

DOI: 10.12264/JFSC2021-0376

仿刺参池塘养殖对极端高温的敏感性评估与预测

张宇洋¹, 于双恩¹, 廖明玲¹, 董云伟^{1, 2}

1. 中国海洋大学水产学院, 海水养殖教育部重点实验室, 山东 青岛 266000;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266071

摘要: 夏季极端高温是制约我国仿刺参(*Apostichopus japonicus*)池塘养殖发展的关键环境因素。本研究基于文献拟合了北方养殖区仿刺参存活率与水温的关系, 确定了仿刺参半致死温度; 收集了 1980—2020 年夏季每小时气温数据, 分析了仿刺参养殖区域极端高温的时空特征和仿刺参池塘养殖受灾频次; 根据受灾频次判定了仿刺参池塘养殖敏感区, 最终预测了 2046—2050 年 3 种 CMIP5 典型浓度路径(RCP)情景模式(RCP2.6、RCP6.0 和 RCP8.5)下仿刺参养殖高温敏感性。结果显示, 仿刺参半致死温度(LT₅₀), 即致灾温度, 为(31.7±0.15) °C; 中国北方沿海区域是气候变暖的显著响应区, 2011—2020 年中国北方沿海区域平均温度和最高温度分别以 1.27 °C/10 a 和 2.15 °C/10 a 的速率上升, 导致北方仿刺参养殖区普遍遭遇致灾温度, 其中渤海西南海域受灾频次最高; 在 3 种 RCP 情境下, 渤海大部分海湾仿刺参池塘养殖风险加大。结论认为, 仿刺参产业发展需因地制宜制定科学空间发展规划, 建立基于高温预警预报系统的应对策略, 保障产业可持续发展。

关键词: 仿刺参; 池塘养殖; 致灾温度; 极端高温; 养殖敏感区

中图分类号: S961

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)03-0408-13

气候变化在全球范围内导致了更为频繁、更加强烈的极端高温事件, 严重威胁到人类健康和社会经济的可持续发展^[1-2]。研究显示, 部分区域极端高温事件常态化, 这会加剧气候变暖的不利影响, 对所在区域的生态、经济和社会发展产生深远且不可逆的影响^[3-4]。

中国是全球气候变化的敏感区和影响显著区^[5]。近 40 年来, 我国沿海海表温度(SST)以每年 0.016 °C 的速率上升, 高于全球平均和我国的历史变化水平^[6]。气候变化对我国海洋环境和生态系统的影响不断加重^[7]。由于生物存在特定温度耐受范围, 超过其温度耐受上限会发生高温致死现象, 因而极端高温事件会对食物生产造成剧烈影响, 例如 2003 年我国长江流域的持续高温天气致使作物大幅减产, 经济损失近百亿元^[8]。2018 年辽宁海域极端高温天气致使仿刺参(*Apostichopus*

japonicus)大批量死亡^[9], 严重影响了养殖产业的发展。Handisyde 等^[10]量化了气候变化对全球范围内水产养殖行业的影响, 发现中国的水产养殖行业极易受到气候变化的影响。吴小影等^[11]调查了气候变化对福建典型渔区的影响, 发现大多数受访渔户对气候变化及其影响感知较为强烈, 夏季高温致使其经济受损。由此可见, 极端高温等自然灾害严重掣肘了我国沿海地区水产养殖业的可持续发展。

仿刺参是我国北方的重要水产养殖对象, 除部分仿刺参在福建过冬养殖外, 其养殖区域主要集中在辽宁、山东和河北。仿刺参作为典型的温带种类, 对高温敏感, 当水温超过其温度耐受上限时, 会造成一系列复杂的生理反应, 引发其高温致死现象^[12]。目前, 池塘养殖是我国的仿刺参增养殖的重要模式^[13]。由于池塘养殖水域较浅,

收稿日期: 2021-08-11; 修订日期: 2021-11-01.

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2019YFD0900402); 国家杰出青年科学基金项目(42025604).

作者简介: 张宇洋(1996-), 男, 博士研究生, 研究方向为养殖生态学. E-mail: zhangyuyang2146@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 董云伟, 教授, 研究方向为海洋生物生理生态学. E-mail: dongyw@ouc.edu.cn

其水温与当地气温息息相关, 因此仿刺参池塘养殖极易受到极端高温事件的影响。近些年来极端高温事件频发导致仿刺参池塘养殖损失惨重。为准确评估极端高温的影响, 国内外研究目前多聚焦于温度驯化^[14-15]、苗种培育^[16-17]等方面, 极端高温事件下养殖区的敏感性评估尚未见报道。基于此, 本研究以 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 分辨率网格尺度评估了 2011—2020 年不同仿刺参池塘养殖区对极端高温的敏感性, 并结合未来气候数据预测了仿刺参养殖区的适宜性, 以期为仿刺参池塘养殖防灾减灾措施和政策制定提供科学依据, 为仿刺参养殖业的空间规划和产业发展提供合理的建议。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 仿刺参生理和养殖产量数据 本研究分别采用“刺参 or 仿刺参 and 温度”(中文关键词)和“*Apostichopus japonicus* or sea cucumber and temperature”(英文关键词)组合成的检索式, 在中国知网和 Web of Science 数据库中进行高级检索。基于以下标准确定样本文献: (1) 研究对象为仿刺参; (2) 试验处理须包含至少 3 组温度处理组, 且实验期间水温恒定; (3) 仿刺参存活率与水温关系能够直接从图、表或文字中进行提取, 或者直接可以从文献中通过计算获得; (4) 目前仿刺参养殖主产区为辽宁、河北和山东^[18], 将海州湾平山岛以北的中国地区定义为仿刺参的北方养殖区, 以此限定范围。经过广泛搜索及筛选, 本研究最终选取了 15 篇文献纳入计算(附表 1)。利用 WebPlot Digitize 软件(<https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>)提取图像上的各实验水温下仿刺参的存活率, 补充相关数据。

2010—2021 年全国海参养殖面积以及总产量均源自 2011—2021 年《渔业统计年鉴》^[13]。

1.1.2 仿刺参养殖环境数据 本研究从美国国家大气研究中心(NCAR, <https://rda.ucar.edu/>)下载了中国离地 2 m 的连续 41 年逐小时气温数据, 并提取中国北方近海区域气温用于模拟仿刺参池塘养殖温度, 其中 1980—2010 年(ds093.1)数据分辨率为 $0.312^{\circ} \times 0.312^{\circ}$, 2011—2020 年(ds094.1)数据分

