding the host-microbe-environment interactions: intestinal microbiota and transcriptomes of black tiger shrimp *Penaeus monodon* at different salinity levels[J]. *Aquaculture*, 2022, 546: 737371.
- [68] WEN B, JIN S R, CHEN Z Z, et al. Plasticity of energy reserves and metabolic performance of discus fish (*Symphysodon aequifasciatus*) exposed to low-temperature

- stress[J]. *Aquaculture*, 2017, 481: 169-176.
- [69] JIN X K, WANG X D, TSE W K F, et al. Homeostasis and physiological regulation in the aquatic animal during osmotic stress[J]. *Frontiers in Physiology*, 2022, 13: 977185.
- [70] ERN R. A mechanistic oxygen-and temperature-limited metabolic niche framework[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2019, 374(1778): 20180540.
- [71] DOMENICI P, HERBERT N A, LEFRANÇOIS C, et al. The effect of hypoxia on fish swimming performance and behaviour[M]//PALSTRA A P, PLANAS J V. *Swimming physiology of fish: towards using exercise to farm a fit fish in sustainable aquaculture*. Berlin: Springer, c2012: 129-159.
- [72] SHANG F Q, LU Y, LI Y, et al. Transcriptome analysis identifies key metabolic changes in the brain of *Takifugu rubripes* in response to chronic hypoxia[J]. *Genes*, 2022, 13(8): 1347.
- [73] DOMENICI P, SILVANA FERRARI R, STEFFENSEN J F, et al. The effect of progressive hypoxia on school structure and dynamics in Atlantic herring *Clupea harengus*[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 2002, 269(1505): 2103-2111.
- [74] NGUYEN M V, PHAM L P, JORDAL A E O, et al. Elevated sea temperature combined with dietary methionine levels affect feed intake and appetite-related neuropeptide expression in the brains of juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1183967.
- [75] BAMBER S D, WESTERLUND S. Behavioral responses of *Arctica islandica* (Bivalvia: Arcticidae) to simulated leakages of carbon dioxide from sub-sea geological storage[J]. *Aquatic Toxicology*, 2016, 180: 295-305.
- [76] 陈松林, 徐文腾, 卢昇, 等. 水产育种生物技术发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(4): 214-226.
CHEN Songlin, XIU Wenteng, LU Sheng, et al. Development strategy for aquatic breeding biotechnology[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(4): 214-226.
- [77] ZHANG C L, SONG B B, SHAN J J, et al. Design and optimization of a new tube aeration device[J]. *Aquaculture International*, 2020, 28(3): 985-999.
- [78] VO T T E, KO H, HUH J H, et al. Overview of solar energy for aquaculture: the potential and future trends[J]. *Energies*, 2021, 14(21): 1-15.
- [79] ARABELLI R, BERNATIN T. Water quality monitoring and controlling systems for aquaculture[C]//*Proceedings of the 4th International Conference on Data Science, Machine Learning and Applications*, December 26-27, 2023, Hyderabad India. Singapore: Springer, c2023: 57-67.
- [80] EL-SHAFEIY E, ALSABAAN M, IBRAHEM M I, et al. Real-time anomaly detection for water quality sensor monitoring based on multivariate deep learning technique[J]. *Sensors*, 2023, 23(20): 1-15.
- [81] 孙景春, 刘石林, 林承刚, 等. 一种刺参安全度夏的池塘养殖系统及养殖方法: 202411353512.6[P]. 2024-11-15.
- [82] YU J K, YAN T J, KONG H. Exploring the management mode for breeding new species suitable for deep sea mariculture in China: best practices, challenges, and prospects[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2025, 261: 1-12.
- [83] YU L X B, REN A Q, HAN F F, et al. Optimization analysis of yellowtail kingfish (*Seriola aureovittata*) land-sea relay farming based on life cycle environment and cost assessment in Dalian, China[J]. *Sustainability*, 2024, 16(15): 1-15.
- [84] KAMLESHBHAI B P, IQBAL G, BAMBHANIYA I. Integrated multi-trophic aquaculture system (IMTA)[J]. *Traditional & recent aquaculture practices*. AkiNik Publications, 2023: 109-125.
- [85] LOAYZA-AGUILAR R E, HUAMANCONDOR-PAZ Y P, SALDAÑA-ROJAS G B, et al. Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA): strategic model for sustainable mariculture in Samanco Bay, Peru[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1-12.
- [86] HUGHES C, KING J W. Habitat suitability modelling for an integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) system along Europe's Atlantic coast[J]. *Ecological Modelling*, 2023, 484: 1-15.
- [87] CHATZIVASILEIOU D, DIMITRIOU P D, THEODOROU J, et al. An IMTA in Greece: co-culture of fish, bivalves, and holothurians[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(6): 1-15.
- [88] FANG J G, ZHANG J, XIAO T, et al. Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in Sanggou Bay, China[J]. *Aquaculture Environment Interactions*, 2016, 8: 201-205.
- [89] CHIU M C, YAN W M, BHAT S A, et al. Development of smart aquaculture farm management system using IoT and AI-based surrogate models[J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2022, 9: 1-12.
- [90] HOSSAIN A, SENFF P, GLASER M. Lessons for coastal applications of IMTA as a way towards sustainable development: a review[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(23): 1-15.

