

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.20042

北太平洋小型中上层鱼类资源对气候–海洋变化的响应研究进展

王靓¹, 花传祥^{1, 2, 3}, 朱清澄^{1, 2, 3}, 李非¹

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
2. 上海海洋大学国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;
3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海海洋大学, 上海 201306

摘要: 小型中上层鱼类是北太平洋海域重要的渔业资源, 具有生命周期短、生长速度快、高集群性等特点, 其资源年间波动显著, 且受气候–海洋变化的影响。本文围绕秋刀鱼(*Coloabis saira*)、鲭(*Katsuwonus pelamis*)、鲈(*Scomber japonicus*)、鳀(*Engraulis japonicus*)、竹筴鱼(*Trachurus japonicus*)、沙丁鱼(*Sardinops sagax*) 6 种主要的小型中上层鱼类, 回顾了厄尔尼诺–南方涛动(El Niño/La Niña-southern oscillation, ENSO)、太平洋年代际振荡(the Pacific decadal oscillation, PDO)、黑潮–亲潮(Kuroshio-Oyashio, KR-OY)等关键气候–海洋指数的特点及对鱼类栖息地环境和资源变动的影响。概括了气候–海洋变化对小型中上层鱼类的洄游分布和资源丰度的直接影响过程, 以及对亲体繁殖产卵、仔稚体成活率和资源量波动间接的滞后影响过程。建议: (1)在多种气候–海洋指数基础上添加种群动态过程、捕捞方式系数、自然死亡率等参数构建生物量动态模型, 揭示气候–海洋变化对渔业资源量的影响过程; (2)结合北太平洋涛动(North Pacific oscillation, NPO)、北极涛动(Arctic oscillation, AO)、北太平洋环流振荡(North Pacific gyre oscillation, NPGO)等其他北太平洋主要气候, 基于物理海洋模型及空间耦合水动力学模型研究大尺度海流、中尺度涡旋对小型中上层鱼类影响。

关键词: 小型中上层鱼类; 气候–海洋指数; 栖息地变化; 资源丰度; 北太平洋

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2020)11–1379–14

北太平洋面积广阔且鱼种丰富, 是小型中上层鱼类的重要渔区^[1-2]。20 世纪 80 年代开始, 小型中上层鱼类逐渐得到重视, 并成为世界海洋渔业的重要组成部分^[3], 联合国粮农组织(FAO)全球捕捞数据库显示, 在 2005—2016 年全球 25 个年产量超过 30 万 t 的主要捕捞对象中, 小型中上层鱼类约占 62.5%, 产量约占世界主要海洋鱼类捕捞的 69.35%^[4]。北太平洋主要小型中上层鱼类种群包括秋刀鱼(*Coloabis saira*)、鲭(*Katsuwonus pelamis*)、鲈(*Scomber japonicus*)、鳀(*Engraulis japonicus*)、竹筴鱼(*Trachurus japonicus*)、沙丁鱼(*Sardinops sagax*)等^[1]。小型中上层鱼类具有生命周期短、生长速度快、高集群性的生活史生态学

特点, 补充群体通常比成熟群体数量大, 从卵到成鱼的生长过程中死亡率较高, 仔稚体和幼鱼的生活史阶段尤其脆弱^[5]。为深入认知小型中上层鱼类的资源变动和影响因素, 科研工作者基于同位素标记放流^[6]、粒子追踪实验^[7]、渔业调查等方法, 对不同小型中上层鱼类的生活史特征(产卵率、死亡率、洄游路线、耳石与年龄等)^[8-9]、栖息地环境^[10]、栖息地适宜性^[11]、资源评估^[5]等方面进行研究, 发现影响鱼类资源稳定性的主要原因是气候的周期变动, 种群资源量的骤降通常与过度捕捞无关^[4]。了解鱼类种群时空和丰度变化与大尺度气候代用指标之间的联系, 是研究鱼类种群动态的重要内容, 但这种联系难以阐明气候

收稿日期: 2020-06-15; 修订日期: 2020-07-03.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901503).

作者简介: 王靓(1996–), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源. E-mail: 963285436@qq.com

通信作者: 花传祥, 工程师, 研究方向为远洋渔业系统集成. E-mail: cxhua@shou.edu.cn

驱动下鱼类资源变化的动态过程和机制^[9], 因此, 只有开展合理、有效、准确的环境影响因素判断, 认知资源量变化的动态过程, 才能为鱼类资源的可持续利用奠定基础。

在被检测到生态群落受气候变化影响的物种中, 80%的物种与气候变化方向一致^[12]。大尺度气候的不稳定变化引起的栖息地海表温度(sea surface temperature, SST)、净初级生产力(net primary productivity, NPP)等环境因子的波动, 对鱼类种群的洄游分布、栖息地海域及资源丰度产生影响^[13]。另外, 受栖息地生境条件影响的亲体繁殖能力和卵、仔稚体、幼鱼的成活率也是导致鱼类资源量急剧波动的重要因素^[14-15]。资源丰度通常能反映阶段时间内小型中上层鱼类的资源量, 单位努力捕获量(catch per unit effort, CPUE)、资源密度指数(RDI)、渔获量(catches)均可以作为短生命周期物种的资源丰度指标^[16-17]。随着大尺度气候-海洋环境的变化, 鱼类资源丰度的响应机制趋向复杂, 了解及应对气候变化对鱼类资源丰度的影响已成为当前研究重点^[4]。本文将气候-海洋环境对鱼类资源丰度的影响途径为线索, 概括大尺度气候-海洋环境波动对主要北太平洋小型中上层鱼类的栖息地环境、早期生活史、洄游分布、资源丰度的影响, 采用两步法描述小型中上层鱼类对气候-海洋变化的响应结果, 以期今后小型中上层鱼类渔业资源评估、科学捕捞和渔情预报工作提供参考。

1 关键气候-海洋指数

大尺度气候指大范围、长时间观察到的平均气候, 是全球气候变化的主要组成部分^[18]。在已定义的大气与海洋的相互关联中, 可能对北太平洋小型中上层鱼类产生影响的气候现象有厄尔尼诺-南方涛动(El Niño/La Niña-southern oscillation, ENSO)、太平洋年代际振荡(Pacific decadal oscillation, PDO)、北太平洋涛动(North Pacific oscillation, NPO)、北太平洋环流振荡(North Pacific gyre oscillation, NPGO)、北极涛动(Arctic oscillation, AO)等。黑潮-亲潮(Kuroshio-Oyashio, KR-OY)是北太平洋最典型的西部边界洋流, 作为大尺度气候遥

相关作用的媒介, 黑潮海域复杂的气候-海洋响应机制对小型中上层鱼类生长产生影响^[19-20]。

海洋-大气在时间和空间上的大尺度变化可以用不同模式表征, 大尺度气候的表现形式反映不同区域的环境波动。ENSO 是厄尔尼诺(El Niño)与南方涛动(southern oscillation, SO)的合称, 代表同一现象分别在海洋和大气中的体现形式, 两者的关系为: 当 SO 弱时, 对应温暖的 El Niño 事件, SO 强时则对应寒冷的 La Niña 事件^[21]。PDO 是基于海水表面温度的长期太平洋气候变化模式, 根据 SST 的偏高、低和年均 PDO 指数的正、负, PDO 被分为暖、冷期^[22]。AO、NPO 都是大气环流的特殊表现形式^[23], AO 代表中、高纬地区(极地-北太平洋)大气压的反相位变化, 当气压“南高北低”时, AO 被认为处于正位相^[24]; NPO 代表北太平洋冬季大气环流的主要模态——阿留申低压(Aleutian low, AL)的强度变化, NPGO 是大气 NPO 的海洋表达形式, 两者是海气相互作用的负反馈过程, 即 NPGO 正位相能使 NPO 负位相加强^[25]。气候-海洋指数(表 1)是大尺度气候与海洋环境的数据化形式, 年际 SST 波动在计算区域月度平均海表温度距平(sea surface temperature anomaly, SSTA)的基础上, 被表征为 El Niño 3.4 指数(ocean Niño index, ONI)、太平洋年代际振荡指数(the pacific decadal oscillation index, PDOI)或北太平洋环流振荡指数(North Pacific gyre oscillation index, NPGOI); 北太平洋冬季的大气环流变化基于对区域海平面压力的量化, 定义为南方涛动指数(southern oscillation index, SOI)、极地指数(Arctic oscillation index, AOI)或北太平洋指数(North Pacific index, NPI), 指数的正负通常对应气候的正负位相。

