

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2019.18432

北太平洋秋刀鱼生活史和资源渔场研究进展

花传祥^{1,2}, 朱清澄^{1,2}, 许巍¹, 宋利明^{1,2}, 李非¹

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306

摘要: 北太平洋秋刀鱼(*Cololabis saira*)是中国重要的远洋渔业鱼种, 被北太平洋渔业委员会列为优先管理的种类之一。本文回顾和概述了秋刀鱼生活史、种群动力、资源渔场和栖息地适宜性等方面的研究进展, 分析和展望了秋刀鱼生长生物学、繁殖生物学、洄游、资源波动和栖息地适宜性等研究现状和未来的发展趋势。主要建议包括: 基于耳石微化学信息和最适环境参数的时空分布变动, 探索秋刀鱼潜在的洄游路径和模式; 建立繁殖栖息地适应性指数模型, 分析海洋-气候对秋刀鱼补充群体潜在栖息地的影响; 建立秋刀鱼集群栖息地适宜性指数模型, 开发秋刀鱼渔场渔情速报系统。本文的概述和分析旨在为秋刀鱼渔业资源等相关研究提供参考。

关键词: 秋刀鱼; 生活史; 资源; 渔场

中图分类号: S917; S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2019)04-0811-11

北太平洋秋刀鱼(*Cololabis saira*)是竹刀鱼科(*Scomberesocidae*)现存种类的近代分支^[1], 广泛分布于从中国东海、日本海至美国沿岸的北太平洋海域^[2], 且分布在中国东海、鄂霍次克海、西北太平洋、中北太平洋和东北太平洋的秋刀鱼种群基因遗传结构无显著性差异^[1]。秋刀鱼属于高度洄游的鱼种, 其洄游路线很长, 在西北太平洋海域, 夏季从亚热带向北穿过黑潮-亲潮交汇区向北洄游, 秋季再向南回到日本和俄罗斯远东沿岸海域^[3], 渔场主要分布在日本海、太平洋海域和鄂霍次克海^[2]。近年来, 主要秋刀鱼生产国家和地区有: 日本、中国、俄罗斯、韩国和瓦努阿图, 近 5 年总渔获量在 35 万~60 万 t^[4]。中国从 2003 年开始在鱿钓渔船上加装秋刀鱼舷提网设备, 赴西北太平洋公海从事秋刀鱼试生产^[20], 2017 年前, 最高年产量超过 6.3 万 t(2014 年)^[4]。

20 世纪 40 年代末, 舷提网代替刺网作为秋刀鱼渔业主要的生产方式以后^[5], 秋刀鱼年产量迅速增加^[2, 6-7], 但年产量在 20 世纪 50 年代末达到

50 万 t 以后, 便长期呈现波动状态^[4]。为了深入认识秋刀鱼的资源状况和影响因素, 近十年来, 相关科研人员基于渔业生产、港口采样、科学调查、实验室饲养观测等, 开展了产卵行为和仔稚体^[9-10]、年龄^[11]和生长^[12, 21]、发育和性成熟^[13]、洄游^[14]、渔场海洋环境^[15]、渔情预报^[16, 22]、种群动力和气候^[17-18, 23]、资源调查和评估^[19]等方面的研究。主要发现有, 基于耳石微结构获取秋刀鱼日龄方面的研究, 揭示了秋刀鱼的生命周期以及环境条件对秋刀鱼各生活史阶段的生长、性成熟和产卵的影响; 基于资源丰度及影响因素的关系研究, 揭示了海洋-气候变动是秋刀鱼资源长期波动的主要原因; 基于栖息地适宜性方面的研究, 揭示了秋刀鱼渔场形成的主要机制, 并建立了相关渔情预报模式。

秋刀鱼已被北太平洋渔业管理委员会列为优先管理鱼种之一^[4], 相关资源评估和管理方案制定等工作已被纳入议事日程。因此, 较为全面和深入地认识和了解北太平洋秋刀鱼生活史、种群

收稿日期: 2018-12-24; 修订日期: 2019-01-17.

基金项目: 国家科技支撑计划课题项目(2013BAD13B05).

作者简介: 花传祥(1982-), 博士研究生, 工程师, 研究方向为渔业海洋学和远洋渔业系统集成. E-mail: cxhua@shou.edu.cn

通信作者: 朱清澄, 教授, 研究方向为渔具渔法及海洋渔业资源管理. E-mail: qczechu@shou.edu.cn

动力、资源渔场等方面研究的进展和成果,可为更加合理和有效地开展秋刀鱼资源评估研究、管理措施制定和渔情预报开发等提供参考。

1 秋刀鱼生活史研究

秋刀鱼的生命周期约为 2 年^[8],其生活史一般可划分为 6 个阶段:孵化卵、仔体期、稚体期、青鱼期、近成熟期、成年期^[24]。

1.1 生长与年龄

耳石是研究鱼类年龄和生长的重要手段^[25],通过耳石的年轮和日轮可以准确地推算出孵化日期和记录鱼类生活史^[26]。基于电子扫描显微镜获得的耳石核心区剖面上的轮纹微结构,可以较为准确地推算出秋刀鱼个体的日龄^[27]。秋刀鱼耳石核心的剖面上的轮纹数(N)与日龄(D)存在线性关系: $N=4.81+1.01 \times D$ ($n=45$, $r^2=0.99$)^[28]或 $N=6.37+0.985 \times D$ ($n=275$, $r^2=0.991$)^[29],耳石上的轮纹数与日龄相差 5~7 d,说明秋刀鱼卵从产出至孵化大约需要 1 周^[30]。

实验室饲养研究表明^[29],秋刀鱼鱼体生长和耳石生长呈显著性相关,说明可以使用耳石研究秋刀鱼的年龄和生活史。秋刀鱼卵在孵化后的 114 d 达到 100 mm,在 182 d 达到 200 mm^[31]。在 200 d 以后的生长有些争议,比如, Watanabe^[31]认为 11 个月达到 300 mm,而巢山哲等^[32]认为在第 19 个月达到 300 mm。这可能是由于秋刀鱼样本来自不同的栖息地环境所致。

秋刀鱼耳石宽度(从核心至边缘)的日增长量一般有两个高峰期,第一个高峰期出现在第(22.9±9.6) d 附近,然后第一个低谷期是在第(88.6±25.3) d 附近,第二个高峰期出现在第(143.8±34.6) d 附近。秋刀鱼体长增长的峰值期与耳石宽度增长的峰值期接近^[33]。秋刀鱼生长的高峰期和低谷期可能是由于在春季至夏季期间,秋刀鱼从温暖、低饵料丰度的黑潮(亚热带)向低温、高饵料丰度的亲潮(亚北极)水域洄游所致^[33]。

水温对秋刀鱼鱼体和耳石生长均有影响,秋刀鱼在早期生活史(0~30 d)阶段^[29],在 14~22℃ 温度范围内,水温越高,鱼体生长速度越快,但在 24℃ 水温条件下的生长率则低于 20℃ 水温条

