

文章编号: 1674-5566(2024)04-0888-12

DOI: 10.12024/jsou.20230804300

## 拉尼娜年份下西北太平洋远东拟沙丁鱼的摄食生态

李金桢<sup>1</sup>, 胡贯宇<sup>1,2,3,4</sup>, 赵振方<sup>1</sup>, 葛思羽<sup>1</sup>, 陈龙<sup>1</sup>, 陈颖聪<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学海洋生物资源与管理学院, 上海 201306; 2. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 4. 农业农村部大洋渔业可持续利用重点实验室, 上海 201306)

**摘要:** 根据2021年6—7月远洋渔业资源调查船“淞航”号在西北太平洋公海采集的远东拟沙丁鱼样本, 测定其肌肉的碳、氮稳定同位素比值, 利用GAM模型分析生物因子(体长)和非生物因子(纬度、海表温度、离岸距离、叶绿素a质量浓度)对碳、氮稳定同位素的影响; 同时, 分析了远东拟沙丁鱼的营养生态位在不同性别、不同体长组间的差异。结果显示, 在拉尼娜年份下, 远东拟沙丁鱼肌肉的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 在雌、雄间差异不显著, 不同体长组间的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 差异显著。GAM模型的结果显示, 随着体长的增大,  $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 呈现先减小后增大的趋势;  $\delta^{13}\text{C}$ 随纬度的增大也呈现先减小后增大的趋势;  $\delta^{15}\text{N}$ 与离岸距离(Distance to shelf break, DSB)、叶绿素a质量浓度之间均呈负相关关系。不同体长组的生态位宽度不同, 随着生长其位置发生了变化; 雌、雄生态位的重叠率较大, 100~160 mm雌、雄间生态位宽度相似, 然而161~220 mm雌性生态位宽度明显大于雄性; 与正常年份相比, 拉尼娜年份下 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均较低。研究表明, 远东拟沙丁鱼不同性别、体长组间的摄食生态存在差异, 拉尼娜事件下海洋环境因子发生变化, 从而影响远东拟沙丁鱼的摄食生态。

**关键词:** 远东拟沙丁鱼; 摄食生态; 稳定同位素; 拉尼娜

中图分类号: S 932

文献标志码: A

远东拟沙丁鱼(*Sardinops melanostictus*)隶属辐鳍鱼纲(Actinopterygii)鲱形目(Clupeiformes)鲱科(Clupeidae)<sup>[1]</sup>, 其种群广泛分布于西北太平洋、地中海及南非各海域<sup>[2-3]</sup>。远东拟沙丁鱼属暖温性中上层鱼类, 是世界上重要的中小型经济鱼种之一<sup>[4]</sup>, 其生长速度快、繁殖力强, 一般两龄性成熟<sup>[5]</sup>。跟其他中上层鱼类一样, 远东拟沙丁鱼也具有集群、洄游等的生活习性<sup>[1,6]</sup>。其位于海洋生态系统的中上层, 具有承上启下的作用, 它既是大型鱼类、哺乳动物、海鸟等的捕食对象, 同时自身主要捕食硅藻类、桡足类、小型鱼卵等<sup>[7-8]</sup>。由于亲潮黑潮冷暖流交汇的作用, 西北太平洋海域营养盐充足、生产力较高、饵料生物种类丰富, 从而形成了优良的经济渔场<sup>[9]</sup>。相关研究表明, 气候的周期变动会影响海洋经济鱼类的资源捕

量<sup>[10]</sup>, 拉尼娜事件会导致西北太平洋沿岸海域的海表温度(Sea surface temperature, SST)异常增高, 使得初级生产力降低, 尼诺指数对中西太平洋鳀单位捕捞努力量渔获量(Catch per unit effort, CPUE)的影响会滞后0~2个月<sup>[11]</sup>。PETATAN等<sup>[12]</sup>认为SST和净初级生产力变化是影响远东拟沙丁鱼栖息地变动的主要原因。HIYAMA等<sup>[13]</sup>研究发现栖息地温度与西北太平洋远东拟沙丁鱼生物量和幼鱼存活之间存在显著的负相关关系。杨超等<sup>[14]</sup>研究结果显示随着SST上升, CPUE值的升高与北太平洋远东拟沙丁鱼资源量增加有直接关联, YANG等<sup>[15]</sup>发现远东拟沙丁鱼常汇集于温度变化较小的海域, 因此温度对远东拟沙丁鱼栖息地有一定影响。另外, SST上升对远东拟沙丁鱼的洄游模式、摄食分布

收稿日期: 2023-08-28

修回日期: 2024-01-30

**基金项目:** 农业农村部全球渔业资源调查监测评估(公海渔业资源综合科学调查)专项(D-8025-23-1002); 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室开放基金(A1-2006-23-200206); 上海海洋大学青年教师科研启动项目(A2-2006-23-200308); 上海市高校特聘教授“东方学者”岗位跟踪计划(GZ2022011)

**作者简介:** 李金桢(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业生物学和生态学。E-mail: 784951248@qq.com

**通信作者:** 胡贯宇, E-mail: gyhu@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

及种群波动也有一定影响,特别是异常气候事件下的影响更为显著<sup>[6]</sup>。因此,探究拉尼娜事件对远东拟沙丁鱼栖息地变化和摄食习性的影响是十分必要的。

目前,稳定同位素技术已广泛应用于鳀(*Engraulidae*)<sup>[16]</sup>、长蛇鲭(*Saurida elongata*)<sup>[17]</sup>、柔鱼(*Ommastrephes bartrami*)<sup>[18-19]</sup>、大青鲨(*Prionace glauca*)<sup>[20]</sup>等物种摄食习性及其洄游路径的研究。研究<sup>[17]</sup>表明,稳定同位素技术相比于胃含物鉴定方法能够更完整地保留捕食者的摄食信息。研究摄食习性可以判断鱼类的生长、行为规律、种间关系以及资源量动态<sup>[21]</sup>。国内外学者对远东拟沙丁鱼的年龄生长<sup>[5]</sup>、摄食生态<sup>[22-23]</sup>、资源量与环境关系<sup>[5,24]</sup>等生物学进行了研究,但关于摄食生态的研究多用传统的胃含物方法<sup>[25-29]</sup>,用稳定同位素技术对其摄食习性的研究甚少<sup>[30-31]</sup>,且关于气候变化对摄食习性影响的研究尚未见报道。因此,本研究根据西北太平洋的远东拟沙丁鱼肌肉样本,通过分析碳、氮稳定同位素技术来研究不同性别、不同体长组间的摄食习性和摄食生态位差异。同时,结合拉尼娜气候事件,探究远东拟沙丁鱼摄食习性、栖息地对拉尼娜事件的响应,以期为研究中上层小型鱼类在不同气候环境下生态系统中的摄食生态位提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