近 20 年气候-海洋指数波动图(图 1)表明, El Niño 现象在 2015—2016 年秋冬季节达到本世纪顶峰, 2007—2015 年间北太平洋 PDOI 与东北太平洋 NPGOI 呈完全相反的变化趋势, 这与 Joh 等^[26]对东北太平洋 PDOI 和 NPGOI 关系的研究结果相反。总的来说, SOI 与 NPGOI 的变化方向基本相似, ONI 与 PDOI 的波动趋势一致, PDO 和 NPGO 的年代际动力学与 ENSO 相互关联, 气候年代际

表 1 关键气候-海洋指数
Tab. 1 Mainly climate-oceanic index

气候种类 climate type	气候-海洋指数 climate-oceanic index	指数时间序列/年 time series of index/year	指数来源 source of index
ENSO	SOI: 测量厄尔尼诺、拉尼娜期间热带太平洋东西部气压大尺度波动的指标	1951—2018	https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/
	ONI: 指 Nino 3.4 地区(120°W~170°W、5°S~5°N)连续 3 个月的 SSTa 平均值	1950—2020	https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml
PDO	PDOI: 指 20°N 以北整个太平洋区域 SSTa 平均值	1900—2018	http://research.jisao.washington.edu/pdo
NPI	NPI: 指 30°N~65°N、160°E~140°W 地区的面积加权平均海平面气压	1899—2020	https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/north-pacific-np-index-trenberth-and-hurrell-monthly-and-winter
NPGO	NPGO index (NPGOI): 定义为东北太平洋(25°N~65°N、180°W~110°W)地区 SSTa 和海表高距平(SSHA)的第二主成分	1950—2019	http://www.o3d.org/npgoi/
AO	AOI: 指北极地区海平面大气压距平平均值	1950—2020	https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml

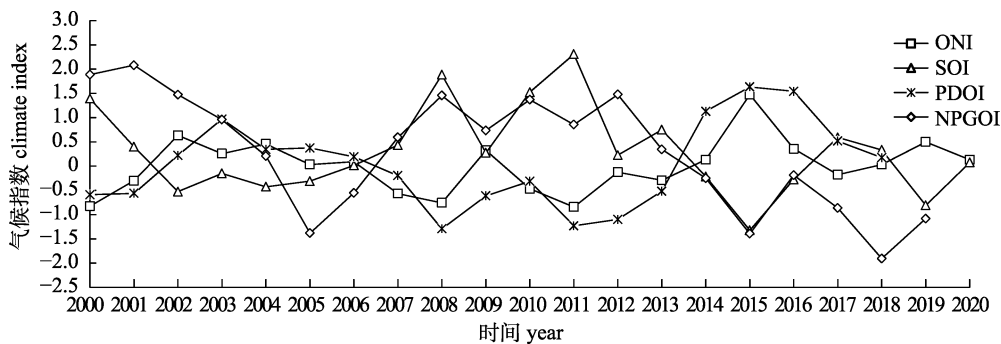


图 1 关键气候指数波动图
Fig. 1 Fluctuations chart of key climate index

变化不仅是一个以单一模式(如冷暖交替状态)表示的双态系统,而且还是多个气候模式共同作用的结果^[27]。

2 ENSO 对北太平洋小型中上层鱼类的影响

2.1 ENSO 对小型中上层鱼类栖息地的影响

ENSO 具有明显的年际变化周期, El Niño 现象发生后, La Niña 现象通常紧随其后^[28-29], 伴随季节上升流的延迟可能与某些地区浮游植物的繁盛有关^[20]。在 El Niño 常发的夏秋季节, 热带西太平洋西风异常, 热带东太平洋较热带西太平洋海况变化呈相反趋势, 表现为东太平洋 SST 上升, 中西太平洋暖池东移, 温跃层变浅, 形成该海域暖水性鱼类的主要产卵区, 同时东太平洋气压降低, 赤道西太平洋上升流增强, 为浮游生物提供良好的生存条件, 幼鱼可沿 NPP 丰富的暖池边缘

进行索饵洄游并形成高产渔场; La Niña 引起的海洋环境变化趋势与 El Niño 相反^[30-31]。

海洋鱼类的种群丰度主要取决于鱼类早期的生存状况, 鱼类由卵生长至成鱼的过程中容易受海洋物理变量及生物因素的影响, 其中, 栖息地的温度和食物可获得性是控制鱼类早期生存的最重要因素^[32-33]。ENSO 与小型中上层鱼类的种群垂直分布和空间运动联系较强, 小型中上层鱼类生活史、营养级特点的不同决定了对环境变化的响应差异, 因此从栖息地分布、产卵繁殖及幼鱼生长的角度描述决定鱼类补充量的区域物理过程是合理的^[15]。

秋刀鱼是冷水性远洋洄游鱼类, 主要渔场位于黑潮-亲潮辐合区, ENSO 对秋刀鱼的主要作用仅限于副热带锋区的大型群体(秋生群)、中型群体(冬生群), 对黑潮-亲潮过渡带小型群体(春生

群)影响有限^[15]。虽然鲹、鲈、竹筴鱼同属中西太平洋暖水性鱼类,且均随着 SST 的升高向北及近岸迁移,但由于 3 种鱼类栖息地纬度位置及洄游习性的不同,对 ENSO 变化的响应也不尽相同。鲹对温度的变化非常敏感,种群空间变化与 ENSO 期间暖池大位移有关^[34-35],周甦芳^[36]在 1982—2001 年 Niño 3.4 区 SST 与中西太平洋鲹渔场重心关系的研究中也发现,鲹在赤道太平洋海域产卵后,迁移到高营养水平的暖池边缘作长距离索饵洄游,厄尔尼诺年渔场较正常年份向东偏移 10~20 个经度,拉尼娜年反之。不同于鲹,北太平洋鲈鱼、竹筴鱼自春季沿温带西太平洋近海岸向北进行生殖洄游,Hiyama 等^[37]根据鲈的洄游方式明确东海和日本海的鲈是同一种群,在 2001—2012 年间 El Niño 发生年份,鲈鱼产卵成功率与 SST 呈负相关($r=-0.76$, $P<0.01$),近海鲈(东、黄海鲈)栖息地随 SST 升高面积缩小且逐渐北移,部分鲈鱼游至浙江近海进行产卵、索饵,该渔场受 SSTA 影响不显著,却容易因长江冲淡水等内陆影响因素而逐渐分散^[38];东南南部是太平洋竹筴鱼的主要产卵区,厄尔尼诺年 SST 大幅度升高使产卵大多在春季前结束,春季竹筴鱼幼鱼丰度与 SST 呈负相关,鱼类成熟前被黑潮沿东北方向输送至高营养的黑潮与黑潮大陆架水域锋面,幼鱼丰度与冬春季黑潮叶绿素 a (Chl a)浓度呈正相关,中国东海北部竹筴鱼幼鱼的成活率决定日本竹筴鱼的资源量,但与 SST 及 Chl a 无显著相关性^[33,39]。太平洋沙丁鱼(拟沙丁鱼)对海洋环境变化的响应与鲈鱼相似,但由于该近海暖水性鱼类广泛分布于东太平洋,资源对 La Niña 现象的响应与西太平洋暖水性鱼类相反,幼鱼随着加利福尼亚上升流(California current system, CCS)增强向富营养的近海岸方向洄游,栖息地面积随幼鱼丰度的增加而扩大^[40-41]。

2.2 ENSO 对小型中上层鱼类资源丰度的影响

ENSO 现象引起栖息地环境的改变,进一步影响小型中上层鱼类的资源丰度。日本在 20 世纪 30 年代最先出现有关 ENSO 现象的局部记录,目前国内外学者大多选择 20 世纪 80—90 年代大气候变