件下的生长率。而在 14~24℃ 温度范围内,耳石增长率随水温的增加而增加。另外,秋刀鱼耳石生长(半径增长率)和鱼体生长(体长增长率)存在季节性差异^[27]。8 月以前,小于 1 年(age-0)的秋刀鱼体长和耳石半径均随年龄增长而增长,8 月以后,耳石半径继续增加,但体长增长率降低,即耳石半径增长率相对体长增长率增加。因此,在基于体长数据反算耳石半径的时候需要考虑耳石半径增长率和体长增长率的季节性变化^[12]。

当秋刀鱼生长至肉体长(从秋刀鱼下颌的前端到尾柄上的肌肉凸起的最后端的距离)大于 200 mm 后,秋刀鱼耳石开始出现透明带^[34],在耳石出现透明带后,耳石边缘轮纹不能读取的比例会有所增加。但通过检测耳石透明带可以区分 age-0 和 age-1(大于 1 年的鱼)^[11],Logistics 曲线拟合发现,50%的样本个体达到 age-1 时的肉体长范围为 277.8~304.7 mm; age-1 的优势体长为 303.9~325.9 mm^[11]。港口采样时,一般会将秋刀鱼渔获物分成小型群、中型群和大型群 3 个尺寸^[8],小型群的肉体长范围为 200~240 mm ($\mu=210$ mm);中型群肉体长范围为 240~295 mm ($\mu=260$ mm);大型群的肉体长大于 295 mm ($\mu=315$ mm),大型群的生长率比中型群的生长率更加稳定^[11]。分析发现^[11]秋刀鱼大型群日龄为 560~690 d,且存在耳石透明带,而中型群日龄为 310~450 d,且一般没有透明带。不同海域的秋刀鱼生长模式也有不同,160°E 以西的秋刀鱼渔获样本的 age-1 体长高于 170°以东海域,但这两组群体的透明带的日龄并没有显著性差异^[35]。生长差异可能是由于这两个群体的栖息地的不同造成的。

基于秋刀鱼耳石微结构获取日龄的研究,为秋刀鱼年龄和生长研究开辟了新的道路和方向,纠正了原来认为的秋刀鱼生命周期为 3~4 年的错误看法,虽然不同学者对秋刀鱼生长和基于耳石的年龄鉴定做了较为深入的研究,甚至使用饲养手段研究了环境(水温)对生活史早期的秋刀鱼的生长的影响。但在野外条件下的实际生活史过程中,秋刀鱼耳石生长模式在不同的季节有变化,比如:在 7 月以前,秋刀鱼耳石宽度增长迅速且厚度同时增长,但 8 月以后,厚度的增长逐渐停止。

10 月以后, 超过 80%的耳石只有径向(长轴方向)增长^[27]。不同季节生长模式的不同, 以及透明带、高峰期形成的原因和个体差异与生境条件(摄食)条件的关系还不是很明确。Methot 等^[25]首次提出了耳石近期生长率可以用来研究鱼体生长及与环境因子的关系。因此, 基于较高时间和空间分辨率的耳石近期生长率(轮纹数量和宽度等)和海洋环境因子的关系, 也许可以进一步揭示海洋环境条件对于秋刀鱼不同生活史阶段生长的影响。

1.2 性腺发育和产卵

秋刀鱼卵巢内的卵母细胞的发育阶段一般被分为 7 期^[36-37]: (1)周仁期: 细胞质逐渐增加, 滤泡细胞厚度也增加; (2)表层囊泡前期: 细胞质内开始出现少数表层囊泡且呈不规则排列, 随着数量

增加, 以细胞核为中心, 呈现 2~3 圈同心圆排列; (3)表层囊泡后期: 表层囊泡数量继续增加, 并向细胞核聚集, 占细胞质 1/2 以上; (4)初级卵黄球期: 细胞质内出现卵黄颗粒, 卵黄物质堆积融合后的卵黄球大小不超过细胞核; (5)次级卵黄球期: 卵黄球大小超过细胞核径; (6)第三级卵黄球期: 细胞质几乎被大块卵黄物质所占据; (7)完熟期: 卵黄完全融合, 核膜消失。

秋刀鱼卵巢为非同期卵发育类型^[32, 37], 即秋刀鱼雌体卵巢内同时存在有连续不同发育阶段的卵母细胞^[36]。根据卵巢中发育程度最高的卵母细胞发育期, 秋刀鱼雌体性腺成熟度一般可分为 6 期(表 1)^[32, 37]: 卵黄泡前期、卵黄泡后期、卵黄球形成期、成熟期/完熟期、退行期 I 期、退行期 II 期^[32]。

表 1 秋刀鱼卵巢各成熟期对应的基础生物学参数^[32]
Tab. 1 Bio-information of Pacific saury in each ovary development stage^[32]

	卵黄泡前期 early cortical alveoli stage	卵黄泡后期 late cortical alveoli stage	卵黄球形成期 yolk formation stage	成熟期/完熟期 maturation stage	退行期 I 期 atretic stage I	退行期 II 期 atretic stage II
肉体长/mm knob length	243–326	274–327	324	314–342	305–322	303–328
性腺湿重/g gonad wet weight	0.21±0.10	0.54±0.17	4.28	5.45±3.31	1.22±0.21	0.57±0.18
性腺指数 gonad somatic index	0.20±0.06	0.34±0.08	2.96	3.49±1.82	0.74±0.15	0.34±0.12

在实验室 20℃饲养条件下的秋刀鱼繁殖生活史研究发现^[13], 日龄到 140 d 时, 可通过性腺分辨其性别; 日龄到 240 d 时, 性腺指数大于 1; 出现首次产卵的样本日龄为 243 d, 肉体长大约为 250 mm, 开始时, 单个样本每次产卵数在几十至几百枚; 当日龄超过 260 d 以后, 产卵量显著增加, 且产卵一般持续 90 d 以上。在产卵前期的未成熟体和成熟体中缺少 VB 正向小动脉^[38], 但在完成产卵以后的雌体中存在 VB 正向小动脉。因此, 存在 VB 正向小动脉的秋刀鱼雌体可以被认为是已完成产卵的个体; 而没有 VB 正向小动脉的秋刀鱼雌体可以被认为是“实际上未产卵”的鱼, 且可能包括已产卵数次的鱼和完全未产卵的鱼。不同水温条件对秋刀鱼的产卵行为有影响^[39], 低水温会限制成熟个体的产量行为, 在水温达到 17℃时, 产卵数激增。

一般认为^[40], 秋刀鱼在秋季后期和冬季南下洄游过程中产卵。在秋季早期, 出现在亲潮海域的

秋刀鱼以未成熟体个体为主^[41]。在冬季和春季^[42], 出现在黑潮海域的秋刀鱼绝大部分是成熟体。在春季, 出现在亲潮–黑潮混合水域的秋刀鱼有 70%的成熟体。这说明, 就秋刀鱼产卵而言, 最重要的海域是黑潮海域, 最重要的季节是冬季。Huang 等^[43]报道指出, 5 月来自 165°E 以东的秋刀鱼雌体样本多数达到次级卵黄球期, 这些样本可能来自另外的产卵群体^[14]。