辨率为 $0.205^{\circ} \times 0.204^{\circ}$ 。

为了评估未来气候, IPCC 第五份评估报告采用了 4 种 CMIP5 典型浓度路径情景模式(<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/>), 路径浓度由低至高分别为 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5。其中 RCP2.6 代表温室效应衰退的情况, 表示在 21 世纪末完全消除人为的二氧化碳排放, 温室气体排放显著减少。RCP4.5 和 RCP6.0 是在政府干预下的情景模型, 代表温室效应长期稳定, 意味着适度的化石燃料消耗和二氧化碳排放降低到一个较低的水平。RCP8.5 是在无气候变化政策干预时的基线情景, 代表温室效应的增强, 特点是温室气体排放和浓度不断增加。本研究下载了美国国家海洋和大气管理局(NOAA)地球流体动力学实验室(GFDL) 3 种典型浓度路径(RCP2.6、RCP6.0 和 RCP8.5)情景下的 2046—2050 年逐 3 小时气温数据, 用于预测中国北方未来仿刺参池塘养殖的风险区。

1.2 分析方法

1.2.1 仿刺参存活率与水温的生理曲线拟合 基于文献检索和筛选结果, 利用 R 语言 drc 包^[19]的三参数逻辑斯谛模型^[20](three parameter logistic model)拟合仿刺参存活率与水温的生理响应曲线。利用该包的 drm 函数推算仿刺参各存活率下对应的水温(附表 2)。

1.2.2 北方仿刺参养殖区极端高温发生时空特征分析 将不同分辨率的环境气温数据统一为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 经纬度网格尺度。基于中国沿海仿刺参池塘养殖区域内 1980—2020 年 7—8 月逐年最高小时气温和平均小时气温, 利用一般线性模型分别进行拟合, 分别用于分析仿刺参池塘养殖区最高气温和平均气温变化趋势。上述分析均由 R 语言中的 ncdf4 和 ggplot2 实现。

目前气候研究多采用阈值法定义极端温度, 超过阈值即可认定为是极端事件。目前极端高温事件被认为是一种小概率事件, 因此多从出现概率的角度进行定义, 一般取累积频率超过 90%或 95%时的阈值作为极端高温事件划分的标准^[21]。本研究为了突出小概率事件特征, 将 2011—2020 年各网格点 7—8 月第 99 百分位高温值(T_{99})定义为各年份每个格点的极端高温阈值[依据仿刺参

的存活曲线确定,即当气温超过一定值,会使得当地仿刺参产业减产的温度],用以表征各区域近年来极端高温的强度变化。

1.2.3 北方仿刺参养殖区域的受灾频次时空分布分析 仿刺参 50%存活率下对应的水温(LT_{50})约为 $31.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此本研究将此温度定义为仿刺参池塘养殖的致灾温度。将 2011—2020 年各格点气温 $\geq 31.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的频次定义为受灾频次,用以表征极端高温事件下中国沿海仿刺参池塘养殖区域受灾情况,将历年受灾频次高于 50 的养殖区域定义为高温敏感区,受灾频次为 0 的养殖区域定义为低敏感区。各年份受灾频次的累加用于表征不同年份总受灾情况。

1.2.4 基于未来环境预测值对仿刺参高温热害风险区识别定级 计算 RCP2.6、RCP6.0 和 RCP8.5 不同情景下 2046—2050 年 7—8 月的 T_{99} ,作为未来中国沿海仿刺参池塘养殖区所遭受的极端高

温。根据仿刺参高温生理响应曲线得到各存活率对应的温度值(附表 2),预测仿刺参在不同水温下的死亡率,根据仿刺参死亡率对不同养殖区域进行分级,划分出未来情境下仿刺参池塘养殖风险区,将死亡率低于 20% 的养殖区域定义为低风险区,死亡率介于 20% 与 60% 的养殖区域定义为中风险区,死亡率高于 60% 的养殖区域定义为高风险区。

2 结果与分析

2.1 全国仿刺参养殖产业现状

2010—2020 年全国仿刺参养殖总产量由 13.03 万 t 跃升到 19.66 万 t (图 1),呈现波动上升的趋势,其中 2017 年仿刺参总产量达到 21.99 万 t,为历史最高。2018 年仿刺参总产量大幅度下跌。2010—2020 年全国仿刺参养殖面积呈稳定上升趋势,2020 年仿刺参养殖总面积是 2010 年的 1.6 倍,养殖总面积增加了 9.3 万 hm^2 。

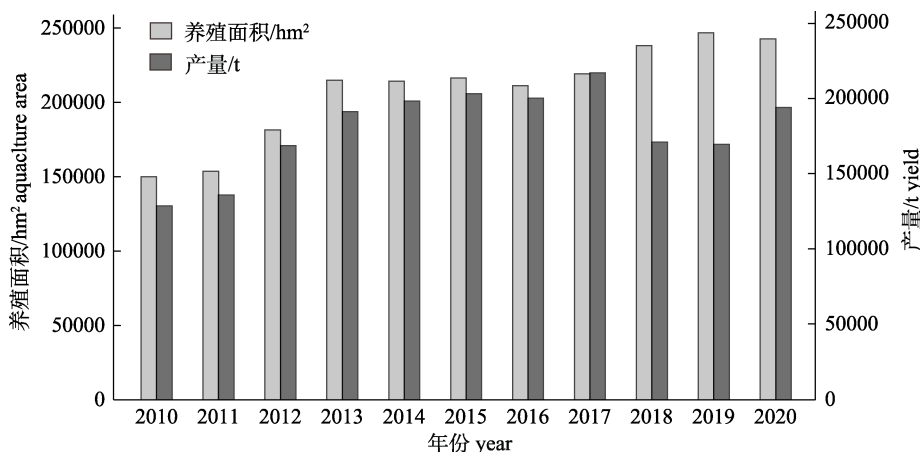


图 1 2010—2021 年全国海参养殖面积和产量

数据源自《渔业统计年鉴》(2011—2021)。

Fig. 1 Aquaculture area and yield of sea cucumber from 2010 to 2021 in China
Data from China Fishery Statistical Yearbook (2011—2021).

2.2 北方海域仿刺参的存活曲线

随着水温升高,仿刺参存活率逐渐降低(图 2)。15~30 $^{\circ}\text{C}$ 时仿刺参存活率较为稳定,当水温超过 30 $^{\circ}\text{C}$ 时仿刺参死亡率骤增。三参数逻辑斯谛模型拟合结果表明,仿刺参半致死温度(LT_{50})为 $(31.7 \pm 0.15)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.3 1980—2020 年极端高温的时空变化

1980—2020 年中国北方沿海仿刺参养殖区域

7—8 月气温整体呈上升趋势(图 3),各年份平均气温与最高气温的变动具有一致性,夏季仿刺参养殖区最高气温普遍高出平均气温(6.5 ± 0.6) $^{\circ}\text{C}$ 。1980—2020 年平均气温上升速率为 0.17 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,最高气温的上升速率为 0.11 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。1980—2020 年期间在中国仿刺参池塘养殖区域有 10 年最高气温超过仿刺参致灾温度($31.7\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

2011—2020 年中国北方沿海区域平均气温

(1.27 °C/10 a)和最高气温(2.15 °C/10 a)上升明显, 2017—2019年气温连续3年居于高位, 2017年中国沿海区域平均气温为11年以来最高, 2018年次之。2018年中国仿刺参养殖区最高气温为11年以来最高, 超过了32 °C。