化时期更全面的环境数据研究 ENSO 现象对小型中上层鱼类资源丰度的直接影响,在生产数据及环境数据基础上采用适宜模型开展相关性分析,得到 CPUE/RDI 与 ENSO 指数具有负相关性的小型中上层鱼类有大型秋刀鱼($r=-0.48$, $P<0.01$)^[15]、鲹鱼($r=-0.779$)^[42]、竹筴鱼($r=-0.369$)^[43]及鲱鱼($r=-0.156$, $P>0.05$, RDI)^[44],中型秋刀鱼渔获量($r=0.05$)及鲈鱼($r=0.15$)^[45]、沙丁鱼($r=0.666$)^[46]的产卵量渔获量与 ENSO 有着相反的正相关关系。

当气候发生变化时,由于海洋自身的热惯性,特定区域的海洋生态系统响应规模较气候系统小且表现出时空异步性^[47],鱼类资源丰度可能存在滞后的响应。鲹 CPUE 滞后 0~2 个月与 ENSO 具有最大相关关系,为拉尼娜年份>弱厄尔尼诺年份>强厄尔尼诺年份>正常年份,La Niña 的强弱与 CPUE 增长强度无关^[48]。李非等^[11]发现当 ENSO 处于发展阶段时,其指数(SOI)与本年度的中型秋刀鱼和鲈 CPUE 呈负相关,与次年大型秋刀鱼和鲱鱼的丰度指数呈正相关,秋刀鱼和鲱丰度指数对 ENSO 事件的正响应滞后 1 年,El Niño 年的秋刀鱼 CPUE 约为 La Niña 年的 3 倍。张孝民^[49]指出秋刀鱼产卵场 SST 与 Niño 3.4 区的 SSTA 变化呈滞后 8~10 个月的正相关关系,可见,大尺度气候不仅与鱼类资源变化有直接的相关关系,而且通过改变其他生物及非生物因素对鱼类产生间接影响。

3 PDO 对北太平洋小型中上层鱼类的影响

3.1 PDO 对小型中上层鱼类栖息地的影响

PDO 与控制北太平洋鱼类活动的各种大气—海洋因素密切相关。广义的 PDO 指北太平洋 SST、盐浓度(sea surface salinity, SSS)、混合层深度、季风等长期的变化尺度^[50],尽管关于 PDO 形成机理的研究尚未获得完全突破,但 Vimont^[51]已指出 PDO 与 SST 具有一定的关联性,PDOI 由负向正变化的方向与浮游植物的最大位移量移动方向一致。处于冷、暖相的 PDO 空间分布形态类似于 ENSO 现象,气候特点表现为 PDO 暖(冷)期,同期热带东太平洋海温偏高(低),中部及西北太平洋海温则显著降低(升高)^[52-53]。

气候是生态变化的主要驱动力,在 PDO 变动造成的产卵、索饵栖息地海洋环境变化中, SST 直接影响幼鱼的生长,浮游生物密度则改变成鱼的生长繁殖和迁移方式^[15]。PDO 影响秋刀鱼的黑潮冬季产卵场和亲潮索饵场, PDO 负位相(冷年)时期,黑潮入侵加强且延伸体明显,秋刀鱼提前向 NPP 丰富的高纬度亲潮洄游,资源丰度与产卵场 SST 呈负相关,与索饵场 SST 呈正相关^[15,54]。29 °C 等温线可以用来反映鲭渔场重心分布情况^[55],在 PDO 正位相(暖年)时期,由于 PDO 与 NPGO 的耦合作用增强,导致赤道上升流减少,太平洋温跃层变深,鲭的捕捞难度加大^[34]。适宜的 SST 是日本鳀迁移的主要动力因子, PDO 负位相时期的西北太平洋 SST 降低,冬季日本鳀渔场重心随等温线向南移动,黄海鳀在营养物质更为丰富的黄海中部聚集^[56],其 CPUE 及幼鱼补充量与 PDOI 呈负相关^[14,57]。Yatsu 等^[58]应用 Ricker 模型表明,北太平洋海域的沙丁鱼补充量状况受其亲体数量和 SST 的影响,而影响鲱补充量的生态因素除了其亲体数量和 SST,还有沙丁鱼的资源量,沙丁鱼 CPUE 及幼鱼补充量与 PDOI 呈正相关^[14,58]。

3.2 PDO 对小型中上层鱼类资源丰度的影响

资源丰度与 PDO 具有负相关关系的北太平洋小型中上层鱼类有太平洋秋刀鱼秋冬生群体^[11]、鲭($r=-0.45$, $P=0.04$)^[34]、日本鳀^[56],资源丰度与 PDO 呈正相关的小型中上层鱼类有太平洋秋刀鱼冬春生群体($r=0.10/0.18$, $P>0.05$)^[11]、黄海鳀($r=0.59$, $P=0.05$)^[56]。不同于陈云龙^[44]对 1985—1986 年、2000—2010 年黄海鳀种群年代际变化的研究,Zhou 等^[56]得到黄海鳀 RDI 值与 PDO 呈不显著负相关的结论,可能原因有二:一是鳀资源丰度若受多个因素的共同作用,单一变量及不同组合变量对丰度影响不尽相同,后者充分考虑了环境因子间的交叉影响;二是黄海鳀生产数据的来源和时间段不同,后者选取更连续的长时间序列具有较强的代表性。北太平洋鲱、竹筴鱼和沙丁鱼的资源量在年际到几十年间的波动很大,但可能因为生产数据时间序列的过长或过短,不同鱼类研

究方法上的差异,或者近海洄游鱼类栖息地环境更易受内陆及台湾暖流等内海因素的影响, PDO 无法完整体现对鱼类资源量的影响等原因,所以北太平洋鲱^[59]、竹筴鱼和沙丁鱼^[60]的资源波动量与 PDO 无显著相关关系。

PDO 作为太平洋气候波动的年代际信号,与生物反应之间的联系在时间和空间尺度上存在差别^[61]。如秋刀鱼渔获量在 PDO 冷、暖模态转换时往往出现较大变化, PDO 暖期内的秋刀鱼 CPUE 一般高于 PDO 冷期^[54], CPUE 与 PDOI 经滞后相关性检验表明前者滞后于后者 3 年时相关性最大($r=-0.318$)^[11]。鲭资源丰度与 PDO 指数呈负相关且响应滞后 1 年^[34]。

4 KR-OY 对北太平洋小型中上层鱼类的影响

4.1 气候影响下 KR-OY 海域小型中上层鱼类栖息地的特点

黑潮和亲潮海域大气与海洋的相互作用强烈,小型浮游生物众多,形成秋刀鱼、鲭、沙丁鱼、鳀等小型中上层鱼类重要的产卵场、孵化场^[62]。除了鳀产卵期由春季延长至秋季,其他远洋鱼类(鲭、秋刀鱼等)在春冬季黑潮区产卵育苗后^[63],幼鱼洄游至黑潮延伸区、黑潮-亲潮过渡区集群生长,区域物理过程向黑潮西部及黑潮锋面提供较高 NPP^[62], Miller 等^[64]认为黑潮浮游生物的生命周期短且对气候和海洋环境变化敏感,使该海域营养水平低且响应复杂。亲潮来源于白令海峡和鄂霍克次海,具有低温、低盐、高营养的特点^[63],当亲潮第一、二支流之间的暖水团舌形嵌入黑潮中形成流隔渔场时,舌锋边缘等温线密集,鱼类一般在亲潮向背侧聚集^[65]。Tian 等^[15]发现秋刀鱼 CPUE 的年代际变化与 1976/1977 年、1987/1988 年和 1997/1998 年黑潮范围内海洋环境的改变相一致,而 1987/1988 年及 1997/1998 年黑潮海域明显的海洋系统变化与 PDO 的丰富程度有很大关系,1976/1977 年和 1997/1998 年的海况变化与 ENSO 事件也有关,说明 PDO、ENSO 等大尺度气候的长期变化在 KR-OY 海域时空关系密切,共同影响该海域海况和鱼类资源^[66-67]。