由于秋刀鱼卵巢为非同期卵发育类型^[36], 个体产卵时间很长^[13], 且卵巢在卵黄球形成期生长迅速^[32], 所以目测等级法^[44]不适用于划分秋刀鱼性腺成熟度。而基于卵巢切片的组织学研究是秋刀鱼繁殖特征和发育阶段划分研究的有效技术手段, 可以深入研究秋刀鱼繁殖特性。但目前已有的研究, 可能是受限于样本数量或实验条件, 目前所报道的各发育阶段的性腺指数或性腺湿重等参数^[32]的精度和可靠性还可以进一步提升。划分的标准也可能需要调整, 如退行期 I 期和退行期 II

期可以合并,卵黄球形成期可以再细化划分等。

在日本海海域的调查结果显示^[45],秋刀鱼在海水表层产卵,卵粒常附着在漂浮的藻类上面^[37],在 30 m 水深也有发现过秋刀鱼鱼卵,且在全年所有季节均有产卵,产卵场分布较广。Iwahashi 等^[30]分析发现,在西北太平洋海域,秋刀鱼产卵场分布从日本南部沿海向东一直延伸至 170°E,冬春季的产卵场分布范围比夏秋季的范围大,且秋刀鱼卵和仔体主要分布在 17~21℃ 水温海域。巢山哲等^[32]报道也指出,产卵样本来自 19.8℃ 高水温海域。为此可基于海洋环境参数开展秋刀鱼繁殖适应性研究,建立秋刀鱼潜在繁殖栖息地模型,可为进一步研究海洋-气候对秋刀鱼补充群体潜在栖息地的影响及资源波动提供参考。

1.3 摄食和洄游

秋刀鱼的摄食习性随不同生活史阶段和位置不同^[46]。小于 15 mm 的仔体主要摄食对象是藻类。而大于 15 mm 以后的仔体和稚体则主要捕食哲水蚤(*Calanus* sp.)。夏季青鱼期的秋刀鱼洄游到混合水域后,主要捕食太平洋磷虾(*Euphausia pacifica*)。在亲潮海域它们主要捕食磷虾和毛颚类浮游动物(*Neocalanus cristatus*)并在这个季节达到最大摄食量。秋季在向南洄游的过程中,它们主要捕食磷虾和毛颚类,但是摄食量降至最低。在冬季到达产卵场后,它们主要摄食桡足类(Copepods),虽然浮游生物的丰度不高,但秋刀鱼的摄食量比秋季大^[47]。秋刀鱼每日摄食量随季节和体长的变化而不同,日间摄食量在春季和夏季随体长增长而增加,而在秋冬季则近似保持不变^[48]。

在早期生活史阶段,秋刀鱼仔稚体分布的水温范围较广,而随着秋刀鱼的成长,逐渐向 17℃ 靠近^[5]。因此秋刀鱼幼体对水温的容忍范围比成体大。相比成体,秋刀鱼幼体在温暖的季节分布在更高水温海域,而寒冷季节栖息在更低水温海域。垂直洄游方面,基于声呐观察发现,在夜晚,秋刀鱼特别喜欢在 5 m 的范围之内,在光照条件下,秋刀鱼可扩散至 30~40 m。白天的垂直分布可能与浮游甲壳类的分布深度有关。

在西北太平洋海域,秋刀鱼洄游路线很长,秋季,秋刀鱼从混合区域南下开始洄游,冬季到

达黑潮海域,春季返回混合海域^[9]。仔稚体被水平输送至黑潮延伸区,然后沿着混合水域北上向亲潮海域洄游摄食和生长。经过充分摄食后,它们返回黑潮海域产卵^[49]。在北太平洋外海(日俄专属经济区以外),秋刀鱼在夏季早期就有聚集现象^[14];6—7 月的洄游路线为向西或向西北洄游。在夏季后期和秋季早期,秋刀鱼沿亲潮锋面南下洄游。在索饵洄游末期,秋刀鱼大型群沿着亲潮第一分支向日本专属经济区洄游,其他部分则沿着亲潮第二分支向外海水域洄游。由于海洋环境条件年间变化大,南下洄游的强度年间变化很大^[50]。不同海域的秋刀鱼产卵洄游的时间不同,在日俄专属经济区东北海区产卵洄游出现在冬季和春季,而在外海则出现在春季^[14]。Suyama 等^[51]比较了 6—7 月(渔季之前)和 8—11 月(渔季),分别在日本沿岸至 165°W 所采集的样本耳石年轮半径发现,从东往西耳石年轮半径减小;从 8 月至 11 月耳石年轮半径也减小。在渔季高峰 10 月采集的样本的耳石年轮半径与 160°E 以东海域内的相等,说明在渔季高峰期间日本渔船捕获的秋刀鱼来自 160°E 以东海域。

海洋环境对秋刀鱼洄游有重要的影响,海表面温度升高及尺度降低将阻止或延缓秋刀鱼在冬季的南下洄游^[52]。比较黑潮暖涡和鱼群二者之间的分布发现^[53],秋刀鱼总是回避暖涡旋,似乎喜欢选择较冷的水域作为其洄游路线^[54]。这说明黑潮暖涡通过和周围冷水的相互作用影响秋刀鱼南下洄游路线。Watanabe 等^[55]在考虑了秋刀鱼向最适海表面温度海域游动和从其适宜水温的最冷区域游出这两个假设条件下,建立了秋刀鱼资源的时间和空间的洄游模式模型,结果显示,向南往近海海域的洄游率与水温的分布有关。

目前,国内外的学者在秋刀鱼洄游模式或路线上,一般的共识为春-夏季北上索饵洄游,秋-冬季南下产卵洄游,主要采用的方法有:(1)基于生产或调查数据(即秋刀鱼聚集时空信息的观测数据),建立时间序列下的(周、旬、月等)分布和变动;(2)基于耳石透明带特征进行的渔获样本空间比较。主要的结论是日俄近海海域的秋刀鱼沿岸北上,而在外海海域秋刀鱼从 38°~41°N、160°~

170°E 附近海域向西北方向洄游, 然后再沿日俄沿岸(或亲潮)南下洄游。基于观测数据一般获得的是渔场分布和变动规律, 一般反映的是秋刀鱼集群位置的分布和变动, 受生产或调查的时间和空间的限制, 这个集群分布和变动并不能完全反映秋刀鱼洄游的模式或路线。从已有生产调查的渔获物组成看^[56], 秋刀鱼存在多个生活史阶段的个体混栖现象, 另外, 在10月和11月在南部海区的渔获中有大量小个体样本, 且8月在北部海区, 也存在性腺指数大于3.5的个体。因而, 秋刀鱼北上南下洄游的动因可能是为了寻找合适的生境环境(海表面水温可能反映了适宜的环境, 海表面水温梯度或海表面高度可能反映了索饵机会)。为此可以通过耳石微化学比较样本孵化地和采集地的关系, 并结合最适海洋环境参数值的时空分布和变动, 探讨秋刀鱼潜在洄游模式或路径。