2011—2020年各区域极端高温阈值(T_{99})在各区域均呈现波动上升趋势(图4)。2011年大多数区域 T_{99} 处于25 °C范围内, 2013年 T_{99} 涨幅明显, 山东、河北大多数地区趋近30 °C。此后各年份呈现波动增长, 2018年极端高温阈值为历年最高, 山东、河北、辽宁部分区域极端高温阈值甚至高于35 °C。

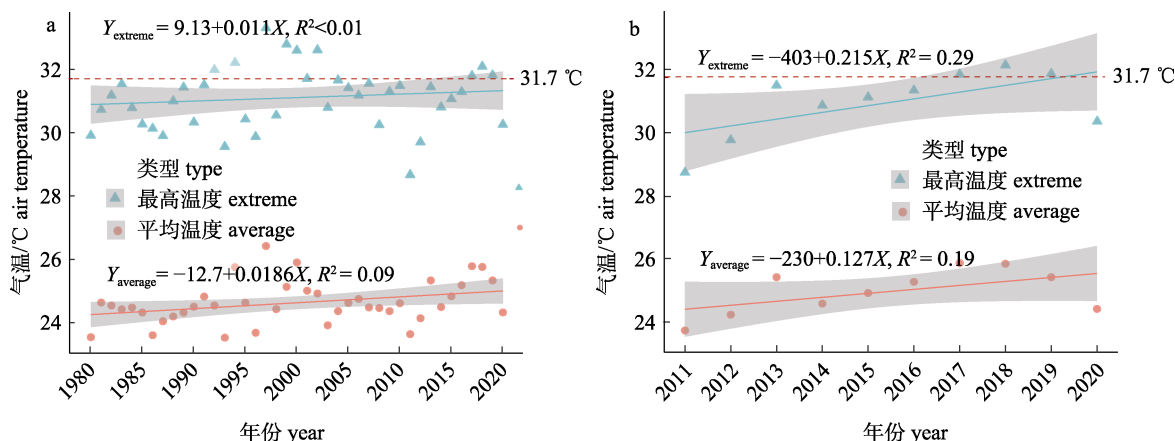


图3 1980—2020年(a)和2011—2020年(b)中国北方仿刺参养殖区7—8月平均气温和最高气温变化趋势

Fig. 3 Average air temperature and extreme air temperature of sea cucumber pond-culture areas in northern China from July to August in 1980—2020 (a) and 2011—2020 (b)

极端高温阈值呈现空间异质性, 渤海沿岸极端高温普遍高于其他区域, 其中山东滨州、东营、潍坊, 河北, 天津等地极端高温事件的强度较大, 且具有时间连续性。

2.4 仿刺参养殖区高温灾害的时空分布

2011—2020年北方仿刺参养殖区域普遍遭遇致灾温度(31.7 °C)的侵袭, 2011—2018年中国北方沿海仿刺参养殖区域在7—8月的总受灾频次呈现上升趋势, 2019—2020年略有下降(图5)。

仿刺参养殖池塘高温致灾呈现高度空间异质性, 渤海西南海域受灾频次最高, 其中山东潍坊及东营部分地区为历史重灾区, 天津, 河北唐山、沧州, 辽宁锦州、盘锦等部分沿海区域次之(图6)。2011年有10%的仿刺参养殖地遭遇致灾温度;

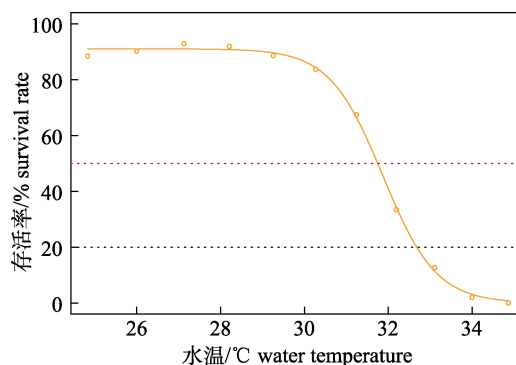


图2 仿刺参存活率与水温关系
数据源自附表1。

Fig. 2 The relationship between water temperature and survival rate of *Apostichopus japonicus*
Data from appendix 1.

2018年40%以上区域遭遇致灾温度; 2020年约20%的地区遭遇致灾温度。

2.5 未来养殖敏感区

依据仿刺参存活率与水温的关系(附表2), 预测了2046—2050年3种RCP模式下(RCP2.6、RCP6.0和RCP8.5)的北方仿刺参养殖高温敏感区(图7)。在RCP2.6模式下, 未来北方大部分沿海区域极端高温阈值(T_{99})超过30 °C, 其中辽宁盘锦、锦州以及山东日照等沿海区域仿刺参死亡率为80%~100%(依据附表2确定, 基于三重逻辑斯蒂拟合, 当气温超过32.6 °C时, 认定仿刺参池塘的死亡率高于80%), 将成为仿刺参池塘养殖高风险区; 河北沧州、山东滨州、东营和潍坊等沿海区域为养殖中风险区, 仿刺参死亡率为40%~60%。