#### 1.1.1 样本来源

2021年为拉尼娜年份,远东拟沙丁鱼样本采集时间为2021年6—8月,采集海域为38°59′N~43°00′N,150°30′E~161°48′E,共采集11个站点(图1),每个站点所采集的样本均从渔获物中随机取样,并对采集的样本进行冷冻处理保存运回实验室。在本研究中,雌性样本为87尾,体长为105~250 mm,雄性样本为83尾,体长为100~241 mm。研究总体长为100~250 mm,设置组距为30 mm,将样本分成100~130 mm、131~160 mm、161~190 mm、191~220 mm和221~250 mm等5个体长组。

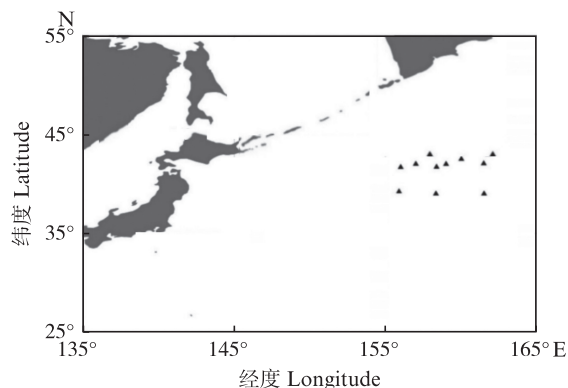


图1 西北太平洋远东拟沙丁鱼采样站点图

Fig. 1 Map of the sampling location of *Sardinops melanostictus* in Northwest Pacific Ocean

#### 1.1.2 环境数据来源

SST和叶绿素a质量浓度(Chlorophyll-a, *Chl. a*)数据来自美国国家海洋和大气管理局网站(<http://apdrc.soest.hawaii.edu/las/v6/dataset>),时间分辨率为d,空间分辨率为0.5°×0.5°。

## 1.2 方法

#### 1.2.1 生物学测定

实验室解冻后对采集的所有样品进行生物学测量和观测,测量指标包括体长、体质量、性别、性腺成熟度、摄食等级等。体长用量鱼板测定,精确至1 mm,体质量用天平测定,精确至1 g。通过对性腺的形状、外观及结构的分析来确定性别。在远东拟沙丁鱼背鳍前端剪取约3 cm×3 cm肌肉块,于塑封袋内-20 °C冷冻保存。

#### 1.2.2 稳定同位素分析

肌肉去除外层表皮并用超纯水清洗,在-55 °C的冷冻干燥机内干燥24 h,之后用混合型球磨仪研磨成粉末,称取1.0 mg粉末并加入到12 mL三氯甲烷-甲醇溶液(体积比为2:1)中浸泡24 h,以4 000 r/min离心3 min,取下层粉末,40 °C烘箱干燥24 h,最后用2 mL离心管装上脱脂后的粉末并送入稳定同位素质谱仪(ISOPRIME100)和元素分析仪(vario ISOTOPE cube)中进行稳定同位素测定,质谱仪通过检测CO<sub>2</sub>的<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C以及<sup>14</sup>N/<sup>15</sup>N,并与国际标准物(Pee dee belemnite, PDB)对比后计算出样品的δ<sup>13</sup>C值(δ<sup>13</sup>C的分析精度<±0.2‰),与国际标准物(纯净空气中的N<sub>2</sub>)对比后计算出样品的δ<sup>15</sup>N值(δ<sup>15</sup>N的分析精

度  $< \pm 0.3\text{‰}$  )。

计算公式:

$$\delta X = [(R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000 \quad (1)$$

式中:  $X$  为  $^{13}\text{C}$  或  $^{15}\text{N}$ ;  $R_{\text{sample}}$  为  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  (或  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ );  $R_{\text{standard}}$  为标准值。

### 1.2.3 广义可加模型分析

广义可加模型 (Generalized additive model, GAM) 是一种非参数回归技术<sup>[32]</sup>, 可以处理因变量和自变量间的非线性和多元性关系<sup>[33]</sup>, 因此在建模复杂的生态系统研究方面广为使用<sup>[34]</sup>。在以往的研究中, 海表面温度、上升流、离岸距离、叶绿素 a 质量浓度、纬度、体长等被认为是解释稳定同位素与栖息地、营养级间关系的主要因子<sup>[35-38]</sup>。本研究应用 GAM 模型建立了远东拟沙丁鱼因变量 (肌肉的  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ ) 和自变量 (纬度、体长、离岸距离、海表面温度、叶绿素 a 质量浓度) 间的关系:

$$I_{\text{SI}} = s(X_{\text{Lat}}) + s(X_{\text{BL}}) + s(X_{\text{SST}}) + s(X_{\text{DSB}}) + s(X_{\text{Chl.a}}) + e \quad (2)$$

式中:  $I_{\text{SI}}$  为测定的碳、氮稳定同位素 ( $\delta^{13}\text{C}$  或  $\delta^{15}\text{N}$ );  $X_{\text{Lat}}$  为采样点的纬度;  $X_{\text{BL}}$  为远东拟沙丁鱼的体长;  $X_{\text{SST}}$  为采样点的海表面温度;  $X_{\text{DSB}}$  为采样点的离岸距离;  $X_{\text{Chl.a}}$  为采样点的叶绿素 a 质量浓度;  $e$  为模型的误差。

采用方差膨胀因子 (Variance inflation factor, VIF) 对预测变量进行共线性检验, 选择 VIF 检验的临界值为 3<sup>[39]</sup>。将 VIF 检验后的有效预测变量以不同的组合来进行 GAM 分析, 基于赤池信息准则 (Akaike information criterion, AIC) 来衡量模型

的拟合优度<sup>[40]</sup>, 从而获得最优模型。

### 1.3 数据处理

本文所有同位素值的方差均保持不变, 且符合正态分布, 所以采用  $t$  检验分析雌、雄  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  值的差异, 利用 ANOVA 检验西北太平洋远东拟沙丁鱼稳定同位素不同体长组的差异。

采用方差膨胀因子 (VIF) 对预测变量进行共线性检验, 筛选出适宜的预测变量用于 GAM 的建立, 将肌肉  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  与适宜的预测变量建立关系, 基于 AIC 值选取最优拟合模型, 探讨远东拟沙丁鱼的栖息地变动与摄食习性关系。

生态位图及重叠率。依据 LAYMAN 等<sup>[41]</sup>的方法利用标准椭圆面积 (Standard ellipse areas, SEA) 法计算生态位的宽度以及生态位在不同性别、不同体长组的重叠率。

## 2 结果

### 2.1 碳、氮稳定同位素在性别间的差异

通过对远东拟沙丁鱼肌肉碳、氮稳定同位素进行统计分析, 结果显示,  $\delta^{13}\text{C}$  的范围为  $-22.41\text{‰} \sim -17.88\text{‰}$  (表 1 和图 2), 平均值为  $-20.05\text{‰} \pm 0.79\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  的范围为  $6.43\text{‰} \sim 10.85\text{‰}$ , 平均值为  $8.70\text{‰} \pm 1.13\text{‰}$ ; 雌性个体  $\delta^{13}\text{C}$  平均值为  $-19.99\text{‰} \pm 0.92\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  平均值为  $8.75\text{‰} \pm 1.18\text{‰}$ ; 雄性个体  $\delta^{13}\text{C}$  平均值为  $-20.12\text{‰} \pm 0.72\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  平均值为  $8.65\text{‰} \pm 1.09\text{‰}$ 。利用  $t$  检验分析雌、雄间碳、氮稳定同位素的差异性, 结果显示,  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  在性别间均不存在显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