2 种群动力和海洋—气候影响

2.1 补充群体及影响

早期生活史阶段的生长和存活率被认为是补充量波动的主要因素, 补充量将影响资源量的大小^[10]。仔稚体的分布和丰度也可能影响秋刀鱼的洄游和聚集。目前有关秋刀鱼仔稚体的研究报道主要是基于调查数据的基础上进行的仔稚体生长^[10]、时空分布^[30]、环境因子影响^[18, 57]等研究, 相关研究较为全面和深入。

冬季秋刀鱼群体中仔体比例最高, 说明产卵活动在冬季最高^[9]。产卵后, 秋刀鱼鱼卵在孵化前约1周的时间内, 将漂流在复杂而强烈变化的黑潮及其延伸区的海域中。粒子跟踪数值算法研究结果显示^[58], 大量秋刀鱼稚体被输送至黑潮流轴南部海域, 在黑潮轴线南部高稚体输送率说明, 广泛的扩散机制可使得仔稚体寻找合适的栖息地。虽然只有很少量(3.9%)的仔体被输送扩散至黑潮延伸区北部, 但秋刀鱼种群补充量却依靠这部分仔体的输送量。另外, 输送至黑潮延伸区北部海域稚体(肉体长约为40 mm)的丰度与秋季渔季中型群的丰度呈正相关关系。

秋刀鱼仔体的生长主要受海表面温度和饵料丰度影响^[10]。冬季(12月至2月), 秋刀鱼仔体在

黑潮海域的生长率比较稳定, 并且与冬季太平洋十年涛动指数存在显著性正相关关系^[10]。秋刀鱼仔体在黑潮流轴区和离岸区(高水温、高盐度、低叶绿素a浓度)的分布密度高于近岸区(低水温、低盐度、高叶绿素a浓度), 但这3个海区的秋刀鱼仔体生长率没有明显差异^[59]。

秋刀鱼仔体的出现和密集与海洋环境因素关系密切, 最适栖息地海表面水温为19~20℃, 海表面盐度为34.75~34.80^[17]。另外, 秋刀鱼仔体栖息海域的海表面水温存在季节性不同^[30], 在秋冬季(9月至翌年2月), 秋刀鱼仔体栖息海域的海表面水温为19℃左右, 而春季(3月至6月)栖息海域的海表面水温为16.5℃左右。在黑潮轴线离岸一侧海域的秋刀鱼仔稚体的丰度较高^[60]。除了水温以外, 混合层深度对秋刀鱼群体补充量也有影响^[17]。在黑潮海域, 冬生群体的生长率和死亡率相对稳定, 而在亲潮—黑潮混合水域的秋生群和冬生群体的生长率和死亡率在不同季节间有差异。春季稚体的存活补充量最大, 而秋季稚体存活补充量最小。洄游前期稚体的数量在冬生群中与仔体的最小尺寸组有关, 而在春生群和秋生群体中与仔稚体的总存活率有关^[9]。在商业渔获中, 冬生群的比例相对稳定, 秋生群和春生群的比例存在年间变动。秋刀鱼总补充量与冬季仔稚体的存活量有关, 因此在西北太平洋海域可以通过估算洄游前期的仔稚体数量来预测秋刀鱼各季节群体的补充量。冬生群体的补充量不仅受仔稚期持续时间的影响, 而且还受其他生物性或非生物性因素的影响, 比如, 环境影响下的仔体期的死亡率和捕食者(天敌)种群的数量等^[10]。

2.2 资源丰度及影响

一般认为, 渔港渔获分类中的大型群、中型群、小型群, 分别与秋刀鱼各孵化的季节形成的群体, 即, 秋生群、冬生群和春生群有关^[61], 秋刀鱼大型群包含秋生群和冬生群^[62], 在商业生产中中型群与大型群和小型群的年间波动与洄游前期的冬生群的数量波动一致^[9]。秋刀鱼资源量的波动与补充量的多寡有关, 且种群数量的剧烈降低与过度捕捞无关^[63]。而秋刀鱼补充量的波动与海洋—气候环境的波动和饵料丰度有关^[53]。在20世

纪 50 年代和 90 年代仔体和稚体秋刀鱼的饵料环境较为丰富, 而 70 年代和 80 年代较为贫乏^[17], 这与 70 年代秋刀鱼资源丰度(一般使用单位捕捞努力量渔获量表示)和捕捞量的剧烈波动相吻合。另外, 在 20 世纪 70 年代末期的日本海海域^[64], 低营养的暖水团侵入导致补充海域的初级生产力减少, 以及春季到达的秋刀鱼错过索饵场可能是导致秋刀鱼补充量剧烈减少的主要原因, 混合层深度和临界深度的比较结果也支持这个观点。

大尺度海洋气候变动对秋刀鱼资源丰度有强烈的影响^[3, 23-24], 秋刀鱼资源的年间波动与南方涛动指数^[65]和太平洋冬季季风指数^[6]相关。此外, 黑潮延伸区的海表面水温对秋刀鱼资源丰度的长期变动也有重要影响^[66], 在 1979—2006 年(1994—2002 年除外), 秋刀鱼资源丰度和前一年的冬季黑潮海域海表面水温成正相关。与此对应, 在 1994—2002 年, 资源丰度与前一年春季黑潮—亲潮交汇区及黑潮延伸区的混合层深度呈正相关^[18]。在 1994—1997 年, 春季混合层深度异常变深, 在 1998—2002 年出现异常气候条件。这说明秋刀鱼补充群体变动一般受冬季黑潮海域的海表面水温的影响。为此, 当观测到海洋—气候异常变动时, 合适的管理措施可以降低过度捕捞对补充群体的影响^[64]。

将秋刀鱼分为大型群、中型群和小型群是日本学者在港口采样时使用的分类方法, 在生产调查发现^[56], 各月渔获物中均有 200~320 mm 的秋刀鱼个体, 优势体长为 260~300 mm, 说明秋刀鱼鱼群有多个生活史阶段的个体混栖现象。在科学研究中, 使用人为设定的硬性条件划分的群体进行种群与海洋—气候变动之间的研究, 所获得结果的实际理论或应用价值可能较低。为此, 基于秋刀鱼生长或繁殖信息进行的群体组成划分可能会获得更合理的结果, 比如, 基于耳石信息或性腺指数获得的未成熟体的比例作为补充指数进行相关研究等。