4.2 KR-OY 海况对小型中上层鱼类资源丰度的影响

温度是影响鱼类的主要环境变量^[68], 往年 PDO 现象衍生的罗斯比波洋流变化对 KR-OY 区域的 SST 滞后响应起重要作用^[19], 在 1988—1989 年 PDOI 由负变正期间, 亲潮区受 SST 暖化的直接影响, 冬季浮游生物量增加而春季浮游生物量减少, PDO 冷暖相的改变引起了 KR-OY 海域的物候变化^[69]。Itoh 等^[7]通过回归分析法发现 1978—2004 年沙丁鱼产卵数量与黑潮延伸区的 SST 具有线性负相关关系, 鲱产卵量的对数与黑潮亲潮—过渡带海表温度(SST-TZ)具有“钟形”关系。Tian 等^[15]采用主成分分析和相关性分析法研究 1970—2000 年的气候指数与同期中上层鱼类 CPUE 的关系, 得到大型秋刀鱼 CPUE 与黑潮区域海表温度(SST-KR)、SST-TZ 呈正相关($r=0.60$), 与亲潮区域海表温度(SST-OR)呈负相关($r=-0.05$); 中型秋刀鱼与 SST-OR、SST-TZ 呈正相关($r=0.08$; $r=0.001$), 与 SST-KR 呈负相关($r=-0.26$)。总的来说, 与区域温度呈负相关的小型中上层鱼类有鲱($r=-0.44$)、中型秋刀鱼($r=-0.26$)、沙丁鱼; 呈正相关的小型中上层鱼类有鲱($r=0.21$)、竹筴鱼($r=0.13$)、大型秋刀鱼($r=0.49$, $P<0.01$)^[15]。

ENSO 和 PDO 对黑潮入侵速度产生影响^[70], 只有黑潮强度变化才影响秋刀鱼资源丰度, 亲潮的态势会影响种群肥满度和渔场形成位置^[71], 亲潮沿岸分支势力强时, 秋刀鱼在日本沿岸的渔获量较高, 反之可能在外海高产^[72], 亲潮黑潮过渡水域的秋刀鱼 CPUE 由幼鱼早期阶段的累积成活率决定^[73]。黑潮具有直径与大曲径两种表面流型, 黑潮势力耗散时, 异常的低位势涡度(potential vorticity, PV)无法消除, 使日本海近海再循环加强, 不稳定的黑潮斜压形成黑潮弯曲^[74], 黑潮弯曲时活跃的水对流造成沿海水域盐碱化加重, 导致近海迁移的沙丁鱼产卵场幼鱼存活率降低, 而黑潮平直流式时生产力升高^[75]。可见, KR-OY 的强弱影响小型中上层鱼类的时空分布, 黑潮弯曲造成的路径变化极可能对鱼类资源丰度产生影响。

5 其他气候对北太平洋小型中上层鱼类的影响

5.1 其他北太平洋气候—海洋环境

常见的大尺度气候(如 PDO 和 ENSO)只解释了部分北太平洋关键海洋变量的年代际变化, 且与东北太平洋海域和其他海洋环境变量的相关程度有限^[25], NPO、NPGO、AO 等其他大尺度气候的引用将有助于全面了解海洋环境的变化响应。北太平洋大气循环模式改变海平面气压(sea level pressure, SLP), AO 代表 20°N 以北海域的 SLP 变化, NPO 代表 30°N 夏威夷高压与 60°N AL 同时波动的现象, 其指数(NPOI)反映北太平洋 SST 的年际波动, Chenillat 等^[76]认为 NPO 是造成邻近区域气候变化的重要原因。di Lorenzo 等^[25]通过经验正交函数 EOF 分析, 验证了 NPGO 与东北太平洋 SSS、Chl a 浓度、营养物质的年代际变化密切相关。东太平洋典型 El Niño 将 NPGO 与 PDO 联系在一起, 研究发现, 1990—2002 年间 NPGO 对 SSTA 的方差解释率比 PDO 更高, 气候变化取决于 PDO 与 NPGO 之间的相位关系^[25], 今后 NPO 和 NPGO 可能在北太平洋海洋环境变化中发挥更加重要的作用。

5.2 NPO、NPGO、AO 对小型中上层鱼类栖息地的影响

NPO 驱动下的 NPGO 反映副热带环流中东部分支强度的变化, NPGOI 与以 CCS 为代表的北太平洋东部边界流、黑潮延伸等西部边界流联系密切^[77]。在 CCS 中, NPGO 所反映的风应力上升流变化与 SSS 异常具有强关联性, 然而东北太平洋海岸的上升流变化仅在 38°N 以南与 NPGO 相关性较强, 38°N 以北 PDO 对上升流的控制更为强烈^[78], 小型中上层鱼类主要沿近海岸向极地扩展^[57]。风应力旋度造成的罗斯比波辐射到西部边界, 调节黑潮延伸区的年际变化, 西部边界区的小型中上层鱼类空间分布主要向公海海域扩展^[57]。NPGOI 与 NPI 表现形式相反, 当 NPO 指数为负时, NPGO 处于正位相, AL 加深且东移, 东北太平洋 SST 升高, SSH 降低, 浮游生物生产力增加, 黑潮延伸区滞后 2~3 年南移^[57,76]; 当 NPGO 处于负位相时, 中纬度热带太平洋出现 SST 升高, 并向

副热带东太平洋延伸, 西太平洋 SST 降低, 温带太平洋变化于热带太平洋滞后 3 个月^[79-80]。强 AO 现象加深 AL 强度, AO 正位相意味着限制极地冷空气南扩, 中纬度太平洋 SST 升高, 长江中下游降雨减少^[76, 81]。

5.3 NPO、NPGO、AO 对小型中上层鱼类资源丰度的影响

小型中上层鱼类资源在北太平洋表现出显著的年代际变化, 相对内海及沿海岸, 近海和远洋渔业资源更易受气候变化的影响^[78]。吕庆平等^[82]发现 NPGO 不仅影响海表面, 而且作用于整个上层海洋系统, 小型远中上层鱼类(如沙丁鱼、鲱等)的迁移和产卵活跃在东、西部边界流周围, 该海域大多浮游生物对气候的响应与鱼类不同步, 造成鱼类与食物的不匹配, NPP 的任何大尺度变化都可能对鱼类的生命史及资源丰度产生连锁效应^[78, 83]。目前, Zhang 等^[84]采用 Logistic 模型得到 NPGO 对东北太平洋黄鳍金枪鱼资源丰度产生影响, 然而北太平洋作为全球渔获量最高的生产区域, 其生态系统(包括鱼类资源)的变化如何与 NPGO 调节的黑潮区域年代际振荡相联系仍然未知。AO、NPO、NPGO 与北太平洋小型中上层渔业资源量的直接关系暂无准确研究结果。

6 总结与展望

纵观国内外气候-海洋变化与主要渔业资源波动关系的文献报道, 国内外学者在气候变化对小型中上层渔业资源量的影响(表 2)及影响过程(图 2)方面取得一定成果, 气候-海洋变化不仅直接影响小型中上层鱼类种群世代内的个体行为(如垂直分布、洄游、索饵路径等), 而且通过影响种群世代间的生活史特征(如繁殖产卵、仔稚鱼成活率等)对鱼类资源丰度间接的产生滞后影响。本文一定程度上能够阐述小型中上层鱼类受气候影响的过程, 但难以通过资源丰度与气候的关系来准确表述鱼类各生命阶段对气候变动的响应, 通过改进研究方法和融合其他领域以更深入地分析气候变化与北太平洋渔业资源波动的关系就显得尤为重要。

表 2 大尺度气候与小型中上层鱼类的相关性
Tab. 2 Relationship between large-scale climate and small pelagic fishes

相关性 relationship	ENSO	PDO	KR-OY(SST) ^[40]			
			KR	OR	KOTZ	
秋刀鱼 <i>Coloabis saira</i>	春生群 spring-cohorts	+[15]	+[11]	–	+	+
	秋生群 autumn-cohorts		–[11]		0	
	冬生群 winter-cohorts	–[15]		+	–	+
鰹 <i>Katsuwonus pelamis</i>	–[42]	–[34]		0		
鲈 <i>Scomber japonicus</i>	+[45]	0[60]		–		
竹筴鱼 <i>Trachurus japmicus</i>	–[43]	0[61]		+		
沙丁鱼 <i>Sordinops sagax</i>	+[46]	0[61]		0		
鰹 <i>Engraulis japonicus</i>	黄海鰹 <i>huanghai anchovy</i>		+[57]			
		–[44]			+	
	日本鰹 <i>japanese anchovy</i>		–[57]			

注: +代表指数间呈正相关。-代表指数间呈负相关。0 则代表指数间无相关关系。
Note: + represents a positive relationship between the indices. - represents a negative relationship between the indices. 0 represents no relationship between the indices.