表 1 西北太平洋远东拟沙丁鱼雌、雄肌肉稳定同位素差异性分析

Tab. 1 Differential analysis of stable isotopes of muscle in female and male *Sardinops melanostictus* in Northwest Pacific Ocean

性别 Sex	$\delta^{13}\text{C}$			$P$	$\delta^{15}\text{N}$			$P$
	最大值	最小值	均值		最大值	最小值	均值	
	Maximum/‰	Minimum/‰	Mean±SD/‰		Maximum/‰	Minimum/‰	Mean±SD/‰	
雌性 Female	-17.88	-22.41	-19.99±0.92	0.276	10.85	6.43	8.75±1.18	0.575
雄性 Male	-18.26	-21.9	-20.12±0.72		10.37	6.68	8.65±1.09	

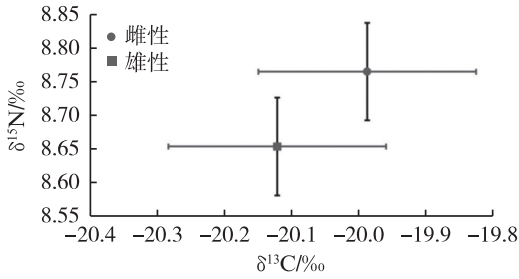


图2 西北太平洋远东拟沙丁鱼雌、雄肌肉  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  的均值和标准差

Fig. 2 Mean  $\pm$  standard deviation isotopic values of muscle for male and female *Sardinops melanostictus* in Northwest Pacific Ocean

2.2 碳、氮稳定同位素在体长组间的差异

统计结果显示,  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  在不同体长组间呈现先下降后上升的趋势(表2、图3)。在 100~190 mm, 随着体长的增大,  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  缓慢下降; 而 191~250 mm 体长范围间,  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  呈现增长的趋势(图3)。ANOVA 分析表明, 100~130 mm 与 161~190 mm 和 191~220 mm 的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 131~160 mm 与 161~190 mm 和 191~220 mm 的  $\delta^{13}\text{C}$  也存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 131~160 mm 与 191~220 mm 和 221~250 mm 的  $\delta^{15}\text{N}$  同样存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

表2 西北太平洋远东拟沙丁鱼不同体长组的碳、氮稳定同位素比值

Tab. 2  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values of *Sardinops melanostictus* in different body length groups in Northwest Pacific Ocean

体长组 Body length group/ mm	样本数 Sample size/尾	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$		$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	
		范围 Range	平均值 $\pm$ 标准差 Mean $\pm$ SD	范围 Range	平均值 $\pm$ 标准差 Mean $\pm$ SD
100~130	36	8.17~10.37	9.35 $\pm$ 0.64	-20.46~-18.32	-19.95 $\pm$ 0.39
131~160	45	6.64~10.55	8.74 $\pm$ 1.04	-21.25~-19.68	-20.30 $\pm$ 0.43
161~190	59	6.43~10.85	7.84 $\pm$ 0.98	-22.41~-18.23	-20.39 $\pm$ 0.83
191~220	24	7.47~10.32	9.50 $\pm$ 0.72	-20.88~-17.88	-19.25 $\pm$ 0.78
221~250	6	8.95~10.47	9.84 $\pm$ 0.56	-19.02~-18.26	-18.67 $\pm$ 0.29

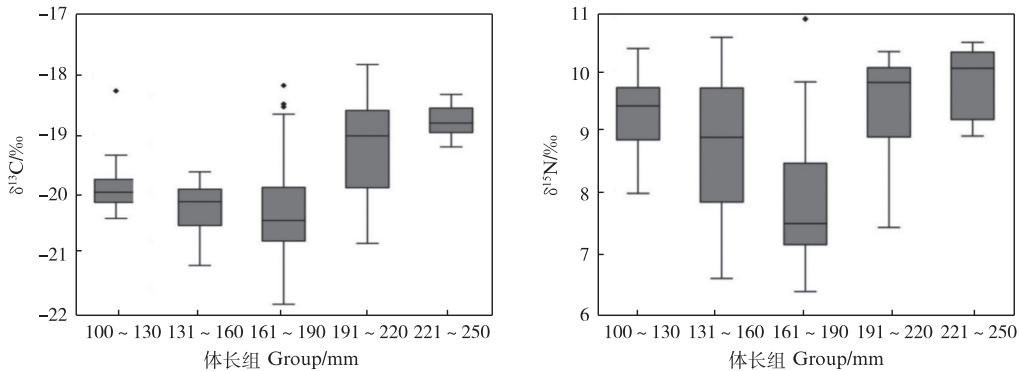


图3 西北太平洋远东拟沙丁鱼各体长组上的  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  变化

Fig. 3  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  variation of *Sardinops melanostictus* in different body length groups in Northwest Pacific Ocean

2.3 GAM 模型

基于预测变量的共线性检验结果, 在 5 个预测变量中, VIF 值均小于 3, 满足 VIF 检验的临界值为 3<sup>[42]</sup> 的条件, 所以均可取。将 5 个预测变量建立  $C_5^1+C_5^2+C_5^3+C_5^4+C_5^5=31$  种不同变量组合的模型。选择 AIC 值最小的模型作为最佳拟合模型。 $\delta^{13}\text{C}$  的最佳预测变量组合为  $X_{Lat}+X_{BL}$  (表 3), 模型的偏差解释率为 50.0% (表 4);  $\delta^{15}\text{N}$  的最佳预测变量组合为  $X_{BL}+X_{SST}+X_{DSB}+X_{Chl.a}$  (表 3), 模型的偏差解释率为 54.2%; 且这些变量对远东拟沙丁鱼肌肉  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  有极显著的影响 ( $P < 0.01$ , 表 4)。

$\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  值随预测变量的变化趋势较为显著(图 4)。 $\delta^{13}\text{C}$  随体长的增加呈现先减小后增大的趋势, 在体长为 170 mm 时出现了 1 个极小值, 在 220~250 mm 时呈现下降的趋势(图 4a);  $\delta^{13}\text{C}$  随纬度的增加整体上呈先减小后增大的趋势, 在 42°N 附近为极小值(图 4b);  $\delta^{15}\text{N}$  在体长为 100~120 mm 和 180~250 mm 时呈现正相关关系, 在体长为 120~180 mm 时呈现负相关关系(图 4c);  $\delta^{15}\text{N}$  与海表面温度的增加呈现先增加后减小的趋势, 在 30 °C 时出现了一个极大值(图 4d);  $\delta^{15}\text{N}$  与离岸距离、叶绿素 a 呈现负相关关系(图 4e 和 4f)。