3 渔场与栖息地指数

3.1 形成渔场的海洋环境特征

秋刀鱼渔业渔场与海洋环境关系研究的主要数据源包括生产数据和海洋环境数据, 其中, 生

产数据主要为商业生产渔捞日志数据、渔业调查数据或通过高分辨率光学遥感卫星图像获取的渔船生产位置数据等。海洋环境数据多来自卫星遥感数据, 一般包括海表面水温、海表面盐度、海表面叶绿素 a 浓度、净初级生产力、海表面高度、海洋涡动能等, 研究方法主要是将生产数据和海洋环境数据时空配准后, 进行相关性分析和空间分布变动分析等。

秋刀鱼渔场主要出现在日俄专属经济区及以东海域, 在该海域主要的海流有黑潮和亲潮。在这两个海流最西边缘海区, 存在一个交汇区, 并存在许多脱离了黑潮和亲潮的涡旋, 进而导致该海域复杂的物理海洋环境特征^[49]。这些物理特征对当地的生物动力学有重要影响, 比如, 基础生产力和中上层鱼类的洄游路径等^[42]。在北太平洋公海海域, 秋刀鱼产量主要分布在海表面温度范围为 14~16℃, 海表面叶绿素 a 浓度的范围为 0.4~0.6 mg/m³, 净初级生产力的范围为 600~800 mg(C)/(m²·d)^[67]。在日本近海渔场海域, 秋刀鱼产量主要分布在海表面温度范围为 13~18℃, 海表面叶绿素 a 浓度的范围为 0.5~1.8 mg/m³, 海表面高度的范围为 5~17 cm, 海洋涡动能范围 700~1200 cm²/s²^[68]。

秋刀鱼渔场的形成与冷暖水团边界有关^[15], 比如, 海表面温度锋面对秋刀鱼渔场分布有重要的影响, 多数渔船分布在亲潮前锋的冷水侧^[69]。在渔季早期(6—8 月), 海表面水温锋面频度较低且 CPUE(单位捕捞努力量渔获量)也较低, 而在渔季高峰期(9—10 月), 海表面水温锋面频度较高, 且 CPUE 也较高。当秋刀鱼的作业位置靠近海表面水温锋面时, CPUE 也较高^[70]。渔场位置并不仅仅与渔场海域当地的瞬时海洋环境有关, 而且和更广阔的亲潮海域的海洋条件有关^[71]。在离岸亲潮偏北(南)的年内, 渔场位置相应地偏近岸(离岸)^[53]。

3.2 栖息地适宜性指数模型

在秋刀鱼栖息地适宜性研究时, 一般需考虑: 最适宜的温度区、南下亲潮边界和海表面水温边界(使用海表面水温梯度计算)^[72]。主要方法: 首先拟合生产数据和各环境参数数据的适宜性指数, 然后使用算数平均法、几何平均法或加权等计算

栖息地适宜性指数。完成栖息地适宜性指数建模和分析后,一般可以应用到以下两方面的研究,一是利用海洋环境参数预报数据进行潜在渔场渔情速报,二是分析历史时空栖息地分布变动与大尺度海洋-气候指数波动的关系,进而为资源评估与管理提供参考。

基于一般可加模型建立的栖息地适宜性指数研究发现^[73],秋刀鱼大型群的潜在适宜栖息地主要分布在 $35^{\circ}\sim 47.5^{\circ}\text{N}$ 、 $140^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$ 海域,而中型群分布范围更广,分布在 $35^{\circ}\sim 47^{\circ}\text{N}$ 、 $140^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$ 海域。两个群体均受年间海洋-气候变动的影响。秋刀鱼适宜栖息地海域和厄尔尼诺 3.4 指数存在 6 个月的滞后负相关。比较一般可加模型和地理加权回归模型分别建立的北太平洋秋刀鱼的栖息地适宜性指数发现^[67],基于这两种方法估算的北太平洋秋刀鱼潜在栖息地分布基本相似,且均与名义 CPUE 分布相符。在靠近北海道和捉择岛南部近海的秋刀鱼资源丰度高于外海。在主要渔季,秋刀鱼渔场海域的海表面高度、海表面叶绿素 a 浓度和净初级生产力也较高,与高 CPUE 分布也基本相符。馬場真哉等^[74]使用分类回归树法进行建模,预测命中率大约为 62%。

近年来,国外学者基于渔捞日志数据或(生产船位置信息),应用一般可加模型、地理加权回归模型和最大熵模型等开展了秋刀鱼栖息地适宜性指数模型方面的研究,并根据所获得结果探讨了栖息地适宜性指数在秋刀鱼渔情预报和海洋-气候对秋刀鱼潜在栖息地影响等方面的应用研究,取得了较好的效果。一般可加模型、地理加权回归模型和最大熵模型等模型的功能虽然强大,但难以使用公式表达,导致其结果在应用方面存在不便。为了扩展和便于秋刀鱼各类潜在栖息地适宜性指数模型的应用,如开发中小尺度下渔情速报系统等,基于秋刀鱼的分布和集群在各海洋要素条件下存在一个最优值(或最优范围),并在环境变量序列下呈现类似正态分布的样式^[75],因此可使用分位数回归、产量密度模型等进行秋刀鱼集群适宜性指数的公式化拟合。另外,在评价渔情预报的准确性时,除了使用传统的命中率评价外,交互信息也可作为可预测性的指标^[76],将命

中率和相对熵作为一致性指标。命中率为预测值和实际值一致的概率分布,相对熵为实际渔业情况和预测的渔业情况间概率分布的距离,以期获得更好的应用结果。

4 总结和展望

秋刀鱼是短生命周期鱼种,已有研究报道为进一步深入地认知秋刀鱼资源渔场和开展相关研究奠定了一定的基础。海洋环境条件(特别是水温)对其生长和繁殖等生活史各阶段,以及摄食和洄游有重要的影响。作为秋刀鱼资源长期变动的主要原因,大尺度海洋气候变动,对气候补充群体的存活率有重要的影响。基于公式化拟合和权重分析的秋刀鱼渔场(繁殖或补充群体)栖息地适宜性指数模型等,可能有更广泛的应用,比如,高时间和空间分辨率的秋刀鱼洄游模式研究和渔场渔情速报系统开发;可应用于秋刀鱼资源评估计算的高空间分辨率的潜在栖息地指标等。

参考文献:

- [1] Chow S, Suzuki N, Richard D B, et al. Little population structuring and recent evolution of the Pacific saury (*Cololabis saira*) as indicated by mitochondrial and nuclear DNA sequence data[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2009, 369(1): 17-21.
- [2] Masayoshi H. Biological studies on the population of the saury, *Cololabis Saira* (Brevoort) Part 1: Reproduction and growth[J]. Tohoku Journal of Agricultural Research, 1956, 6(3): 227-269.
- [3] 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.
- [4] Zavolokin A. Priority species[EB/OL]. [2018-06-09]. <https://www.npfc.int/priority-species>.
- [5] Masayoshi H. Biological studies on the population of the saury, *Cololabis saira* (Brevoort) Part 2: Habits and Migrations[J]. Tohoku Journal of Agricultural Research, 1956, 6(4): 313-340.
- [6] Tian Y J, Akamine T, Suda M. Long-term variability in the abundance of Pacific saury in the Northwestern Pacific Ocean and climatic changes during the last century[J]. Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography, 2002, 66(1): 16-25. [田永軍, 赤嶺達郎, 須田真木. 北西太平洋