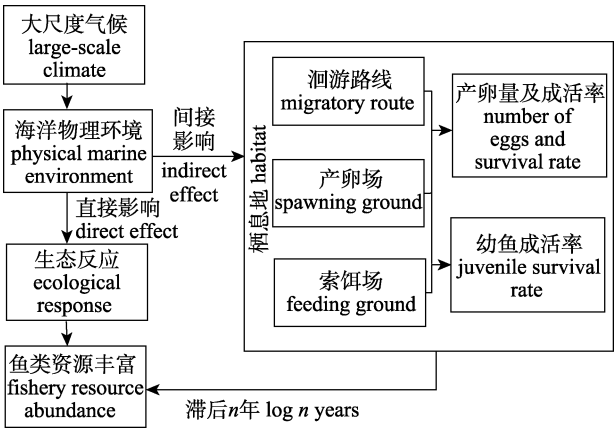


图 2 综述框架
Fig. 2 Framework of review

6.1 改善研究方法

预测鱼类丰富度和渔获量能力的局限性将限制渔业管理和可持续开发的能力。现有的文献报道多面向短期研究且时间难以统一, 目前常用的分析方法以基于时间序列资料的模型分析(表 3、表 4)为主, 可以直观地反映各类气候-海洋变化与某小型中上层鱼类资源的相关关系。然而在实际生产中, PDO、ENSO 等大尺度气候与海洋环境具

有交互作用,气候与单一物种行为的任何关联都可能包括与其他气候和生物间的相互作用^[85]。因此在今后的研究中,要选取涵盖近期数据的长期生产资料和环境数据,一方面在得到不同气候间解释率的基础上,结合同期长时间序列下多种环境因子的交叉影响,综合分析气候-海洋变化对小型中上层鱼类资源的影响;另一方面要着力于模型研究,结合基因研究和标价实验法获取生产数据,基于多种气候-海洋指数添加种群动态过程、捕捞方式系数、自然死亡率等参数来构建生物量动态模型,这不仅可以从机制上揭示渔业资源量对气候-海洋变化的响应,而且得到的响应

表 3 ENSO 与小型中上层鱼类相关性的研究方法
Tab. 3 Research methods of relationship between ENSO and small pelagic fishes

鱼类 fish	时间序列/年 time series/year	研究方法/模型 research method/model	应用公式 application of formula	优缺点 merit and demerit
秋刀鱼 <i>Coloabis saira</i> ^[15]	1951–2000	主成分分析 principal component analysis、相关性分析 correlation analysis		优点: 将多个自变量降维为少数综合指标 缺点: 主成分环境因子也受其他因子影响
鲹 <i>Katsuwonus pelamis</i>	1998–2013 ^[86]	提升回归树模型 boosted regression tree	$f_M(\hat{X}) = \sum_{m=1}^M T_m(\hat{X}, \gamma_m)$	优点: 较传统分析方法预测精度高, 且数据不易过度拟合
	1990–2001 ^[48]	灰色关联分析法 grey relational analysis	$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta_i(k)$	优点: 适用与种群动态分析
鲈 <i>Scomber japonicus</i> ^[45]	1971–2006	相关性分析 correlation analysis	$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2][n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$	优点: 结构简单误差小 缺点: 无法体现变量间的因果关系
竹筴鱼 <i>Trachurus japonicus</i> ^[43]	2001–2010	广义线性模型 generalized linear models	$g(u_i) = X_i^T \beta$	优点: 因变量分布形式广泛
		广义加性模型 generalized additive models	$g(u_i) = \mu + \sum_{i=1}^p f_i(X_i)$	优点: 较 GLM 方差解释率更高 (30.78%); 能引入非参数项处理非线性问题
沙丁鱼 <i>Sardinops sagax</i> ^[46]	1981–2012	线性回归分析 linear regression analysis		优点: 分析各个自变量分别与因变量的多种线性关系 缺点: 使用条件限制, 因变量要服从高斯分布
		多项式回归分析 polynomial regression analysis		优点: 研究因变量与多个自变量间非线性关系, 可通过增加高次项向实测值逼近
鳀 <i>Engraulis japonicus</i> ^[44]	1985–1986 2000–2010	Shapiro-Wilk 检验 Shapiro-Wilk test、相关性分析 correlation analysis	$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{S_X} \right) \left(\frac{Y_i - \bar{Y}}{S_Y} \right)$	缺点: 无法体现变量间的因果关系

注: $f_M(\hat{X})$: M 棵分类回归树相加。 $\hat{X}$: 环境变量。 $T_m(X, \gamma_m)$: 第 m 棵分类回归树, γ_m 为其参数。 r : 相关系数。 n : 样本数。 $\zeta_i(k)$: x_i 的第 k 个元素与 x_0 的第 k 个元素间的相关系数。 X 、 Y : 相同时间序列下的 SSTa 和 CPUE 数列。 X_i 、 Y_i : 第 i 个气候指数和第 i 个响应变量的数值。 g : 可微单调的连接函数。 $u_i = E(Y_i)$ 。 β : 向量参数。 f_i : 光滑函数。 $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$: 代表 X 、 Y 的平均值。 S_X 、 S_Y : 代表 X 、 Y 的标准差值。

Note: $f_M(\hat{X})$: sum of M classification and regression trees. $\hat{X}$: environment variable. $T_m(X, \gamma_m)$: the m th classification and regression tree, γ_m is its parameter. r : correlation coefficient. n : sample size. $\zeta_i(k)$: the correlation coefficient between the k th element of x_i and the k th element of x_0 . X , Y : SSTa and CPUE sequences in the same time series. X_i , Y_i : the i th climate index and the i th responses value. g : the differentiable and monotonic link function. $u_i = E(Y_i)$. β : vector of parameters. f_i : the smoother function. $\bar{X}$, $\bar{Y}$: the average of X and Y . S_X , S_Y : the standard deviation of X and Y .

表 4 PDO 与小型上层鱼类相关性的研究方法
Tab. 4 Research methods of relationship between PDO and small pelagic fishes

鱼类 fish	时间序列/年 time series/year	研究方法/模型 research method/model	应用公式 application of formula	优缺点 merit and demerit
秋刀鱼 <i>Coloabis saira</i> ^[11]	1985—2013	相关性分析 correlation analysis	$r = \frac{S_{XY}}{S_X S_Y} S_{XY} = \text{cov}(X, Y)$	优点: 结构简单误差小 缺点: 无法体现变量间的因果关系
鲭 <i>Katsuwonus pelamis</i> ^[34]	1976—2006	种群动态模型 population dynamic models	$R_t = f(N_{t-1}, N_{t-2}, \dots, N_{t-i}, C_{t-i}, \varepsilon_i)$	优点: 易于数据拟合, 使参数具有生态解释性
鳀 <i>Engraulis japonicus</i> ^[56]	1985—2005	奇异谱分析 singular spectrum analysis		优点: 基于非连续时间序列数据, 应用于周期振荡行为的研究
鲈 <i>Scomber japonicus</i> ^[59]	2000—2011	剩余产量模型 surplus production model	$Y_t = a f_t - b f_t + \left(c + \sum_{i=1}^n d_i x_i \right) \cdot f_t$	优点: 形式简单, 模型参数较少, 结果易于理解
沙丁鱼 <i>Sardinops sagax</i> 、竹筴鱼 <i>Trachurus japonicus</i> ^[60]	1920—2010	时间序列法 time-series analysis		缺点: 仅以时间的推移发现因素之间的变化规律, 无法消除偶然因素

注: r : 相关系数. S_{XY} : X 、 Y 间的协方差. S_X 、 S_Y : 代表 X 、 Y 的标准差值. R_t : R 函数. N_{t-i} : 不同滞后时间的 CPUE. C_{t-i} : 气候响应. ε_i : 正态分布的随机变量. Y_t : t 年的渔获量. a 、 b : 线性方程参数. f_t : 年标准化 CPUE. c : 常数项. d_i : 第 i 个因子的系数. x_i : 第 i 个因子的数值.

Note: r : correlation coefficient. S_{XY} : the covariance between X and Y . S_X 、 S_Y : represents the standard deviation of X and Y . R_t : R -function. N_{t-i} : the CPUE at different time lags. C_{t-i} : climate effects. ε_i : random variable in normally distributed. Y_t : Catch in t year. a and b : the parameter in linear equation. f_t : annual standard CPUE. c : constant term. d_i : the coefficient of the i th factor. x_i : the number of the i th factor.