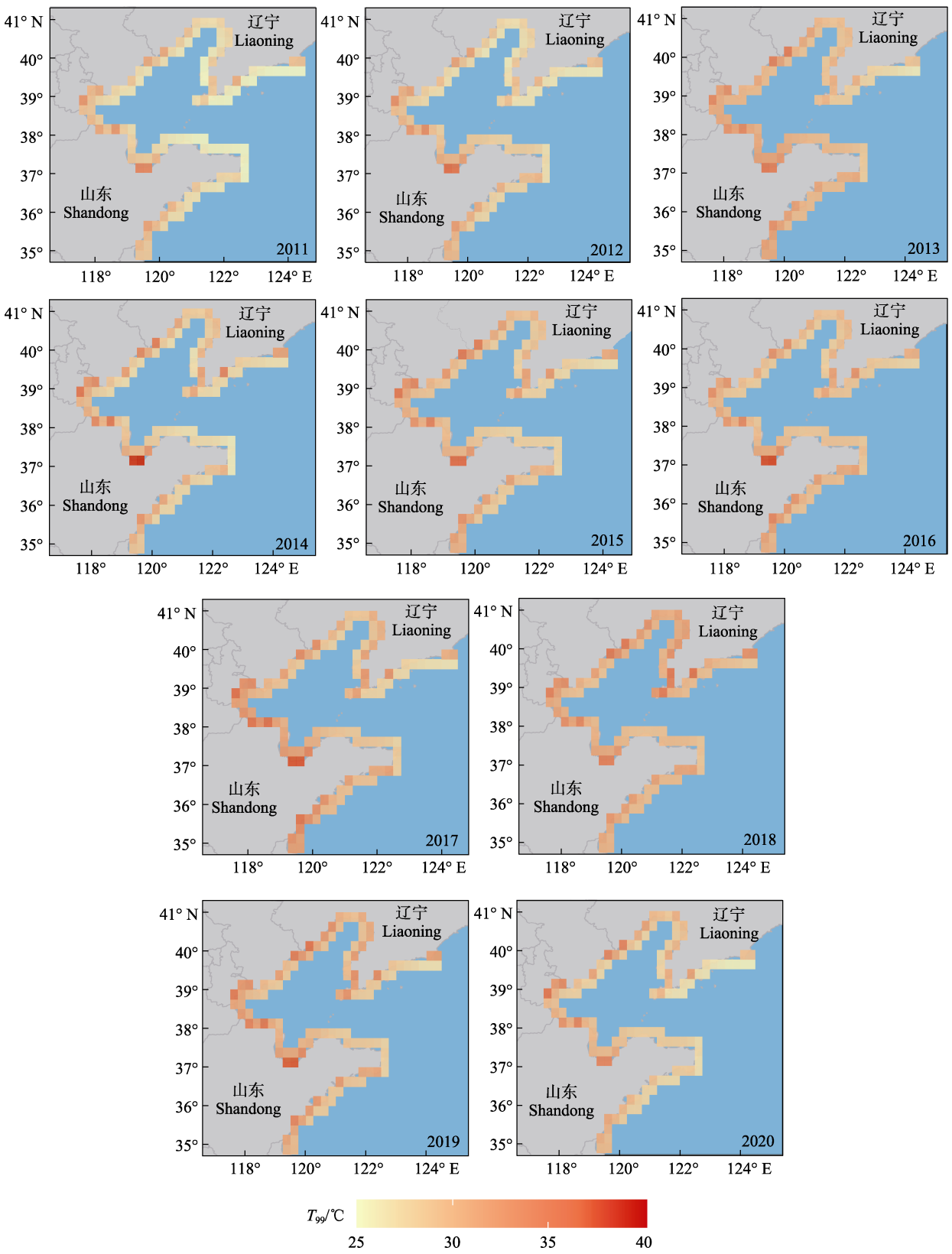


图 4 2011–2020 年 7–8 月北方仿刺参池塘养殖区极端高温阈值(T_{99})时空变化
Fig. 4 The spatial-temporal pattern of extreme high-temperature (T_{99}) of sea cucumber pond-culture areas in northern China from July to August in 2011–2020

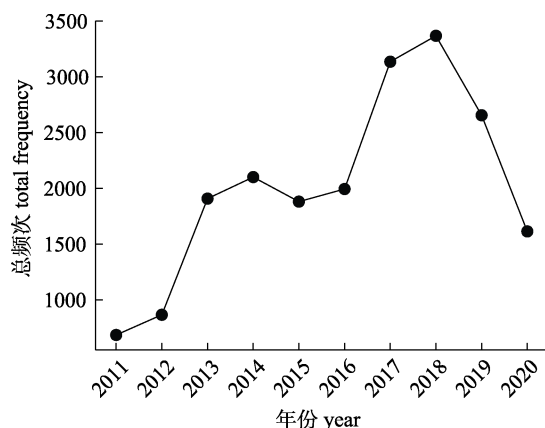


图5 2011—2020年7—8月中国北方仿刺参池塘养殖估算总受灾频次

Fig. 5 The estimated total disaster-causing frequency of sea cucumber pond-culture in northern China from July to August in 2011–2020

在 RCP6.0 模式下,随着温室气体的持续排放,大部分海域 T_{99} 继续升高,进一步加剧了北方仿刺参养殖产业的高温敏感性。养殖风险区范围和受损程度进一步增加,河北沧州,山东滨州、东营、潍坊和日照等沿海区域晋升为养殖高风险区;天津,辽宁盘锦、锦州,山东烟台、威海等区域将成为养殖中风险区。

在 RCP8.5 模式下,大部分海域 T_{99} 继续升高,部分沿海区域 T_{99} 甚至高达 40°C 。仿刺参养殖产业的高温敏感区范围进一步扩张,河北,天津,辽宁盘锦、锦州,山东滨州、东营、潍坊、日照等区域为养殖高风险区;山东烟台、威海等区域将成为养殖中风险区。

3 讨论

3.1 仿刺参池塘养殖高温敏感性

全球变暖所带来的高温已成为中国北方仿刺参养殖重要的环境胁迫因子。1980—2020 年中国北方沿海区域 7—8 月平均气温升温速率显著高于全球平均气温变化($0.11^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)^[22]和我国南方地区^[23],成为气候变暖的显著响应区。世界气象组织(WMO)报告^[24]显示,2011—2020 年是全球有记录以来最暖的 10 年,中国北方沿海区域 7—8 月平均气温和最高气温也分别以 $1.27^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $2.15^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的速率迅速上升,高于第六次 IPCC 评估报告中 2011—2020 年全球平均升温速率

($1.09^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)^[25]。Sévellec 等^[26]基于模型预测指出 2018—2022 年海洋热浪事件发生的概率将增加 400%,我国海区海洋热浪事件频发。因此解析气候变化对仿刺参养殖的影响成为积极应对极端高温等灾害事件的基础。

2011—2020 年仿刺参池塘养殖业的受灾面积和受灾频次逐年累加。本研究表明,2011 年仿刺参池塘养殖业的高温敏感区为山东潍坊、东营以及天津等区域;2013 年为山东烟台、潍坊、东营、日照以及河北大部分沿海区域;2018 年极端高温现象波及四个省份,涵盖山东、河北、天津以及辽宁的大部分沿海区域,且总体受灾频次最高。根据新闻和文献报道,仿刺参受灾区域在 2013 年主要为山东以及辽宁部分地区,其中山东黄河三角洲受灾最为严重^[27];2016 年为山东、河北、辽宁的局部区域^[28];2018 年整个北方养殖区大面积受灾,辽宁、河北仿刺参池塘养殖业损失超 90%,山东仿刺参池塘养殖损失超过 70%^[29]。基于受灾频次推断的高温敏感区与现实受灾情况相契合,证明了本研究中养殖高温风险区评估方法的可靠性。

仿刺参池塘养殖未来将面临更强的高温胁迫,如不采取更积极有效的高温应对策略,适宜养殖区域将进一步缩小。在 RCP2.6 模式下,2046—2050 年辽东湾和莱州湾及山东日照区域仿刺参池塘养殖将因夏季高温的影响死亡率升高,在其他区域池塘养殖死亡率较低,可适当开展养殖。在 RCP6.0 和 RCP8.5 模式下,仿刺参的养殖风险区进一步扩张,现有仿刺参池塘养殖区域面临高温胁迫压力持续增加,渤海大多数海湾仿刺参池塘养殖风险加大。

综上所述,基于历史养殖区敏感性以及未来风险区的评估,辽宁锦州、盘锦,河北沧州,山东滨州、东营和潍坊以及天津部分沿海区域由于过去极易发生极端高温事件,池塘养殖仿刺参的风险较高,养殖模式转型可能更有利于当地仿刺参养殖业的发展。山东日照、辽宁大连局部区域历史上受到极端高温事件的侵扰,特别是自 2015 年以后,受灾频次逐年上升,当地仿刺参池塘养殖业应当进一步提升风险防控意识和能力,及时应