- におけるサンマ資源の長期変動特性と気候変化[J]. 水産海洋研究, 2002, 66(1): 16-25.]
- [7] Saito I, Mishima S, Abe S, et al. On the migration of Pacific saury (*Cololabis saira*) (Brevoort) in Tsugaru-strait[J]. Bulletin of the Faculty of Fisheries Hokkaido University, 1953, 3(4): 273-276. [齋藤市郎, 三島清吉, 阿部茂夫, 等. 津軽海峡に於けるサンマの回遊調査と漁業試験[J]. 北海道大学水産学部研究彙報, 1953, 3(4): 273-276.]
- [8] Suyama S, Sakurai Y, Meguro T, et al. Estimation of the age and growth of Pacific saury *Cololabis saira* in the central North Pacific Ocean determined by otolith daily growth increments[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1992, 58(9): 1607-1614. [巢山哲, 桜井泰憲, 目黒敏美, 等. 中部北太平洋におけるサンマ *Cololabis saira* の耳石日周輪に基づく年齢と成長の推定[J]. 日本水産学会誌, 1992, 58(9): 1607-1614.]
- [9] Watanabe Y, Oozeki Y, Kitagawa D. Larval parameters determining preschooling juvenile production of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the Northwestern Pacific[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1997, 54(5): 1067-1076.
- [10] Oozeki Y, Watanabe Y, Kurita Y, et al. Growth rate variability of Pacific saury, *Cololabis saira*, larvae in the Kuroshio waters[J]. Fisheries Oceanography, 2003, 12(4-5): 419-424.
- [11] Suyama S, Kurita Y, Ueno Y. Age structure of Pacific saury *Cololabis saira* based on observations of the hyaline zones in the otolith and length frequency distributions[J]. Fisheries Science, 2006, 72(4): 742-749.
- [12] Suyama S, Oshima K, Nakagami M, et al. Seasonal change in the relationship between otolith radius and body length in age-zero Pacific saury *Cololabis saira*[J]. Fisheries Science, 2009, 75(2): 325-333.
- [13] Nakaya M, Morioka T, Fukunaga K, et al. Growth and maturation of Pacific saury *Cololabis saira* under laboratory conditions[J]. Fisheries Science, 2010, 76: 45.
- [14] Baitaliuk A A, Orlov A M, Ermakov Y K. Characteristic features of ecology of the Pacific saury *Cololabis saira* (*Scomberesocidae*, *Beloniformes*) in open waters and in the Northeast Pacific Ocean[J]. Journal of Ichthyology, 2013, 53(11): 899-913.
- [15] Kimura N, Okada Y, Mahapatra K. Relationship between the saury fishing ground and sea surface oceanographic features determined from satellite data along the northeastern coast of Japan[J]. Journal of the School of Marine and Technology, 2004, 2(2): 1-12. [木村典嗣, 岡田喜裕, Mahapatra K. 本州東方海域におけるサンマ漁場と衛星データから得られる海況と関係[J]. 東海大学紀要海洋学部, 2004, 2(2): 1-12.]
- [16] Syah F A, Saitoh S, Alabia I, et al. Habitat model development of Pacific saury (*Cololabis saira*) using satellite remotely sensed data in the Northwestern North Pacific[C]//Proceedings of the 12th Biennial Conference of Pan Ocean Remote Sensing Conference, 2014: 1-10.
- [17] Yasuda I, Watanabe T. Chlorophyll a variation in the Kuroshio extension revealed with a mixed-layer tracking float: Implication on the long-term change of Pacific saury (*Cololabis saira*)[J]. Fisheries Oceanography, 2007, 16(5): 482-488.
- [18] Ichii T, Nishikawa H, Mahapatra K, et al. Oceanographic factors affecting interannual recruitment variability of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the central and western North Pacific[J]. Fisheries Oceanography, 2018, 27(5): 445-457.
- [19] Ueno Y, Suyama S, Nakagami M, et al. Direct estimation of stock abundance of Pacific saury *Cololabis saira* in the northwestern Pacific Ocean using a mid-water trawl[J]. Fisheries Science, 2017, 83(1): 23-33.
- [20] Zhang X, Xu B S, Yu Y F, et al. Study on the equipment and modification of Saury stick-held net[J]. Fishery Modernization, 2005(4): 42-43. [张勋, 徐宝生, 郁岳峰, 等. 秋刀鱼舷提网设备及改装研究[J]. 渔业现代化, 2005(4): 42-43.]
- [21] Hua C X, Gao Y Z, Zhu Q C, et al. Age and growth of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the northwest Pacific Ocean based on statolith microstructure[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(10): 46-53. [花传祥, 高玉珍, 朱清澄, 等. 基于耳石微结构的西北太平洋秋刀鱼(*Cololabis saira*)年龄与生长研究[J]. 海洋学报, 2017, 39(10): 46-53.]
- [22] Meng L W. Study on fishery forecast research of *Cololabis saira* in north Pacific ocean based on habitat model[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017. [孟令文. 基于栖息地指数的北太公海秋刀鱼渔情预报的应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.]
- [23] 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): 20-27. [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): 20-27.]
- [24] 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(s1): 125-137.
- [25] Methot D R, Kramer D. Growth of northern anchovy, *Engraulis mordax*, larvae in the sea[J]. Fishery Bulletin, 1979, 77: 413-423.
- [26] Pannella G. Fish otoliths: Daily growth layers and periodical patterns[J]. Science, 1971, 173(4002): 1124-1127.
- [27] Suyama S, Oshima K, Nakagami M, et al. Seasonal changes in otolith and somatic growth in age-0 Pacific saury *Cololabis saira*[J]. Fisheries Science, 2011, 77(2): 223-233.