结果将更能反映实际情况。除了选取适宜模型, 在相关性检验中, 数据权重分配和 CPUE 标准化方法的不确定性会对结果产生影响, 数据来源于多种捕捞方式可以缩小权重分配比率。

6.2 拓展研究内容

气候变化对渔业的影响是多方面的, 尽管大尺度气候特征为海洋物理状态和鱼类丰度之间的耦合提供了直接关系, 但由于更小尺度的海况信息不全面, 温度效应只能部分解释北太平洋的鱼类种群分布和生产力的变化(例如沿岸和海外海高盐水团的强弱才是影响鲈渔场重心的主要原因^[38]), 现阶段无法更好地了解两者的联系。此外, 文献大多聚焦于 ENSO、PDO 等常见大尺度气候, 缺少其他气候现象、大尺度海流等与鱼类资源时空变化相关性的研究结论, 成鱼资源量对黑潮亲潮路线、强度的响应有待进一步分析。在以后的研究中, 可以加强 NPO、AO、NPGO 影响小型中上层鱼类资源丰度的研究, 并基于物理海洋模型、空间耦合水动力学模型研究大尺度海流、中尺度涡旋以及小尺度海洋环境(盐浓度、海表高度、光照强度等)对小型中上层鱼类的影响。

在现有捕捞技术支持下, 部分鱼类资源捕捞区位于大陆架近海岸, 气候-海洋指数仅能粗略地反映近海鱼类资源的丰歉, 内陆的其他影响因素模糊了两者之间的关系, 为了北太平洋渔业可持续发展, 要以经济捕捞为目的, 全面了解不同小型中上层鱼类基础生物学的异同, 今后将致力于模型的完善、大尺度气候对小型中上层鱼类影响的补充及同一长时间序列下两者的相关性研究, 利用种群动态模型判断保护区和捕捞区, 为渔业生产工作者提供更准确的参考依据。

参考文献:

[1] Moffitt C M, Cajas-Cano L. Blue growth: The 2014 FAO state of world fisheries and aquaculture[J]. Fisheries, 2014, 39(11): 552-553.

[2] Zhu Y G. Several characteristics of pelagic fish[J]. Journal of Fujian Fisheries, 1988, 10(3): 7-9. [朱耀光. 中上层鱼类的若干特点[J]. 福建水产, 1988, 10(3): 7-9.]

[3] He X W. Development status and prospect of pelagic small fish[J]. Modern Fisheries Information, 1989, 4(Z2): 42-43, 41. [何学武. 中上层小型鱼类的开发现状与前景[J]. 现代渔业信息, 1989, 4(Z2): 42-43, 41.]

[4] Food Agriculture Organization. The State of World Fisheries

- and Aquaculture 2018[R]. Roma: FAO, 2018: 1-209.
- [5] Shi Y C, Chen X J. A review of stock assessment methods on small pelagic fish[J]. Marine Fisheries, 2019, 41(1): 118-128. [石永闯, 陈新军. 小型中上层海洋鱼类资源评估研究进展[J]. 海洋渔业, 2019, 41(1): 118-128.]
- [6] Oozeki Y, Watanabe Y, Kitagawa D. Environmental factors affecting larval growth of Pacific saury, *Cololabis saira*, in the northwestern Pacific Ocean[J]. Fisheries Oceanography, 2004, 13: 44-53.
- [7] Itoh S, Yasuda I, Nishikawa H, et al. Transport and environmental temperature variability of eggs and larvae of the Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) and Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western North Pacific estimated via numerical particle-tracking experiments[J]. Fisheries Oceanography, 2009, 18(2): 118-133.
- [8] Matic-Skoko S, Ferri J, Škeljo F, et al. Age, growth and validation of otolith morphometrics as predictors of age in the forkbeard, *Phycis phycis* (Gadidae)[J]. Fisheries Research, 2011, 112(1-2): 52-58.
- [9] Peck M A, Reglero P, Takahashi M, et al. Life cycle ecophysiology of small pelagic fish and climate-driven changes in populations[J]. Progress in Oceanography, 2013, 116: 220-245.
- [10] Liu Y, Zheng Q A, Li X F. Relationship between *Cololabis saira* fishery distribution patterns and sea surface temperature front in the Northwestern Pacific Ocean[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(12): 1916-1926. [刘瑜, 郑全安, 李晓峰. 西北太平洋公海秋刀鱼渔场分布与海表温度锋的相关关系[J]. 水产学报, 2018, 42(12): 1916-1926.]
- [11] Li F, Chen X J, Zhu Q C, et al. Characteristic analysis of fishing condition of saury in Northwest Pacific under different climate regimes[J]. South China Fisheries Science, 2018, 14(3): 20-28. [李非, 陈新军, 朱清澄, 等. 不同气候模式下西北太平洋秋刀鱼海况特征分析[J]. 南方水产科学, 2018, 14(3): 20-28.]
- [12] Asch R G. Climate change and decadal shifts in the phenology of larval fishes in the California Current ecosystem[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(30): E4065-E4074.
- [13] Post E. Large-scale climate synchronizes the timing of flowering by multiple species[J]. Ecology, 2003, 84(2): 277-281.
- [14] Fiechter J, Rose K A, Curchitser E N, et al. The role of environmental controls in determining sardine and anchovy population cycles in the California Current: Analysis of an end-to-end model[J]. Progress in Oceanography, 2015, 138: 381-398.
- [15] Tian Y J, Ueno Y, Suda M, et al. Decadal variability in the abundance of Pacific saury and its response to climatic/ oceanic regime shifts in the northwestern subtropical Pacific during the last half century[J]. Journal of Marine Systems, 2004, 52(1-4): 235-257.
- [16] Cao J, Chen X J, Chen Y, et al. Influence of surface oceanographic variability on abundance of the western winter-spring cohort of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in the NW Pacific Ocean[J]. Marine Ecology Progress Series, 2009, 381: 119-127.
- [17] Zhang H, Zhang S M. Spatiotemporal distribution pattern of Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) fishing grounds and catch yield per unit effort in Southeast Pacific Ocean[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(6): 1142-1146. [张衡, 张胜茂. 东南太平洋智利竹筴鱼渔场及单位捕捞努力量的时空分布[J]. 生态学杂志, 2011, 30(6): 1142-1146.]
- [18] Hallett T B, Coulson T, Pilkington J G, et al. Why large-scale climate indices seem to predict ecological processes better than local weather[J]. Nature, 2004, 430(6995): 71-75.
- [19] Kwon Y O, Alexander M A, Bond N A, et al. Role of the Gulf Stream and Kuroshio-Oyashio systems in large-scale atmosphere-ocean interaction: A review[J]. Journal of Climate, 2010, 23(12): 3249-3281.
- [20] Tian Y J, Akamine T, Suda M. Variations in the abundance of Pacific saury (*Cololabis saira*) from the northwestern Pacific in relation to oceanic-climate changes[J]. Fisheries Research, 2003, 60(2-3): 439-454.
- [21] McCreary J P Jr, Anderson D L T. An overview of coupled ocean-atmosphere models of El Niño and the southern oscillation[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1991, 96(S01): 3125-3150.
- [22] Hare S R, Mantua N J. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989[J]. Progress in Oceanography, 2000, 47(2-4): 103-145.
- [23] Gong D Y. Large-scale atmospheric circulation and its influence on winter temperature in the northern hemisphere[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(S2): 203-208. [龚道溢. 大尺度大气环流变化及其对北半球冬季温度的影响[J]. 地学前缘, 2000, 7(S2): 203-208.]
- [24] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(9): 1297-1300.
- [25] di Lorenzo E, Schneider N, Cobb K M, et al. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(8): L08607.
- [26] Joh Y, di Lorenzo E. Increasing coupling between NPGO and PDO leads to prolonged marine heatwaves in the northeast