表3 远东拟沙丁鱼肌肉稳定同位素的广义加性模型 (GAM)的AIC值选择

Tab.3 AIC values selection for the Generalized Additive Model (GAM) of stable isotopes of muscle in *Sardinops melanostictus*

变量 Variables	碳稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	氮稳定同位素 $\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$
$X_{\text{Lat}}$	319.625	496.812
$X_{\text{BL}}$	328.479	435.033
$X_{\text{SST}}$	331.390	475.744
$X_{\text{DSB}}$	310.469	429.921
$X_{\text{Chl.a}}$	360.921	483.358
$X_{\text{Lat}}+X_{\text{BL}}$	300.416	421.789
$X_{\text{Lat}}+X_{\text{SST}}$	308.577	435.946
$X_{\text{Lat}}+X_{\text{DSB}}$	311.395	444.467
$X_{\text{Lat}}+X_{\text{Chl.a}}$	310.961	450.877
$X_{\text{BL}}+X_{\text{SST}}$	319.751	421.723
$X_{\text{BL}}+X_{\text{DSB}}$	311.600	421.422
$X_{\text{BL}}+X_{\text{Chl.a}}$	317.214	423.564
$X_{\text{SST}}+X_{\text{DSB}}$	308.087	455.018
$X_{\text{SST}}+X_{\text{Chl.a}}$	305.618	436.660
$X_{\text{DSB}}+X_{\text{Chl.a}}$	321.245	458.331
$X_{\text{BL}}+X_{\text{SST}}+X_{\text{DSB}}$	301.473	414.036
$X_{\text{BL}}+X_{\text{SST}}+X_{\text{Chl.a}}$	300.711	412.669
$X_{\text{BL}}+X_{\text{SST}}+X_{\text{DSB}}+X_{\text{Chl.a}}$	301.735	409.901
$X_{\text{BL}}+X_{\text{DSB}}+X_{\text{Chl.a}}$	311.806	411.580
$X_{\text{SST}}+X_{\text{DSB}}+X_{\text{Chl.a}}$	308.342	438.554
$X_{\text{Lat}}+X_{\text{BL}}+X_{\text{SST}}$	301.853	415.252
$X_{\text{Lat}}+X_{\text{BL}}+X_{\text{DSB}}$	308.087	455.018
$X_{\text{Lat}}+X_{\text{BL}}+X_{\text{Chl.a}}$	301.598	423.469
$X_{\text{Lat}}+X_{\text{BL}}+X_{\text{SST}}+X_{\text{DSB}}$	302.577	412.270
$X_{\text{Lat}}+X_{\text{BL}}+X_{\text{SST}}+X_{\text{Chl.a}}$	300.913	414.344
$X_{\text{Lat}}+X_{\text{BL}}+X_{\text{DSB}}+X_{\text{Chl.a}}$	302.719	413.208
$X_{\text{Lat}}+X_{\text{BL}}+X_{\text{SST}}+X_{\text{DSB}}+X_{\text{Chl.a}}$	302.462	411.231
$X_{\text{Lat}}+X_{\text{SST}}+X_{\text{DSB}}$	305.941	425.071
$X_{\text{Lat}}+X_{\text{SST}}+X_{\text{Chl.a}}$	304.385	424.699
$X_{\text{Lat}}+X_{\text{SST}}+X_{\text{DSB}}+X_{\text{Chl.a}}$	305.895	426.261
$X_{\text{Lat}}+X_{\text{DSB}}+X_{\text{Chl.a}}$	310.133	427.701

## 2.4 营养生态位

不同体长组的生态位宽度不同,随着生长其位置发生了变化,且雄性的191~220 mm组均不与其他体长组重叠(图5);雌、雄生态位的重叠率较大,在92.69%到100.00%之间。在生态位宽度方面,100~160 mm雌、雄间生态位宽度相似,然而161~220 mm雌性生态位宽度明显大于雄性,雌性的生态位宽度是雄性的两倍左右(图6)。

## 3 讨论与分析

本研究通过碳氮稳定同位素技术对西太平洋远东拟沙丁鱼的摄食习性进行分析。结果显示不同体长组之间的雌、雄样本 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在显著差异( $P<0.05$ ),表明各体长的远东拟沙丁鱼的雌、雄个体食物来源和营养级不同。营养生态位宽度可以反映空间维度上的分布范围和均匀程度,营养生态位重叠率可以反映物种间食物组成的相似性程度<sup>[43]</sup>。100~160 mm雌、雄间生态位重叠率较高,这表明100~160 mm的雌、雄个体栖息在相似的海域且摄食单一的食物<sup>[44]</sup>,这导致该体长的雌、雄个体竞争激烈。本研究结果与WATANABE等<sup>[45]</sup>相似,西北太平洋的雌、雄远东拟沙丁幼鱼一直在相似海域生长,从而导致其雌、雄生态位宽度相似,生态位重叠率高。161~220 mm雌性生态位宽度明显大于雄性且生态位重叠率较低。随着生长,远东拟沙丁鱼雌性比雄性摄食更高级的饵料生物,满足卵巢发育和产卵需求<sup>[46]</sup>。王开立等<sup>[47]</sup>研究蓝圆鲹的生态位发现,雌性个体的 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著高于雄性,说明雌鱼通过摄取更高营养级的饵料来满足卵巢发育的要求。陈静等<sup>[31]</sup>在研究鳶乌贼的摄食习性时发现,雌性 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著高于雄性。以上结果表明雌、雄个体在对食物营养级的选择上有所不同,雌性个体在生长阶段和性腺发育过程中需要更多的能量累积。在海洋生态系统中, $\delta^{15}\text{N}$ 富集程度相对稳定,可用于确定生物体的营养水平<sup>[48]</sup>, $\delta^{13}\text{C}$ 值可反映生物所处环境中初级生产者(基线浮游植物)的稳定同位素特征,进而可以指示其栖息地<sup>[49]</sup>。结果显示, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 随体长的增加呈现先减小后增大的趋势(图4a,4c), $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 在140 mm左右体长减少。这可能是100~160 mm体长的远东拟沙丁鱼存在激烈的种内竞争,随着生长,远东拟沙丁鱼迁移到更深的水域,然而该海域初级生产者营养水平较低<sup>[50]</sup>,且该体长范围内的远东拟沙丁鱼摄食器官未发育完整,只能摄食浮游生物,这导致了 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 值的下降<sup>[51]</sup>。161~220 mm体长组的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 增加,可能是该体长的远东拟沙丁鱼游泳能力增强,并迁移到初级生产力充足的海域。该体长范围内的远东拟沙丁鱼摄食器官发育完整,会主动摄食高营养级的生物,这导致了 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 的增加。

表4 远东拟沙丁鱼肌肉碳、氮稳定同位素的GAM模型统计输出结果  
**Tab.4 Statistical outputs of the generalized additive models for  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  stable isotopes of muscle for *Sardinops melanostictus***