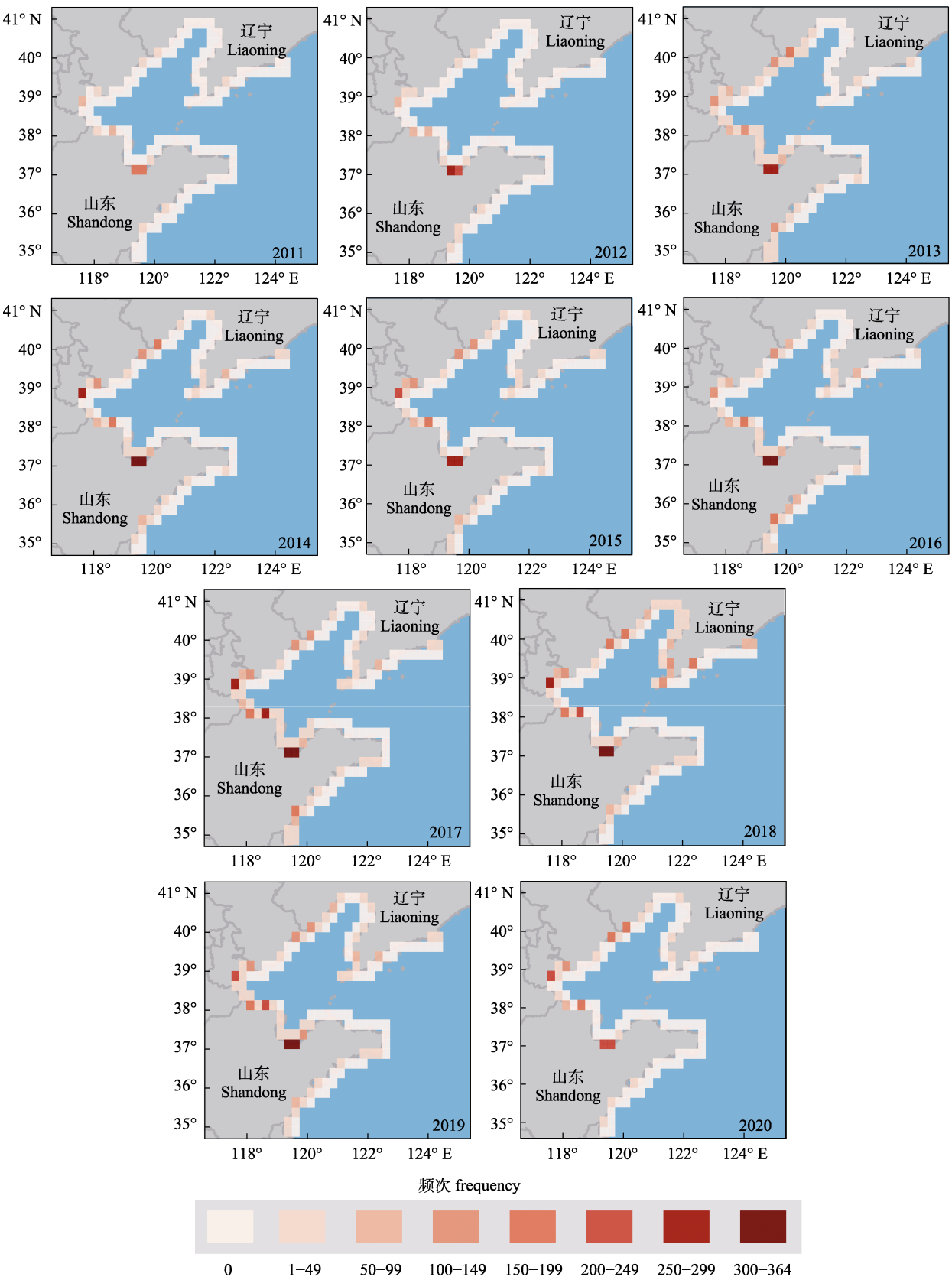


图 6 2011–2020 年 7–8 月中国北方仿刺参养殖估算受灾频次

Fig. 6 The estimated disaster-causing frequency of sea cucumber pond-culture in northern China from July to August in 2011–2020

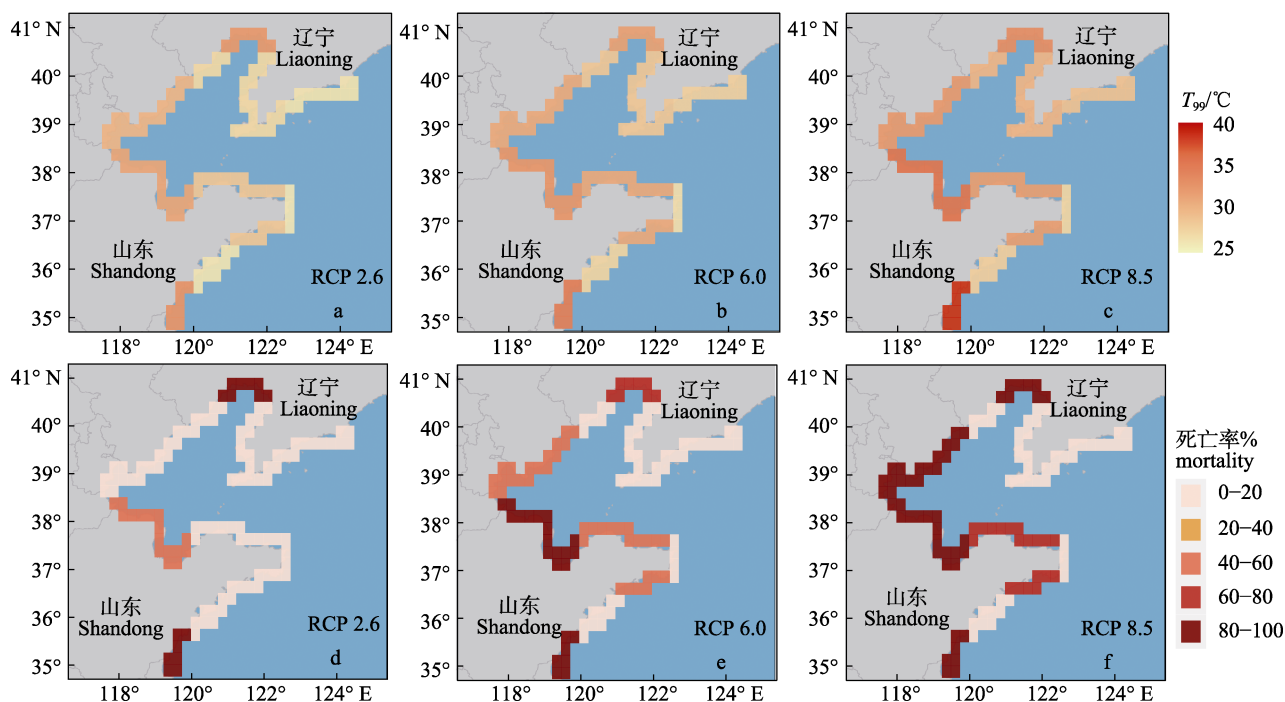


图7 2046–2050年RCP2.6、RCP6.0和RCP8.5模式下仿刺参养殖区第99百分位高温值(T_{99})(a, b, c)和预测死亡率(d, e, f)
Fig. 7 The 99th percentile high temperature value (T_{99})(a, b, c) and predicted mortality (d, e, f) of sea cucumber pond-culture areas under RCP2.6, RCP6.0 and RCP8.5 scenarios from 2046 to 2050