- Pacific[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(22): 11663-11671.
- [27] Hurlburt H E, Wallcraft A J, Schmitz W J Jr, et al. Dynamics of the Kuroshio/Oyashio current system using eddy-resolving models of the North Pacific Ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1996, 101(C1): 941-976.
- [28] Li C Y, Mu M, Zhou G Q, et al. Mechanism and Prediction Studies of the ENSO[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 761-781. [李崇银, 穆穆, 周广庆, 等. ENSO 机理及其预测研究[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 761-781.]
- [29] Lynn R J, Bograd S J. Dynamic evolution of the 1997-1999 El Niño-La Niña cycle in the southern California current system[J]. Progress in Oceanography, 2002, 54(1-4): 59-75.
- [30] Wang C Z, Fiedler P C. ENSO variability and the eastern tropical Pacific: A review[J]. Progress in Oceanography, 2006, 69(2-4): 239-266.
- [31] Yang X S, Zhou X R, Xu X X, et al. Effects of ENSO on abundance index and spatial-temporal change of Chilean jack mackerel in the South[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(2): 290-297. [杨香帅, 邹晓荣, 徐香香, 等. ENSO 现象对东南太平洋智利竹筴鱼资源丰度及其渔场变动的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(2): 290-297.]
- [32] Kasai A, Komatsu K, Sassa C, et al. Transport and survival processes of eggs and larvae of jack mackerel *Trachurus japonicus* in the East China Sea[J]. Fisheries Science, 2008, 74(1): 8-18.
- [33] Sassa C, Takahashi M, Nishiuchi K, et al. Distribution, growth and mortality of larval jack mackerel *Trachurus japonicus* in the southern East China Sea in relation to oceanographic conditions[J]. Journal of Plankton Research, 2014, 36(2): 542-556.
- [34] Lima M, Naya D E. Large-scale climatic variability affects the dynamics of tropical skipjack tuna in the Western Pacific Ocean[J]. Ecology, 2011, 34(4): 597-605.
- [35] Lehodey P, Bertignac M, Hampton J, et al. El Niño southern oscillation and tuna in the western Pacific[J]. Nature, 1997, 389(6652): 715-718.
- [36] Zhou S F. Impacts of the El Niño southern oscillation on skipjack tuna purse-seine fishing grounds in the western and central Pacific Ocean[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 12(6): 739-744. [周甦芳. 厄尔尼诺-南方涛动现象对中西太平洋鲣鱼围网渔场的影响[J]. 中国水产科学, 2005, 12(6): 739-744.]
- [37] Hiyama Y, Yoda M, Ohshimo S. Stock size fluctuations in chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the East China Sea and the Japan/East Sea[J]. Fisheries Oceanography, 2002, 11(6): 347-353.
- [38] Su H, Chen X J, Wang J T. Influence of sea surface temperature changes on *Scomber japonicas* habitat in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(6): 88-96. [苏杭, 陈新军, 汪金涛. 海表水温变动对东、黄海鲈鱼栖息地分布的影响[J]. 海洋学报, 2015, 37(6): 88-96.]
- [39] Sassa C, Takahashi M, Konishi Y, et al. Interannual variations in distribution and abundance of Japanese jack mackerel *Trachurus japonicus* larvae in the East China Sea[J]. ICES Journal of Marine Science, 2016, 73(4): 1170-1185.
- [40] Song H, Miller A J, McClatchie S, et al. Application of a data-assimilation model to variability of Pacific sardine spawning and survivor habitats with ENSO in the California Current System[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117(C3): C03009.
- [41] Nevárez-Martínez M O, Lluch-Belda D, Cisneros-Mata M A, et al. Distribution and abundance of the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) in the Gulf of California and their relation with the environment[J]. Progress in Oceanography, 2001, 49(1-4): 565-580.
- [42] Guo A, Chen X J. The relationship between ENSO and tuna purse-seine resource abundance and fishing grounds distribution in the Western and Central Pacific Ocean[J]. Marine Fisheries, 2005, 27(4): 338-342. [郭爱, 陈新军. ENSO 与中西太平洋金枪鱼围网资源丰度及其渔场变动的关系[J]. 海洋渔业, 2005, 27(4): 338-342.]
- [43] Li G, Zou X R, Chen X J, et al. Standardization of CPUE for Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) from Chinese trawl fleets in the high seas of the Southeast Pacific Ocean[J]. Journal of Ocean University of China, 2013, 12(3): 441-451.
- [44] Chen Y L. Interannual variations in population characteristics of anchovy (*Engraulis japonicus*) and redistribution of its wintering stock under climate change scenarios in the Yellow Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. [陈云龙. 黄海鳀鱼种群特征的年际变化及越冬群体的气候变化情景分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.]
- [45] Guan W J, Chen X J, Li G. Influence of sea surface temperature and La Niña event on temporal and spatial fluctuation of chub mackerel (*Scomber japonicus*) stock in the East China Sea[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011, 20(1): 102-107. [官文江, 陈新军, 李纲. 海表水温和拉尼娜事件对东海鲈鱼资源时空变动的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(1): 102-107.]
- [46] Ormaza-González F I, Mora-Cervetto A, Bermúdez-Martínez R M, et al. Can small pelagic fish landings be used as predictors of high-frequency oceanographic fluctuations in the

- 1–2 El Niño region?[J]. *Advances in Geosciences*, 2016, 42: 61-72.
- [47] Liu Z L, Yuan X W, Yang L L, et al. Effect of climate change on the fisheries community pattern in the overwintering ground of open waters of northern East China Sea[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 901-911. [刘尊雷, 袁兴伟, 杨林林, 等. 气候变化对东海北部外海越冬场渔业群落格局的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 901-911.]
- [48] Chen Y Y, Chen X J. Influence of El Niño/La Niña on the abundance index of skipjack in the Western and Central Pacific Ocean[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2017, 26(1): 113-120. [陈洋洋, 陈新军. 厄尔尼诺/拉尼娜现象对中西太平洋鲣资源丰度的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2017, 26(1): 113-120.]
- [49] Zhang X M. Study on the fishing ground of saury (*Cololabis saira*) in the Northwest Pacific high seas[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016. [张孝民. 西北太平洋公海秋刀鱼渔场研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.]
- [50] Overland J E, Salo S, Adams J M. Salinity signature of the Pacific Decadal Oscillation[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(9): 1337-1340.
- [51] Vimont D J. The contribution of the interannual ENSO cycle to the spatial pattern of decadal ENSO-like variability[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(12): 2080-2092.
- [52] Yu W, Chen X J, Chen C S, et al. Impacts of oceanographic factors on interannual variability of the winter-spring cohort of neon flying squid abundance in the Northwest Pacific Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(10): 48-59.
- [53] Yang Q M. Effect of PDO on the interannual relationships between summer rainfall in the Yangze River and the Huaihe River valley and SST in the Pacific Ocean[J]. *Marine Sciences*, 2007, 31(7): 43-50. [杨秋明. PDO 对夏季江淮地区雨量与太平洋海温年际相关的影响[J]. *海洋科学*, 2007, 31(7): 43-50.]
- [54] Liu Z N, Chen X J. Forecasting model of abundance index of *Cololabis saira* in the Northwest Pacific under different climate condition[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 40(6): 74-82. [刘祝楠, 陈新军. 不同气候模态下西北太平洋秋刀鱼资源丰度预测模型建立[J]. *海洋学报*, 2018, 40(6): 74-82.]
- [55] Wang J T, Chen X J, Chen Y. Spatio-temporal distribution of skipjack in relation to oceanographic conditions in the west-central Pacific Ocean[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(24): 6149-6164.
- [56] Zhou X, Sun Y, Huang W, et al. The Pacific decadal oscillation and changes in anchovy populations in the Northwest Pacific[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 114: 504-511.
- [57] Yatsu A. Review of population dynamics and management of small pelagic fishes around the Japanese Archipelago[J]. *Fisheries Science*, 2019, 85(4): 611-639.
- [58] Yatsu A, Watanabe T, Ishida M, et al. Environmental effects on recruitment and productivity of Japanese sardine *Sardinops melanostictus* and chub mackerel *Scomber japonicus* with recommendations for management[J]. *Fisheries Oceanography*, 2005, 14(4): 263-278.
- [59] Zhang L C, Guo A, Chen X J. Stock assessment of chub mackerel (*Scomber japonicus*) based on environmental and climatic factors[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2018, 38(1): 32-38. [张良成, 郭爱, 陈新军. 基于气候和环境因子的近海鲈鱼资源评估[J]. *广东海洋大学学报*, 2018, 38(1): 32-38.]
- [60] McClatchie S. Sardine biomass is poorly correlated with the Pacific Decadal Oscillation off California[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(13): L13703.
- [61] Francis R C, Hare S R, Hollowed A B, et al. Effects of interdecadal climate variability on the oceanic ecosystems of the NE Pacific[J]. *Fisheries Oceanography*, 1998, 7(1): 1-21.
- [62] Takahashi M, Watanabe Y, Kinoshita T, et al. Growth of larval and early juvenile Japanese anchovy, *Engraulis japonicus*, in the Kuroshio-Oyashio transition region[J]. *Fisheries Oceanography*, 2001, 10(2): 235-247.
- [63] Yatsu A, Chiba S, Yamanaka Y, et al. Climate forcing and the Kuroshio/Oyashio ecosystem[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2013, 70(5): 922-933.
- [64] Miller A J, Chai F, Chiba S, et al. Decadal-scale climate and ecosystem interactions in the north Pacific Ocean[J]. *Journal of Oceanography*, 2004, 60(1): 163-188.
- [65] Chen X J. An analysis on marine environment factors of fishing ground of ommastrephes bartrami in northwestern Pacific[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 1997, 6(4): 263-267. [陈新军. 关于西北太平洋的柔鱼渔场形成的海洋环境因子的分析[J]. *上海水产大学学报*, 1997, 6(4): 263-267.]
- [66] Jiang W P, Peng L F, Jin T Y, et al. Variability of the Kuroshio extension system in 1992-2013 from satellite altimetry data[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2017, 8(2): 103-110.
- [67] He P C, Jiang J. Effect of PDO on the relationships between large scale circulation and tropical cyclone activity over the western north Pacific[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2011, 31(3): 266-273. [何鹏程, 江静. PDO 对西北太平洋热带气旋活动与大尺度环流关系的影响[J]. *气象科学*, 2011, 31(3): 266-273.]