稳定同位素 Isotopes	变量 Variables	自由度 Degree of freedom	F	P	偏差解释率 DE/%
$\delta^{13}\text{C}$	Lat	2.912	11.862	<0.01	50.00
	BL	3.922	6.536	<0.01	
$\delta^{15}\text{N}$	BL	3.869	20.793	<0.01	54.20
	SST	2.189	9.650	<0.01	
	DSB	1	14.261	<0.01	
	Chl.a	1	7.032	<0.01	

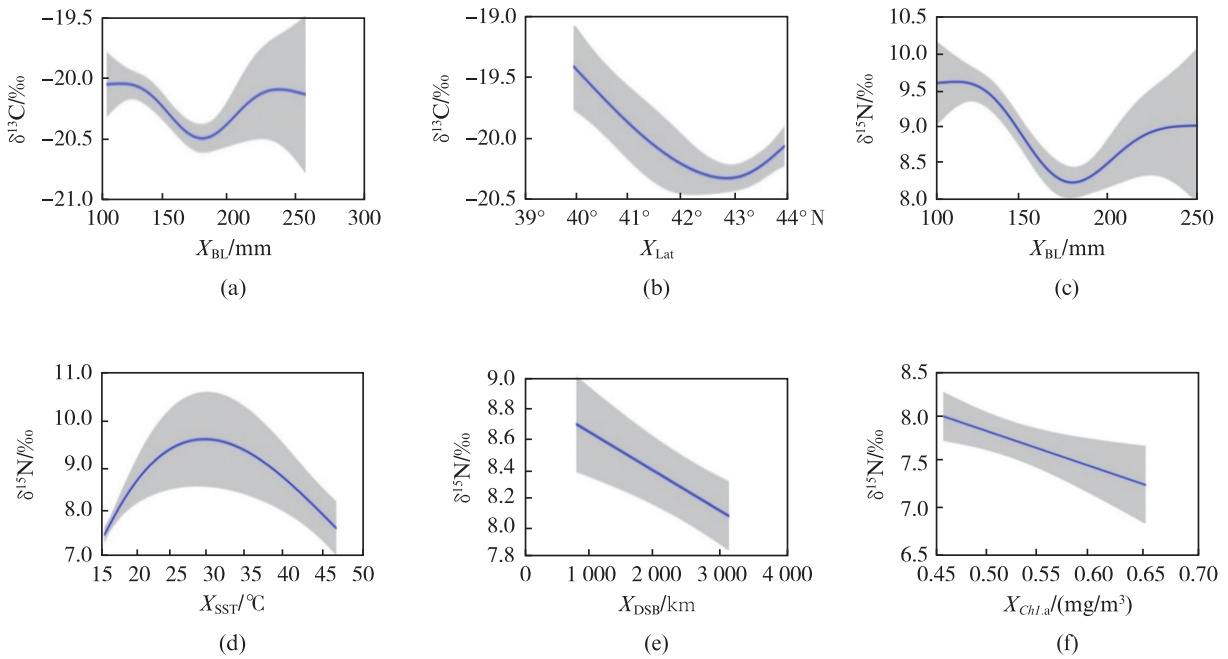


图4 碳、氮稳定同位素的反应曲线

Fig. 4 Response curves for different explanatory variables of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values

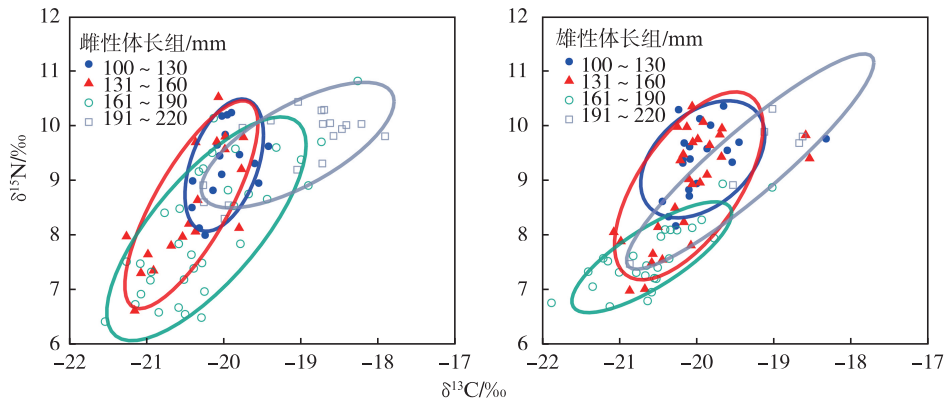


图5 西北太平洋远东拟沙丁鱼相同性别不同体长组营养生态位

Fig. 5 Nutritional niches of different body length groups of the same sex of *Sardinops melanostictus* in Northwest Pacific Ocean

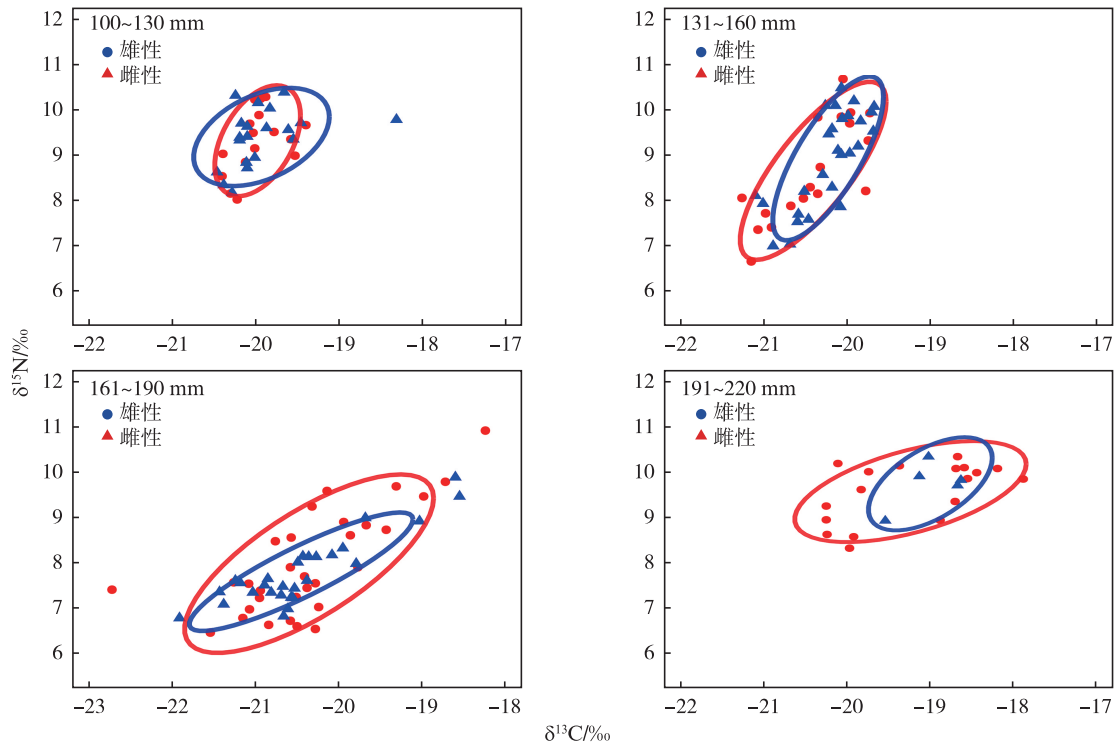


图6 西北太平洋远东拟沙丁鱼不同体长组雌雄间营养生态位

Fig. 6 Nutritional niches of different body length groups of different sex of *Sardinops melanostictus* in Northwest Pacific Ocean