对极端高温突发事件,以达到防灾减灾的目标。而山东烟台(除莱州)、威海(除乳山)、青岛(除黄岛),辽宁丹东、庄河、营口等地较适宜仿刺参池塘养殖业的发展。因此,仿刺参产业发展需因地制宜,制定更为科学合理的养殖发展规划。

3.2 极端高温下仿刺参养殖业的应对措施

为应对极端高温对仿刺参池塘养殖的影响,应采取以预警预报为主、防治结合的应对策略。具体应对措施如下:(1) 加强高温预报体系建设,系统分析高温对仿刺参池塘养殖的影响,建立预警预报体系;适当增加巡池频率,观察池塘水色、水位和透明度的变化。定时检测池塘水温、溶解氧、pH、盐度等水质指标以及仿刺参的生理状态;(2) 加强养殖池塘标准化建设,提高养殖技术。完善海水井、增氧、遮阳等基础配套设施的建设,可用提高水位、勤换水、采用立体化附着基、降低水体透明度以及铺设增氧系统等措施达到降温的目的;(3) 夏季高温期间,仿刺参免疫力下降,抗病能力弱,经常发生病原生物感染。可通过使用底质改良剂、定期消毒等措施减少池塘内细菌含量,以减少高温期仿刺参的死亡;(4) 适当使用饲

料添加剂可提高仿刺参的特定生长率、免疫力和抗病力,如菊芋全粉^[30]、复合维生素制剂等^[31]均能够提高仿刺参的高温耐受能力,缓解高温对仿刺参的不利影响,提高存活率;(5) 目前仿刺参养殖的主要对象仍然是未经遗传改良的野生种,种质是我国仿刺参产业可持续发展的根本。经由高温选育和定向培育获得具有耐高温性状的群体,如“东科1号”等稳定的耐高温品系可为仿刺参产业抵御高温提供有力支持。

3.3 展望

本研究依据历史和未来气温数据评估了北方仿刺参池塘养殖对极端高温的敏感性,对仿刺参池塘养殖规划提出初步建议。在以后研究中应加强以下研究。

3.3.1 加强多环境因素整合分析 夏季极端高温仅是引发仿刺参大规模死亡的原因之一。以往研究表明,夏季仿刺参大面积死亡是水体环境、生物体、病原体以及人为因素叠加的结果^[32]。以2013、2016年仿刺参大规模死亡现象为例,极端高温天气下水体垂直循环受阻,导致温跃层、盐跃层及缺氧层出现,池塘底层水流交换受阻,水

温持续升高,溶氧降低,有害物质不断积累,致使仿刺参长时间处于高温、低氧等胁迫环境中。周晓梦等^[33]研究发现在高温(25.0 ± 0.5)℃低氧(1 mg/L)条件下,胁迫时长超过 33 h,会对仿刺参(规格 28.00~36.00 g)造成不可逆损伤,最终导致其死亡。因此后续研究中应结合多种环境因素综合评估北方沿海区域仿刺参养殖业的适宜性。

3.3.2 将养殖品系、养殖技术等差异纳入风险评估 大量研究表明驯化温度、养殖品系以及规格差异等均会影响仿刺参对温度的耐受性。如王青林^[34]研究发现在 22℃驯化下的仿刺参的半致死温度(31.8 ℃)要高于 12℃驯化下的半致死温度(30.9 ℃)。中国科学院海洋研究所选育的“东科 1 号”具有耐高温能力强、度夏成活率高的特性^[35]。这表明,仿刺参养殖品系、放养规格以及前期苗种驯化温度都会影响仿刺参的温度耐受性,而海水井抽取低温水降温、遮阳棚等养殖技术的改进也会增加高温期间仿刺参养殖的存活率。因此,根据本研究拟合的存活曲线所得到的仿刺参池塘养殖的致灾温度和致灾频次可能在各地存在差异。这也提醒我们,要开展更精确的仿刺参池塘养殖高温敏感性评估模型研究需要因地制宜,充分考虑当地养殖品系、养殖技术等因素,使研究结果更加切合实际,以更好地指导生产。

3.3.3 拟合气温与水温关系 尽管池塘水温变化幅度一般低于气温变化幅度^[36],但气温和池塘水温之间具有密切的联系。杨青青等^[37]分析了湖北潜江市虾稻共作地虾沟水温变化规律,发现水温随气温变化,当地夏季平均水温(29.8 ℃)高于平均气温(27.6 ℃)。周凯等^[38]也发现辽宁葫芦岛刺参养殖池塘夏季日平均水温较平均气温高 $2.68\sim 3.8$ ℃,气温越高,水温与气温之间的差异越小。本课题组统计了夏季 7—8 月海水养殖池塘逐小时实测水温(未发表数据)与对应时间气温数据(源自美国国家大气研究中心 NCAR, <https://rda.ucar.edu/>)的 Spearman 相关系数,发现水温与气温存在正相关性($r=0.33$, $P<0.01$)。因此基于夏季极端气温来分析养殖池塘仿刺参所受到的高温胁迫具有可行性。后续研究应当考虑本地情况,拟合气温与水温的关系以更好地反映实际生产情况。

3.3.4 发展构建中小尺度评估模型 由于对未来气候预测大多为全球或大尺度上的粗分辨率气候模式温度,无法反映中小尺度海水养殖区的气候波动情况,难以很好地反映养殖生物所处的生存条件。Falconer 等^[39]比较了挪威三文鱼产业实际养殖水温与未来预测温度的差异,发现如果直接使用粗分辨率气候模式温度,会严重错估温度等对三文鱼养殖产业的影响。在气候变暖极端高温事件加剧的背景下,构建精确的中小尺度预警评估模型可以避免养殖产业受损,为仿刺参养殖业的空间规划和产业发展提供合理的建议。

参考文献:

- [1] Lesk C, Rowhani P, Ramankutty N. Influence of extreme weather disasters on global crop production[J]. *Nature*, 2016, 529(7584): 84-87.
- [2] Carleton T A, Hsiang S M. Social and economic impacts of climate[J]. *Science*, 2016, 353(6304): 9837.
- [3] Zhang P, Jeong J H, Yoon J H, et al. Abrupt shift to hotter and drier climate over inner East Asia beyond the tipping point[J]. *Science*, 2020, 370(6520): 1095-1099.
- [4] Woolway R I, Jennings E, Shatwell T, et al. Lake heatwaves under climate change[J]. *Nature*, 2021, 589(7842): 402-407.
- [5] Bulletin of China Marine Disaster[R]. State Oceanic Administration, 2020: 3-8. [2020 年中国海洋灾害公报[R]. 国家海洋局, 2020: 3-8.]
- [6] Qi Q H, Cai R S, Yan X H. Discussion on climate change and marine disaster risk governance in the coastal China seas[J]. *Marine Science Bulletin*, 2019, 38(4): 361-367. [齐庆华, 蔡榕硕, 颜秀花. 气候变化与我国海洋灾害风险治理探讨[J]. *海洋通报*, 2019, 38(4): 361-367.]
- [7] Third Country Assessment Report on Climate Change[R]. Beijing: Science Press, 2015: 3-6. [第三次气候变化国家评估报告[R]. 北京: 科学出版社, 2015: 3-6.]
- [8] Tian X H, Luo H W, Zhou H D, et al. Research on heat stress of rice in China: Progress and prospect[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(22): 166-168. [田小海, 罗海伟, 周恒多, 等. 中国水稻热害研究历史、进展与展望[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(22): 166-168.]
- [9] Wang Z J, Wei G S, Dong M Y, et al. Effects of high temperature on sea cucumber culture and countermeasures[J]. *South China Agriculture*, 2018, 12(36): 106-107. [王忠菊, 卫广松, 董美艳, 等. 高温天气对海参养殖业的影响及其应对措施[J]. *南方农业*, 2018, 12(36): 106-107.]
- [10] Handisyde N, Telfer T C, Ross L G. Vulnerability of aqua-

- culture-related livelihoods to changing climate at the global scale[J]. *Fish and Fisheries*, 2017, 18(3): 466-488.
- [11] Wu X Y, Liu G Q, Qi X, et al. Ecological effects of climate change and livelihood adaptations in typical fishing areas: Perceptions of fishermen's households[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1): 313-320. [吴小影, 刘冠秋, 齐熙, 等. 气候变化对渔区感知指数、生计策略和生态效应的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(1): 313-320.]
- [12] Chang Y Q, Sui X L, Li J. The Current situation, problem and prospect on the *Apostichopus japonicus* aquaculture[J]. *Fisheries Science*, 2006, 25(4): 198-201. [常亚青, 隋锡林, 李俊. 刺参增养殖业现状、存在问题与展望[J]. *水产科学*, 2006, 25(4): 198-201.]
- [13] China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press. [中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社.]
- [14] Tang X M, Yang S G, Gu Z F. Intermediate seed rearing and adult culture of the sea cucumber *Apostichopus japonicus* in Hainan[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2017, 36(1): 183-189. [唐贤明, 杨守国, 顾志峰. 仿刺参在海南地区的苗种培育与养成[J]. *基因组学与应用生物学*, 2017, 36(1): 183-189.]
- [15] Wang Q L, Yu S S, Dong Y W. Parental effect of long acclimatization on thermal tolerance of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(11): e0143372.
- [16] Liu S L, Ru X S, Xu Q Z, et al. Effects of high-temperature stress on several immune enzyme activities of *Apostichopus japonicus* thermotolerant and normal species[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(2): 344-351. [刘石林, 茹小尚, 徐勤增, 等. 高温胁迫对刺参耐高温群体和普通群体主要免疫酶活力的影响[J]. *中国水产科学*, 2016, 23(2): 344-351.]
- [17] Zhao H, Liu S L, Yang H S, et al. The study on thermo tolerance of juvenile offspring *Apostichopus japonicus* (Selenka) with directive breeding[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(9): 1-6. [赵欢, 刘石林, 杨红生, 等. 刺参高温定向选育群体子一代耐温性状的分析[J]. *海洋科学*, 2014, 38(9): 1-6.]
- [18] Jiang S H, Ren Y C, Tang B P, et al. Development status and countermeasures of *Apostichopus japonicus* culture industry in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(9): 15-23. [姜森颖, 任贻超, 唐伯平, 等. 我国刺参养殖产业发展现状与对策研究[J]. *中国农业科技导报*, 2017, 19(9): 15-23.]
- [19] Ritz C, Baty F, Streibig J C, et al. Dose-response analysis using R[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(12): e0146021.
- [20] Van Heerwaarden B, Sgrò C M. Male fertility thermal limits predict vulnerability to climate warming[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 2214.
- [21] Li J, Ren G Y, Zhan Y J. Discussion on threshold determination in defining extreme temperature indices[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2013, 3(5): 36-40. [李娇, 任国玉, 战云健. 浅谈极端气温事件研究中阈值确定方法[J]. *气象科技进展*, 2013, 3(5): 36-40.]
- [22] Zhang Y, Yan K, Liu Z, et al. Analysis of spatio-temporal variation characteristics of global surface air temperature from 1901 to 2018 based on CRU data[J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, 41(6): 51-58. [张寅, 闫凯, 刘钊, 等. 基于 CRU 数据的 1901—2018 年全球陆表气温时空变化特征分析[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(6): 51-58.]
- [23] Gao Y B, Lu C Y, Zhong L X, et al. Temporal and spatial characteristics of temperature and precipitation in China's coastal areas from 1951 to 2016[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2019, 39(5): 530-539. [高弋斌, 路春燕, 钟连秀, 等. 1951—2016 年中国沿海地区气温与降水量的时空特征[J]. *森林与环境学报*, 2019, 39(5): 530-539.]
- [24] Kennedy J, Blunden J, Alvar-Beltrán J, et al. State of the Global Climate 2020[M]. World Meteorological Organisation, 2021.
- [25] Change Intergovernmental Panel on Climate. Sea level change [M]//Climate Change 2013-The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1137-1216.
- [26] Sévellec F, Drijfhout S S. A novel probabilistic forecast system predicting anomalously warm 2018-2022 reinforcing the long-term global warming trend[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3024.
- [27] Hu W, Li C L, Han S, et al. Effects of abnormal climate and environment on sea cucumber aquaculture industry and its countermeasures[J]. *Marine Sciences*, 2018, 42(2): 159-166. [胡炜, 李成林, 韩莎, 等. 异常气候和环境对刺参养殖业的影响及应对策略[J]. *海洋科学*, 2018, 42(2): 159-166.]
- [28] Wang J L. Summary report of sea cucumber market in 2016[J]. *Contemporary Aquaculture*, 2017, 42(1): 36-38. [王金龙. 2016 年海参市场总结报告[J]. *当代水产*, 2017, 42(1): 36-38.]
- [29] Liao M J, Wang Y G, Li B, et al. Discussion on current situation, existing problems and countermeasures of sea cucumber aquaculture industry in China (Middle)[J]. *Scientific Fish Farming*, 2021(3): 26-27. [廖梅杰, 王印庚, 李彬, 等. 我国海参养殖产业现状、存在问题及对策探讨(中)[J]. *科学养鱼*, 2021(3): 26-27.]
- [30] Zhu X Z, Meng X Y, Jia C C, et al. Effects of Jerusalem artichoke powder on the immunity and digestive function of *Apostichopus japonicus* under high temperature stress[J]. *China Feed*, 2020(11): 77-83. [朱晓振, 孟现尧, 贾晨晨,