- [28] Watanabe Y, Kuji Y. Verification of daily growth increment formation in saury otoliths by rearing larvae from hatching[J]. Japanese Journal of Ichthyology, 1991, 38(1): 11-15.
- [29] Oozeki Y, Watanabe Y. Comparison of somatic growth and otolith increment growth in laboratory-reared larvae of Pacific saury, *Cololabis saira*, under different temperature conditions[J]. Marine Biology, 2000, 136(2): 349-359.
- [30] Iwahashi M, Isoda Y, Ito S, et al. Estimation of seasonal spawning ground locations and ambient sea surface temperatures for eggs and larvae of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the western North Pacific[J]. Fisheries Oceanography, 2006, 15(2): 125-138.
- [31] Watanabe Y, Butler J L, Mori T. Growth of Pacific saury, *Cololabis saira*, in the northeastern and northwestern Pacific Ocean[J]. Fishery Bulletin, 1988, 86(3): 489-498.
- [32] Suyama S, Sakuria Y, Shimazaki K. Maturation and age in days of Pacific saury *Cololabis saira* (Brevoort) in the central North Pacific Ocean during the summer[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1996, 62(3): 361-369. [巢山哲, 桜井泰憲, 島崎健二. 夏季の中部北太平洋におけるサンマの成熟と日齢[J]. 日本水産学会誌, 1996, 62(3): 361-369.]
- [33] Kurita Y, Nemoto Y, Oozeki Y, et al. Variations in patterns of daily changes in otolith increment widths of 0+ Pacific saury, *Cololabis saira*, off Japan by hatch date in relation to the northward feeding migration during spring and summer[J]. Fisheries Oceanography, 2004, 13(s1): 54-62.
- [34] Zhu Q C, Gao Y Z, Hua C X, et al. Study on statolith hyaline zones of Pacific saury *Cololabis saira* in the Northwest Pacific[J]. Marine Fisheries, 2016, 38(3): 236-243. [朱清澄, 高玉珍, 花传祥, 等. 西北太平洋秋刀鱼耳石透明带的初步研究[J]. 海洋渔业, 2016, 38(3): 236-243.]
- [35] Suyama S, Nakagami M, Naya M, et al. Comparison of the growth of age-1 Pacific saury *Cololabis saira* in the Western and the Central North Pacific[J]. Fisheries Science, 2012, 78(2): 277-285.
- [36] Kosaka S. Life history of the Pacific saury *Cololabis saira* in the Northwest Pacific and considerations on resource fluctuations based on it[J]. Bulletin of Tohoku Regional Fisheries Research Laboratory, 2000, 63: 1-96. [小坂淳. 北西太平洋におけるサンマの生活史とそれにもとづく資源変動の考察[J]. 東北水産研究所研究報告, 2000, 63: 1-96.]
- [37] Huang W B, Huang Y C. Reproductive biology of Pacific saury *Cololabis saira* (Brevoort, 1856) in the Northwest Pacific Ocean: Female maturation and spawning[J]. Biology Science, 2011, 53(2): 17-27. [黄文彬, 黄郁淳. 西北太平洋秋刀鱼 *Cololabis saira* (Brevoort, 1856)之生殖生物学: 雌鱼成熟与产卵洄游[J]. 生物科学, 2011, 53(2): 17-27.]
- [38] Suyama S, Shimizu A, Isu S, et al. Determination of the spawning history of Pacific saury *Cololabis saira* from rearing experiments: Identification of post-spawning fish from histological observations of ovarian arterioles[J]. Fisheries Science, 2016, 82(3): 445-457.
- [39] Suyama S. III-3. Tank experiments: Pacific saury *Cololabis saira*[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 2012, 78(4): 808. [巢山哲. 飼育実験による繁殖特性研究例 III-3 サンマ[J]. 日本水産学会誌, 2012, 78(4): 808.]
- [40] Hatanaka M, Watanabe T. Studies on the reproduction of the saury, *Cololabis saira* (Brevoort), of the pacific coast of Japan[J]. Tohoku Journal of Agricultural Research, 1953, 3(2): 293-302.
- [41] Kurita Y. Energetics of reproduction and spawning migration for Pacific saury (*Cololabis saira*)[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2004, 28: 271-272.
- [42] Ito S, Sugisaki H, Tsuda A, et al. Contributions of the VENFISH program: meso-zooplankton, Pacific saury (*Cololabis saira*) and walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) in the northwestern Pacific[J]. Fisheries Oceanography, 2004, 13(s1): 1-9.
- [43] Huang W B, Huang Y C. Maturity characteristics of pacific saury during fishing season in the Northwest Pacific[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2015, 23(5): 819-826.
- [44] Chen X J. Fishery Resource and Fishing Ground[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004: 57-58. [陈新军. 渔业资源与渔场学[M]. 北京: 海洋出版社, 2004: 57-58.]
- [45] Masayoshi H. Spawning ground of the saury, *Cololabis saira* (Brevoort), in the Japan sea[J]. Tohoku Journal of Agricultural Research, 1956, 7(1): 59-64.
- [46] Odate K. Zooplankton biomass and its long-term variation in the western North Pacific Ocean[J]. Bulletin of Tohoku Regional Fisheries Research Laboratory, 1994, 56: 115-173.
- [47] Sugisaki H, Kurita Y. Daily rhythm and seasonal variation of feeding habit of Pacific saury (*Cololabis saira*) in relation to their migration and oceanographic conditions off Japan[J]. Fisheries Oceanography, 2004, 13(s1): 63-73.
- [48] Kurita Y, Sugisaki H. Changes in the daily ration size of Pacific saury, *Cololabis saira*, with seasons and body sizes[J]. Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography, 2004, 68(3): 133-141. [栗田豊, 杉崎宏哉. サンマ日間摂餌量の季節および体長による変化[J]. 水产海洋研究, 2004, 68(3): 133-141.]
- [49] Ito S, Kurita Y, Oozeki Y, et al. Review for Pacific saury (*Cololabis saira*) study under the VENFISH project, 20, PICES Scientific Reports N20[R/OL]. 2002: 92-100. [<http://meetings.pices.int/publications/scientific-reports>]
- [50] Antonenko D V, Novikov Y V. On feeding migrations of saury in the North-West Pacific Ocean[J]. Izv. TINRO,