本研究发现,海域环境会影响远东拟沙丁鱼的摄食习性。拉尼娜年份下远东拟沙丁鱼  $\delta^{13}\text{C}$  为  $-22.41\text{‰} \sim -17.88\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  为  $6.43\text{‰} \sim 10.85\text{‰}$ 。而在正常年份下,相关研究者测出相似体长远东拟沙丁鱼  $\delta^{13}\text{C}$  为  $-18.40\text{‰} \sim -15.00\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  为  $9.4\text{‰} \sim 12.70\text{‰}$ <sup>[52-53]</sup>, 经过对比发现,拉尼娜年份下远东拟沙丁鱼的  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  值均低于正常气候条件下相似体长组的  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  值<sup>[54]</sup>。可能的原因是拉尼娜气候事件会导致西北太平洋沿岸海域的海表温度(SST)异常增高,使得初级生产力降低,且食物来源多样性较少<sup>[55]</sup>。

环境因子对远东拟沙丁鱼  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  值有一定影响,本研究发现, $\delta^{13}\text{C}$  值随纬度的升高而降低,并在  $42^\circ\text{N} \sim 43^\circ\text{N}$  间轻微波动(图4b), YASUNAKA 等<sup>[48]</sup> 研究发现  $\delta^{13}\text{C}$  值大小与溶解无机碳(Dissolved inorganic carbon, DIC)浓度呈负相关关系,西北太平洋高纬度海域的DIC浓度高于低纬度海域。此外, $39^\circ\text{N}$  为黑潮延伸区,该海域食物网基线高, $\delta^{13}\text{C}$  值高,随着纬度升高,黑潮延伸流的影响降低<sup>[56]</sup>。 $42^\circ\text{N} \sim 43^\circ\text{N}$  海域的海洋生物受千岛寒流的影响<sup>[57]</sup>,造成了远东拟沙丁鱼  $\delta^{13}\text{C}$  值的波动。在该海域其他鱼种也发现了

类似的结果,秋刀鱼的  $\delta^{13}\text{C}$  值随着纬度升高而降低,这可能是由于黑潮支流和千岛寒流共同影响导致的结果。结果显示, $\delta^{15}\text{N}$  与离岸距离呈负相关的线性关系(图4e),离岸距离越近,初级生产力越高,海域的海洋生物种类越丰富<sup>[18,58]</sup>,远东拟沙丁鱼更容易获取营养级高的饵料, $\delta^{15}\text{N}$  越高。温度是影响  $\delta^{15}\text{N}$  值重要的因子之一,随着温度的升高,远东拟沙丁鱼  $\delta^{15}\text{N}$  值升高。温度因子会引起鱼类洄游路径改变,鱼体内生理激素发生紊乱,鱼体免疫防御体系功能混乱<sup>[59]</sup>。随着环境温度的升高,大麻哈鱼机体代谢率逐渐增强,主动摄食高营养级生物,摄食行为更活跃。HANDELAN 等<sup>[55]</sup> 和 BJORNSSON 等<sup>[60]</sup> 研究大马哈鱼(*Oncorhynchus keta*)和大西洋鳕(*Gadus morhua*)同样表明,温度对其摄食确有显著影响,在一定范围内温度越高,鱼类的摄食速率越快、摄食范围越广,鱼类  $\delta^{15}\text{N}$  值越高。结果显示, $\delta^{15}\text{N}$  与叶绿素 a 呈负相关关系(图4f),这与杨超等<sup>[61]</sup> 和 BODE 等<sup>[62]</sup> 的研究结果一致,可能是叶绿素 a 和溶氧及丰富度呈负相关关系<sup>[63]</sup>,叶绿素 a 质量浓度越高,海域的含氧量越低,饵料生物发育缓慢,导致饵料生物越低,从而降低  $\delta^{15}\text{N}$  的值。

现有研究已证明稳定同位素技术在海洋生物摄食领域作用明显,但仍存在一定的局限性,例如其同位素基线较难确定<sup>[64]</sup>。在复杂的海洋生态系统中,准确的同位素基线是研究食物网碳源、营养级的前提条件<sup>[65]</sup>,而特定化合物(氨基酸)稳定同位素分析(Compound-Specific Isotopic Analysis of Amino Acids, CSIA-AA)则能较好地解决以上问题。近些年来,已有少量研究使用CSIA-AA对远东拟沙丁鱼摄食分析进行补充。例如,GIMENEZ等<sup>[66]</sup>量化了地中海西北部3个区域不同季节欧洲沙丁鱼(*Sardina pilchardus*)肌肉中的氮稳定同位素值以及特定化合物(氨基酸)稳定同位素值,研究发现,肌肉中氮稳定同位素值的变化主要是由同位素的基线所驱动的,利用氨基酸稳定同位素可以同时估算基线的变化以及营养水平的变化。DNA条形码技术(DNA barcoding)是21世纪兴起的一项快速准确鉴定物种的技术<sup>[46]</sup>,由于鱼类胃中不可避免地出现传统胃含物分析法难以辨认的食物碎屑,而DNA序列分析法可以较好地对其进行补充,因此DNA条形码技术已被广泛应用于食性分析等领域<sup>[66]</sup>。

#### 4 总结与展望

本文基于碳、氮稳定同位素技术探究拉尼娜年份下西北太平洋远东拟沙丁鱼不同性别、体长组间 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 差异,利用GAM模型建立了 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 与纬度、体长、海表温度、离岸距离和叶绿素a之间的关系,探究了拉尼娜年份对远东拟沙丁鱼的栖息地变化和洄游的影响,同时研究了不同体长组间雌雄生态位的关系。研究发现,相同体长组中性别间 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 差异不显著,不同体长组间 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 均呈现先减少后增大的趋势,环境因子对远东拟沙丁鱼 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 影响较为复杂,不同体长组的生态位宽度不同,随着生长其位置发生了变化;雌、雄生态位的重叠率较大,100~160 mm雌、雄间生态位宽度相似,然而161~220 mm雌性生态位宽度明显大于雄性。拉尼娜事件会使海洋环境因子发生变化,从而影响远东拟沙丁鱼的摄食生态。目前远东拟沙丁鱼摄食生态的研究仍较缺乏,今后的研究可以结合脂肪酸分析和特定化合物(氨基酸)稳定同位素分析技术进一步探究远东拟沙丁鱼的摄食生态。