Coping strategies of aquatic animals in response to environmental stress

LI Meihui¹, KUANG Shaoping¹, HUO Da^{2, 3, 4, 5}

(1. Qingdao University of Science and Technology College of Environment and Safety Engineering, Qingdao 266042, China; 2. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266000, China; 3. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China; 4. State Key Laboratory of Breeding Biotechnology and Sustainable Aquaculture, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266000, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Jul. 14, 2025

Key words: global climate change; environmental stress; aquatic animal; adaptive strategy

Abstract: Climate change is profoundly reshaping aquatic ecosystems, driving unprecedented alterations in critical environmental factors, including temperature, pH, and dissolved oxygen levels. These shifts exert adverse effects on aquatic animals, hindering aquaculture development and causing significant economic losses and ecological imbalances. According to the IPCC Sixth Assessment Report, global surface temperature has risen by approximately 1.1 °C since the Industrial Revolution. Specifically, from 2011 to 2020, the mean sea surface temperature exceeded the 1850–1900 average by 0.88 °C. Concurrently, the surface ocean pH decreased from 8.32 to 8.1, dissolved oxygen in the open ocean decreased by 1%–2%, and hypoxia in coastal dead zones intensified. The synergistic fluctuations of these environmental parameters impose compound stress on aquatic animals, impairing physiological functions, growth, development, and reproductive processes. Consequently, these stressors drive shifts in population size and distribution, disrupting marine carbon, nitrogen, and phosphorus cycles and destabilizing the equilibrium of marine ecosystems. While aquatic animals can mitigate mild stressors through physiological, molecular, and behavioral adjustments, their capacity for self-regulation is limited. Intrinsic responses alone are insufficient to offset the cumulative damage from the long-term, complex compound stressors associated with climate change. To address these challenges, researchers have proposed various intervention strategies, including the cultivation of stress-resistant strains, deployment of novel equipment and operational modes, and utilization of artificial intelligence, to enhance the resilience of aquatic animals and mitigate the negative impacts of climate change. Although these approaches have demonstrated effectiveness in practical applications, challenges regarding scalability persist. Future efforts must focus on developing novel platforms, establishing emerging aquaculture models, and integrating advanced technologies to further bolster aquaculture resilience. Additionally, the implementation of graded early warning systems for environmental stress will improve risk prevention and control capabilities. This paper reviews the impacts of climate change on aquatic animals and evaluates current coping strategies, providing a scientific basis and practical guidance for the sustainable development of the aquaculture industry.

(本文编辑: 杨 悦)