- 2017(188): 115–124. [Антоненко Д В, Новиков Ю В. О нагульных миграциях сайры в северо-западной части тихого океана[J]. известия тинро, 2017, 188: 115-124.]
- [51] Suyama S, Nakagami M, Naya M, et al. Migration route of Pacific saury *Cololabis saira* inferred from the otolith hyaline zone[J]. Fisheries Science, 2012, 78(6): 1179-1186.
- [52] Ito S, Okunishi T, Kishi M J, et al. Modelling ecological responses of Pacific saury (*Cololabis saira*) to future climate change and its uncertainty[J]. ICES Journal of Marine Science, 2013, 70(5): 980-990.
- [53] Yasuda I, Watanabe Y. On the relationship between the Oyashio front and saury fishing grounds in the North-western Pacific: A forecasting method for fishing ground locations[J]. Fisheries Oceanography, 1994, 3(3): 172-181.
- [54] Saitoh S, Kosaka S, Iisaka J. Satellite infrared observations of Kuroshio warm-core rings and their application to study of Pacific saury migration[J]. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1986, 33(11-12): 1601-1615.
- [55] Watanabe K, Tanaka E, Yamada S, et al. Spatial and temporal migration modeling for stock of Pacific saury *Cololabis saira* (Brevoort), incorporating effect of sea surface temperature[J]. Fisheries Science, 2006, 72(6): 1153-1165.
- [56] Shang L L, Zhu Q C, Yan L, et al. Study of biological characteristics of saury in the high seas of Northwest Pacific Ocean[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(10): 198-201. [商李磊, 朱清澄, 晏磊, 等. 西北太平洋公海秋刀鱼生物学特性研究[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(10): 198-201.]
- [57] 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(s1): 44-53.
- [58] Oozeki Y, Okunishi T, Takasuka A, et al. Variability in transport processes of Pacific saury *Cololabis saira* larvae leading to their broad dispersal: Implications for their ecological role in the western North Pacific[J]. Progress in Oceanography, 2015, 138(Pt 2): 448-458.
- [59] Takasuka A, Nishikawa K, Kuroda H, et al. Growth variability of Pacific saury *Cololabis saira* larvae under contrasting environments across the Kuroshio axis: Survival potential of minority versus majority[J]. Fisheries Oceanography, 2016, 25(4): 390-406.
- [60] Takasuka A, Kuroda H, Takeshi O, et al. Occurrence and density of Pacific saury *Cololabis saira* larvae and juveniles in relation to environmental factors during the winter spawning season in the Kuroshio Current system[J]. Fisheries Oceanography, 2014, 23(4): 304-321.
- [61] Fukushima S, Watanabe Y, Ogawa Y. Correspondence of spawned seasons to large, medium, and small size Pacific saury exploited in the northwestern Pacific Ocean[J]. Bulletin of Tohoku National Fisheries Research Institute, 1990, 52: 17-27.
- [62] Tian Y J, Neno Y, Suda M, et al. Climate-ocean variability and the response of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the northwestern Pacific during the last half century[J]. Fisheries Science, 2002, 68(s1): 158-161.
- [63] Matsumiya Y, Tanaka S. Dynamics of the saury population in the Pacific Ocean off Northern Japan-III Reproductive relations of large and medium sized fish[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1978, 44(5): 451-455.
- [64] Zhang C I, Gong Y. Effect of ocean climate changes on the Korean stock of Pacific saury, *Cololabis saira* (Brevoort)[J]. Journal of Oceanography, 2005, 61(2): 313-325.
- [65] Tian Y J, Ueno Y, Suda M, et al. Climate-ocean variability and the response of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the northwestern Pacific during the last half century[J]. Fisheries Science, 2002, 68(s1): 158-161.
- [66] 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.
- [67] Tseng C T, Su N J, Sun C L, et al. Spatial and temporal variability of the Pacific saury (*Cololabis saira*) distribution in the northwestern Pacific Ocean[J]. ICES Journal of Marine Science, 2013, 70(5): 991-999.
- [68] Syah F A, Saitoh S, Alabia I D, et al. Detection of potential fishing zone for Pacific saury (*Cololabis saira*) using generalized additive model and remotely sensed data[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2017, 54: 012074.
- [69] Semedi B, Saiton S, Saiton K, et al. Application of multi-sensor satellite remote sensing for determining distribution and movement of Pacific saury[J]. Fisheries Science, 2002, 68(s2): 1781-1784.
- [70] Tseng C T, Sun C L, Belkin I M, et al. Sea surface temperature fronts affect distribution of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the Northwestern Pacific Ocean[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2014, 107: 15-21.
- [71] Yasuda I, Kitagawa D. Locations of early fishing grounds of saury in the northwestern Pacific[J]. Fisheries Oceanography, 1996, 5(1): 63-69.
- [72] Hiroshi S, Hideo T. Discriminate prediction of formation of saury fishing ground by satellite infrared imageries[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1988, 54(7): 1093-1099.
- [73] Chang Y J, Lan K W, Walsh A W, et al. Modelling the impacts of environmental variation on habitat suitability for Pacific saury in the Northwestern Pacific Ocean[J]. Fisheries

- Oceanography, 2019, 28(3): 291-304.
- [74] Baba S, Matsuishi T. Pacific saury fishing forecasting by using random forest[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 2015, 81(1): 2-9. [馬場真哉, 松石隆. ランダムフォレストを用いたサンマ来遊量の予測[J]. 日本水産学会誌, 2015, 81(1): 2-9.]
- [75] Zhu Q C, Hua C X, Xu W, et al. The fishing ground distribution of *Cololabis saira* and its relationship with water temperature factors in the Northwestern Pacific from July to September[J]. Marine Fisheries, 2006, 28(3): 228-233. [朱清澄, 花传祥, 许巍, 等. 西北太平洋公海 7~9 月秋刀鱼渔场分布及其与水温的关系[J]. 海洋渔业, 2006, 28(3): 228-233.]
- [76] Baba S, Matsuishi T. Evaluation of the predictability of fishing forecasts using information theory[J]. Fisheries Science, 2014, 80(3): 427-434.

Review of the life history, resources and fishing grounds of the Pacific saury in the North Pacific Ocean

HUA Chuanxiang^{1,2}, ZHU Qingcheng^{1,2}, XU Wei¹, SONG Liming^{1,2}, LI Fei¹

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

2. National Engineering Research Centre for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China

Abstract: The Pacific saury *Cololabis saira* is an important pelagic fish species in China and is one of the priority species managed by the North Pacific Fisheries Commission. The Pacific saury has a short lifespan and is widely distributed in the North Pacific Ocean. The Pacific saury has a long migration route that passes through the Kuroshio-Oyashio transition zone from subtropical to the north, and returns southward to the coastal waters of Japan and Russia. The fishing grounds of the Pacific saury are mainly distributed in the Sea of Japan, the Pacific Ocean, and the Sea of Okhotsk. This study reviewed and summarized the research progress of the Pacific saury including its life history, population dynamics, fishing grounds, and habitat suitability. This was followed by analyses and prospects of the present research status and the developmental trends of growth biology, reproductive biology, migration, resource fluctuation, and habitat suitability. The main findings are as follows: the life cycle and effects of environmental variables on the growth, sexual maturity, and spawning of the Pacific saury during each life stage were revealed based on the study of day-age of the microstructure of otoliths; the relationship between resource abundance and influencing factors revealed that the ocean-climate change was the main reason for the long-term fluctuation of Pacific saury resources; the main mechanism of the formation of the fishing ground was revealed from research of the habitat adaptation; and a relevant fishery forecasting model was established. The main suggestions include exploring the potential migratory paths and patterns of the Pacific saury based on the otolith microchemical information and the spatiotemporal variations of optimum environmental factors; establishing a reproductive habitat suitability index model to analyze the influence of ocean-climate change on potential habitats of recruitment populations of the Pacific saury; and establishing a schooling habitat suitability index model to develop a rapid forecast reporting system of the fishing grounds for the Pacific saury. This study provides a comprehensive overview and analysis of the progress and achievements of research on the life history, population dynamics, and fishing grounds of Pacific saury, which can provide references for more rational and effective research on stock assessment, formulation of management measures, and development of fishery forecasting of Pacific saury in China.

Key words: *Cololabis saira*; life history; resources; fishing ground

Corresponding author: ZHU Qingcheng. E-mail: qczechu@shou.edu.cn