#### 参考文献:

- [1] 韦晟,李富国. 远东拟沙丁鱼的生活习性和资源变动[J]. 国外水产, 1986(1): 41-44.  
WEI S, LI F G. Life habits and resource changes of *Sardinops melanosticta* [J]. Foreign Aquatic Products, 1986(1): 41-44.
- [2] FURUICHI S, NIINO Y, KAMIMURA Y, et al. Time-varying relationships between early growth rate and recruitment in Japanese sardine [J]. Fisheries Research, 2020, 232: 105723.
- [3] DOPOLO M, VANDER LINGEN C, MOLONEY C. Stage-dependent vertical distribution of pelagic fish eggs on the western Agulhas Bank, South Africa [J]. African Journal of Marine Science, 2005, 27(1): 249-256.
- [4] NAKAI Z. Studies relevant to mechanisms underlying the fluctuation in the catch of the Japanese sardine, *Sardinops melanosticta* [J]. Japanese Journal of Ichthyology, 1962, 9 (1/6): 1-115.
- [5] 杨超,赵国庆,韩海斌,等. 西北太平洋公海远东拟沙丁鱼渔业生物学特征[J]. 海洋渔业, 2024, 46(1): 20-31.  
YANG C, ZHAO G Q, HAN H B, et al. Analysis of biological characteristics of *Sardinops sagax* in the high seas of the Northwest Pacific Ocean [J]. Marine Fishery, 2024, 46(1): 20-31.
- [6] 王靓. 西北太平洋主要小型中上层鱼类资源量对大尺度气候-海洋环境变化的响应研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2021.  
WANG L. Study on the response of major small pelagic fish resource in the Northwest Pacific to large scale climate-marine environmental changes [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [7] 钱世勤,胡雅竹. 东海外海远东拟沙丁鱼摄食习性的研究[J]. 海洋渔业, 1993(4): 151-154.  
QIAN S Q, HU Y Z. A study on the feeding behaviour of Japanese pilchard, *Sardinops melanosticta*, in the off coast of the East China Sea [J]. Marine Fisheries, 1993 (4): 151-154.
- [8] BARANGE M, COETZEE J, TAKASUKA A, et al. Habitat expansion and contraction in anchovy and sardine populations [J]. Progress in Oceanography, 2009, 83(1/4): 251-260.
- [9] 崔国辰,朱文斌,戴乾,等. 西北太平洋远东拟沙丁鱼渔场时空分布及其与环境因子关系研究[J]. 海洋湖沼通报, 2022, 44(5): 110-116.  
CUI G C, ZHU W B, DAI Q, et al. Temporal and spatial distribution of *Sardinops sagax* fishing ground in the Northwest Pacific and its relationship with environmental factors [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2022, 44(5): 110-116.
- [10] BEAL C M, GERBER L N, THONGROD S, et al. Marine



- microalgae commercial production improves sustainability of global fisheries and aquaculture[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 15064.
- [11] 陈洋洋, 陈新军. 厄尔尼诺/拉尼娜现象对中西太平洋鳀资源丰度的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2017, 26(1): 113-120.
- CHEN Y Y, CHEN X J. Influence of El Nino /La Nina on the abundance index of skipjack in the western and central Pacific Ocean[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2017, 26(1): 113-120.
- [12] PETATÁN-RAMÍREZ D, OJEDA-RUIZ M Á, SÁNCHEZ-VELASCO L, et al. Potential changes in the distribution of suitable habitat for Pacific sardine (*Sardinops sagax*) under climate change scenarios [J]. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography*, 2019, 169-170: 104632.
- [13] 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.
- [14] 徐洁, 陈新军, 丁琪, 等. 水温上升对西北太平洋柔鱼栖息地的影响[C]//2014年中国水产学会学术年会论文摘要集. 长沙:中国水产学会, 2014: 346.
- XU J, CHEN X J, DING Q, et al. Effect of sea surface temperature increase on potential habitat of *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean [C]//2014 Academic Annual Meeting of China Fisheries Society. Changsha: China Society of Fisheries, 2014: 346.
- [15] 徐雯, 杨蕊, 陈滢, 等. 基于胃含物和碳、氮稳定同位素研究浙江南部近海蓝圆鲹的摄食生态[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(11): 3097-3104.
- XU W, YANG R, CHEN G, et al. Feeding ecology of *Decapterus maruadsi* in the southern coastal area of Zhejiang based on stomach contents and stable isotope analysis [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(11): 3097-3104.
- [16] 王静, 蒋日进, 胡翠林, 等. 基于胃含物分析和稳定同位素技术研究鳀的摄食生态[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 2035-2044.
- WANG J, JIANG R J, HU C L, et al. Feeding ecology of *Engraulis japonicus* based on stomach contents and stable isotope [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(6): 2035-2044.
- [17] 高元新, 隋昊志, 任晓明, 等. 基于胃含物和稳定同位素研究海州湾长蛇鲻的摄食习性[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4277-4283.
- GAO Y X, SUI H Z, REN X M, et al. Feeding habits of *Saurida elongata* in Haizhou Bay, Shandong, China, based on stomach contents and stable isotope [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(12): 4277-4283.
- [18] 贡艺. 基于内壳稳定同位素信息的秘鲁外海柔鱼摄食与洄游研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2015.
- GONG Y. The study on foraging strategies and migration patterns of Jumbo squid (*Dosidicus gigas*) off Peru based on the stable isotopic information in gladius [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.
- [19] 张宇美. 基于碳氮稳定同位素的南海鳶乌贼摄食生态与营养级研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2014.
- ZHANG Y M. Feeding habits and trophic level of purpleback flyingsquid, *Sthenoethus oualaniensis* based on carbon and nitrogen stable isotope analysis in the South China Sea [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2014.
- [20] 王洁. 基于脊椎骨稳定同位素比值的大青鲨摄食生态研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2016.
- WANG J. Feeding ecology of blue shark based on stable isotope ratio of vertebrae [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [21] 薛莹, 金显仕, 张波, 等. 黄海中部小黄鱼的食物组成和摄食习性的季节变化[J]. *中国水产科学*, 2004, 11(3): 237-243.
- XUE Y, JIN X S, ZHANG B, et al. Diet composition and seasonal variation in feeding habits of small yellow croaker *Pseudosciaena polyactis* Bleeker in the Central Yellow Sea [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2004, 11(3): 237-243.
- [22] CARDONA L, MARTÍNEZ-IÑIGOL, MATEO R, et al. The role of sardine as prey for pelagic predators in the western Mediterranean Sea assessed using stable isotopes and fatty acids [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2015, 531: 1-14.
- [23] MASSKI H, DE STEPHANIS R, LABONNE M, et al. Exploring fidelity of Sardines (*Sardina pilchardus*) to feeding grounds in the Atlantic Moroccan waters using stable isotope analyses (C, N) and otolith microchemistry [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2015, 2, doi:10.3389/conf.FMARS.2015.03.00164.
- [24] 刘思源, 张衡, 杨超, 等. 西北太平洋远东拟沙丁鱼与日本鲭种群动态特征及其与环境因子关系研究进展[J]. *大连海洋大学学报*, 2023, 38(2): 357-368.
- LIU S Y, ZHANG H, YANG C, et al. Relationship between stock dynamics and environmental variability for Japanese sardine (*Sardinops sagax*) and chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the Northwest Pacific Ocean: a review [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2023, 38(2): 357-368.
- [25] ZORICA B, KEČVČ, VIDJAK O, et al. Feeding habits and helminth parasites of sardine (*S. pilchardus*) and anchovy (*E. encrasicolus*) in the Adriatic Sea [J]. *Mediterranean Marine Science*, 2015, 17(1): 216-229.
- [26] 薛梅, 朱国平. 南极磷虾胃含物分析进展及其在食性研