- [68] Mugo R, Saitoh S I, Nihira A, et al. Habitat characteristics of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) in the western North Pacific: A remote sensing perspective[J]. Fisheries Oceanography, 2010, 19(5): 382-396.
- [69] Chiba S, Aita M N, Tadokoro K, et al. From climate regime shifts to lower-trophic level phenology: Synthesis of recent progress in retrospective studies of the western North Pacific[J]. Progress in Oceanography, 2008, 77(2-3): 112-126.
- [70] Tian Y J, Akamine T, Suda M. Modeling the influence of oceanic-climatic changes on the dynamics of Pacific saury in the northwestern Pacific using a life cycle model[J]. Fisheries Oceanography, 2004, 13: 125-137.
- [71] Shen J H, Han S X, Fan W, et al. Saury and fishing grounds in the northwest Pacific[J]. Marine Fisheries, 2004, 26(1): 61-65. [沈建华, 韩士鑫, 樊伟, 等. 西北太平洋秋刀鱼资源及其渔场[J]. 海洋渔业, 2004, 26(1): 61-65.]
- [72] Hua C X, Zhu Q C, Xu W. Fishing ground distribution of cololabis saira in the Northwestern Pacific of summer[J]. Shandong Fisheries, 2010, 27(10): 10-13. [花传祥, 朱清澄, 许巍. 夏季西北太平洋公海秋刀鱼渔场时空分布[J]. 齐鲁渔业, 2010, 27(10): 10-13.]
- [73] Watanabe Y, Kurita Y, Noto M, et al. Growth and survival of Pacific saury *Cololabis saira* in the Kuroshio-Oyashio transitional waters[J]. Journal of Oceanography, 2003, 59(4): 403-414.
- [74] Qiu B, Miao W F. Kuroshio path variations south of Japan: Bimodality as a self-sustained internal oscillation[J]. Journal of Physical Oceanography, 2000, 30(8): 2124-2137.
- [75] Sugimoto T, Kobayashi M. Numerical studies on the influence of the variations of the Kuroshio Path on the transport of fish eggs and larvae[J]. GeoJournal, 1988, 16(1): 113-117.
- [76] Chenillat F, Rivière P, Capet X, et al. North Pacific Gyre Oscillation modulates seasonal timing and ecosystem functioning in the California Current upwelling system[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(1): L01606.
- [77] Ceballos L I, Lorenzo E D, Hoyos C D, et al. North Pacific gyre oscillation synchronizes climate fluctuations in the eastern and western boundary systems[J]. Journal of Climate, 2009, 22(19): 5163-5174.
- [78] Asch R G. Climate change and decadal shifts in the phenology of larval fishes in the California Current ecosystem[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(30): E4065-E4074.
- [79] Chen S F, Wu R G. Impacts of winter NPO on subsequent winter ENSO: Sensitivity to the definition of NPO index[J]. Climate Dynamics, 2018, 50(1-2): 375-389.
- [80] Yu J Y, Lu M, Kim S T. A change in the relationship between tropical central Pacific SST variability and the extratropical atmosphere around 1990[J]. Environmental Research Letters, 2012, 7(3): 034025.
- [81] Chen S F, Wu R G, Chen W. A strengthened impact of November Arctic oscillation on subsequent tropical Pacific sea surface temperature variation since the late-1970s[J]. Climate Dynamics, 2018, 51(1-2): 511-529.
- [82] Lü Q P, Lu K C, Zhang M. NPGO mode of the upper sea temperature anomalies in the North Pacific during winter[J]. Climatic and Environmental Research, 2013, 18(2): 210-220. [吕庆平, 路凯程, 张铭. 北太平洋冬季上层海温异常的NPGO模态[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(2): 210-220.]
- [83] Lin P F, Chai F, Xue H J, et al. Modulation of decadal oscillation on surface chlorophyll in the Kuroshio Extension[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(1): 187-199.
- [84] Zhang Z E, Holmes J, Teo S L H. A study on relationships between large-scale climate indices and estimates of North Pacific albacore tuna productivity[J]. Fisheries Oceanography, 2014, 23(5): 409-416.
- [85] Forchhammer M C, Post E. Using large-scale climate indices in climate change ecology studies[J]. Population Ecology, 2004, 46(1): 1-12.
- [86] Fang Z, Chen Y Y, Chen X J, et al. Influence of environmental factors on the abundance of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) in west-central Pacific Ocean determined using different models[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(5): 1123-1130. [方舟, 陈洋洋, 陈新军, 等. 基于不同模型研究环境因子对中西太平洋鲣资源丰度的影响[J]. 中国水产科学, 2018, 25(5): 1123-1130.]

Review on the response of small pelagic fishery resources in the North Pacific to climate-ocean changes

WANG Liang¹, HUA Chuanxiang^{1,2,3}, ZHU Qingcheng^{1,2,3}, LI Fei¹

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education; Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Small pelagic fishes are an important fishery resource in the Pacific Ocean. Generally, they have the characteristics of a short life cycle, fast growth rate, and high clustering, etc. Their resources fluctuate significantly from year to year and are affected by climate-ocean changes. In this study, the characteristics of the key climate-oceanic indexes, such as El Niño/La Niña-Southern Oscillation (ENSO), Pacific Decadal Oscillation (PDO), Kuroshio-Oyashio (KR-OY) and their influence on habitat environment and fish resource variations were reviewed, focusing on six main small pelagic fishes, including saury (*Cololabis saira*), skipjack (*Katsuwonus pelamis*), chub mackerel (*Scomber japonicus*), anchovy (*Engraulis japonicus*), jack mackerel (*Trachurus japonicus*), and sardine (*Sardina pilchardus*). The climate-oceanic changes that directly influence migration distribution and resource abundance of small pelagic fishes and indirectly delay the influence on parental reproduction and spawning, larval and juvenile survival rate, and resource fluctuation were summarized. The review included the following suggestions: (1) the construction of a biomass dynamic model by adding parameters, such as population dynamic processes, fishing mode coefficients, and natural mortality rates based on several climate-ocean indexes to reveal the influence of climate-ocean change on fishery resource quantity; (2) analyzing the effects of large-scale ocean currents and mesoscale vortexes on small pelagic fish based on physical ocean models and spatially coupled hydrodynamics models, combined with other major north Pacific climates such as North Pacific Oscillation (NPO), North Pacific Gyre Oscillation (NPGO), and Arctic Oscillation (AO).

Key words: small pelagic fish; climate-oceanic index; habitat change; resource abundance; North Pacific

Corresponding author: HUA Chuanxiang. E-mail: cxhua@shou.edu.cn