- 等. 菊芋全粉对高温胁迫下仿刺参免疫及消化功能的影响[J]. 中国饲料, 2020(11): 77-83.]
- [31] Wang Q L, Dong Y W. Preliminary study on the domestication of adult *Apostichopus japonicus* in southern China and the heat tolerance of its progeny[C]. China Association for Science and Technology: Chinese Fisheries Society, 2013: 1. [王青林, 董云伟. 成体刺参南方驯化以及繁育后代耐热性的初步研究[C]. 中国科学技术协会: 中国水产学会, 2013: 1.]
- [32] Hu D, Liu S L, Yang H S. Analysis of causes and corresponding strategies for summer massive mortalities of sea cucumber[J]. Studia Marina Sinica, 2017: 47-58. [霍达, 刘石林, 杨红生. 夏季养殖刺参(*Apostichopus japonicus*)大面积死亡的原因分析与应对措施[J]. 海洋科学集刊, 2017: 47-58.]
- [33] Zhou X M, Zhang X M, Li W T. Effect of high temperature and hypoxia on Median lethal time and physiological function in sea cucumber *Apostichopus japonicus* of two sizes[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(1): 60-73. [周晓梦, 张秀梅, 李文涛. 高温和低氧胁迫对两种规格刺参半致死时间及生理机能的影响[J]. 中国水产科学, 2018, 25(1): 60-73.]
- [34] Wang Q L. Effects of temperature acclimation on growth and thermotolerance of sea cucumber, *Apostichopus japonicus* Selenka[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. [王青林. 温度驯化对刺参(*Apostichopus japonicus*)生长及耐热性的影响及生理生态学机制[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.]
- [35] Yang H S, Sun J C, Ru X S, et al. Current advances and technological prospects of the sea cucumber seed industry in China[J]. Marine Sciences, 2020, 44(7): 2-9. [杨红生, 孙景春, 茹小尚, 等. 我国刺参种业态势分析与技术创新展望[J]. 海洋科学, 2020, 44(7): 2-9.]
- [36] Kutty M N. Site Selection For Aquaculture: Physical Features of Water[M]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1987.
- [37] Yang Q Q, Zeng Y, Deng Y J, et al. Prediction model of water temperature in shrimp gully under rice-shrimp co-cropping model[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(5): 194-199. [杨青青, 曾月, 邓艳君, 等. 稻虾共作模式虾沟水温预报模型研究[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(5): 194-199.]
- [38] Zhou K, Wang J L, Huo L G, et al. Tolerance of sea cucumber to temperature and countermeasures in production [J]. Hebei Fisheries, 2018, 10: 27-30. [周凯, 王金龙, 霍录广, 等. 生产中刺参对温度的耐受与应对思路[J]. 河北渔业, 2018, 10: 27-30.]
- [39] Falconer L, Hjøllø S S, Telfer T C, et al. The importance of calibrating climate change projections to local conditions at aquaculture sites[J]. Aquaculture, 2020, 514: 734487.

Evaluation and prediction of the effects of extreme high temperatures on sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) pond aquaculture in China

ZHANG Yuyang¹, YU Shuang'en¹, LIAO Mingling¹, DONG Yunwei^{1, 2}

1. Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education; Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266000, China;
2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China

Abstract: The sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) is an important aquaculture species in northern China. As a typical temperate species, the sea cucumber is very sensitive to high temperatures. When the ambient temperature exceeds the upper thermal tolerance limit of the species, a series of complex physiological responses can be induced, some leading to large-scale death. High temperature and marine heat waves in the summer are environmental factors that are known to damage the sea cucumber pond aquaculture. For evaluating and predicting the effect of high temperature on sea cucumber pond aquaculture and selecting suitable aquaculture areas, hourly summer temperature data (July to August) in 2011–2020 were collected, and the 99th percentile high temperature value (T_{99}) of each grid point was defined as the intensity of extreme high temperature in each year. The relationship reported in the literature between temperature and survival rate, as a physiological proxy of the sea

cucumber, was calculated by using a three-parameter logistic model. Based on the calculated relationship between temperature and survival rates, the semi-lethal high temperature of the sea cucumber was found to be $(31.7 \pm 0.15) ^\circ\text{C}$. Ambient temperature higher than $31.7 ^\circ\text{C}$ was defined as disaster-causing temperature. The vulnerable areas of sea cucumber pond aquaculture to high temperature were ranked based on the disaster-causing event frequency. Areas of risk in aquaculture ponds under three representative concentration pathways scenarios (RCP2.6, RCP6.0, and RCP8.5) were identified based on the predicted survival rate of sea cucumbers from 2046 to 2050. The results showed that the average temperature ($1.27 ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$) and the maximum temperature ($2.15 ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$) increased in the coastal areas of northern China from 2011 to 2020, and the sea cucumber pond aquaculture areas in northern China, particularly in the southwest Bohai Sea, encountered disaster-causing temperatures frequently. The total frequency of disaster-causing events has shown a clear increasing trend from 2011 to 2018, and the number of affected areas have also kept increasing, with 10% of areas for sea cucumber pond aquaculture suffering from disaster-causing temperatures in 2011, while more than 40% of the areas experienced disaster-causing temperatures in 2018. In 2019 and 2020, 20% of the pond aquaculture areas suffered from disaster-causing temperatures. High frequency of disaster-causing events mainly occurred in the southwest of Bohai Sea and in the Liaodong Bay. Under the scenarios of RCP2.6, RCP6.0, and RCP8.5, T_{99} will continue to rise in most coastal areas in northern China where temperatures can reach $40 ^\circ\text{C}$ in some regions. Under the impacts of global warming, those previously appropriate aquaculture areas would possibly no longer be suitable for the culture of sea cucumbers, and the risk from exposure to high temperatures will increase throughout the bays of Bohai Sea. The present study implies that sea cucumber pond aquaculture in China has been sensitive to high temperatures in the past and will be even more vulnerable to much higher temperatures in the future. Therefore, in the context of global warming, there is an urgent need for heat risk assessment models on micro-scale or meso-scale for the sustainable development of aquaculture. In conclusion, the local temperature conditions need to be fully considered in the development of sea cucumber pond aquaculture, and an adaptative management plan needs to be established for coping with increasing temperatures in the future.

Key words: *Apostichopus japonicus*; pond aquaculture; disaster-causing temperature; extreme high temperature; sensitive aquaculture area

Corresponding author: DONG Yunwei. E-mail: dongyw@ouc.edu.cn