- 究中的应用[J]. 中国水产科学, 2021, 28(9): 1238-1250.
- XUE M, ZHU G P. Stomach content analysis and feeding habit of the Antarctic krill *Euphausia superba*: a review [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(9): 1238-1250.
- [27] 唐峰华, 戴澍蔚, 樊伟, 等. 西北太平洋公海日本鲭 (*Scomber japonicus*) 胃含物及其摄食等级研究[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(1): 138-148.
- TANG F H, DAI S W, FAN W, et al. Study on stomach composition and feeding level of chub mackerel in the Northwest Pacific [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(1): 138-148.
- [28] 孙耀, 于淼, 刘勇, 等. 现场胃含物法测定鲈的摄食与生态转换效率[J]. 水产学报, 2003, 27(3): 245-250.
- SUN Y, YU M, LIU Y, et al. Determination of food consumption and ecological conversion efficiency of *Pneumatophorus japonicus* by stomach contents method [J]. Journal of Fisheries of China, 2003, 27(3): 245-250.
- [29] 孙耀, 刘勇, 张波, 等. Eggers 胃含物法测定赤鼻棱鳀的摄食与生态转换效率[J]. 生态学报, 2003, 23(6): 1216-1221.
- SUN Y, LIU Y, ZHANG B, et al. Food consumption, growth and ecological conversion efficiency of *Thryssa kammalensis*, determined by eggers model in laboratory [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(6): 1216-1221.
- [30] 操亮亮, 刘必林, 李建华. 基于稳定同位素技术的东南太平洋公海茎柔鱼摄食生态分析[J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(1): 120-128.
- CAO L L, LIUB L, LI J H. Analysis of feeding ecology of jumbo squid *Dosidicus gigas* in the high seas of southeast Pacific Ocean based on stable isotope technology [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2022, 37(1): 120-128.
- [31] 陈静, 陆化杰, 王芮, 等. 基于碳氮稳定同位素的西北印度洋鳶乌贼摄食习性研究[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(5): 1250-1257.
- CHEN J, LU H J, WANG R, et al. Feeding ecology of *Sthenoteuthis oualaniensis* based on carbon and nitrogen stable isotope analysis in the Northwest Indian Ocean [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2022, 53(5): 1250-1257.
- [32] SHERWOOD G D, ROSE G A. Stable isotope analysis of some representative fish and invertebrates of the Newfoundland and Labrador continental shelf food web [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, 63(4): 537-549.
- [33] GUIBAN A, EDWARDS JR T C, HASTIE T. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene [J]. Ecological Modelling, 2002, 157(2/3): 89-100.
- [34] HASTIE T, TIBSHIRANI R. Exploring the nature of covariate effects in the proportional hazards model [J]. Biometrics, 1990, 46(4): 1005-1016.
- [35] FANG Z, THOMPSON K, JIN Y, et al. Preliminary analysis of beak stable isotopes ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ ) stock variation of neon flying squid, *Ommastrephes bartramii*, in the North Pacific Ocean [J]. Fisheries Research, 2016, 177: 153-163.
- [36] PETHYBRIDGE H R, YOUNG J W, KUHNERT P M, et al. Using stable isotopes of albacore tuna and predictive models to characterize bioregions and examine ecological change in the SW Pacific Ocean [J]. Progress in Oceanography, 2015, 134: 293-303.
- [37] MARTÍNEZ-RINCÓN R O, ACOSTA-PACHÓN T A. Effect of environmental factors, fish size, and baseline on carbon and nitrogen stable isotope variability in *Thunnus alalunga*, *T. albacares*, and *T. obesus* in the Pacific Ocean [J]. Progress in Oceanography, 2022, 203: 102786.
- [38] FLEMING A H, CLARK C T, CALAMBOKIDIS J, et al. Humpback whale diets respond to variance in ocean climate and ecosystem conditions in the California Current [J]. Global Change Biology, 2016, 22(3): 1214-1224.
- [39] SAGARESE S R, FRISK M G, CERRATO R M, et al. Application of generalized additive models to examine ontogenetic and seasonal distributions of spiny dogfish (*Squalus acanthias*) in the Northeast (US) shelf large marine ecosystem [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2014, 71(6): 847-877.
- [40] PLANQUE B, BELLIER E, LAZURE P. Modelling potential spawning habitat of sardine (*Sardina pilchardus*) and anchovy (*Engraulis encrasicolus*) in the Bay of Biscay [J]. Fisheries Oceanography, 2007, 16(1): 16-30.
- [41] LAYMAN C A, ARRINGTON D A, MONTANA C G, et al. Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure? [J]. Ecology, 2007, 88(1): 42-48.
- [42] HIJMANS R J, WILLIAMS E, VENNES C. Geosphere: spherical trigonometry [J]. R package Version, 2019, 1(10).
- [43] 吴映明, 唐以杰, 黄更生. 广东饶平海山河口区红树林潮沟鱼类时空生态位 [J/OL]. 中山大学学报(自然科学版), 2024: 1-9. (2024-01-08). <https://doi.org/10.13471/j.cnki.acta.snus.2023E047>.
- WU Y M, TANG Y J, HUANG G S, et al. Spatial-temporal niche of mangrove tidal gully fish in the estuary area of Haishan Town, Raoping County, Guangdong Province [J/OL]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2024: 1-9. (2024-01-08). <https://doi.org/10.13471/j.cnki.acta.snus.2023E047>.
- [44] MURO-TORRES M, AMEZCUA F, GREEN L, et al.

- Ontogenetic shifts in feeding habits of orangemouth weakfish (*Cynoscion xanthulus*): from estuarine benthic feeder to marine nektonic top predator [J]. *Marine Ecology*, 2023, 44(1): e12735.
- [45] WATANABE Y, KUROKI T. Asymptotic growth trajectories of larval sardine (*Sardinops melanostictus*) in the coastal waters off western Japan [J]. *Marine Biology*, 1997, 127(3): 369-378.
- [46] 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.
- [47] 王开立, 龚玉艳, 陈作志, 等. 基于稳定同位素技术的南海北部蓝圆鲹的营养生态位[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(4): 724-731.
- WANG K L, GONG Y Y, CHEN Z Z, et al. Trophic niche of *Decapterus maruadsi* in the northern South China Sea as revealed by stable isotope techniques [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(4): 724-731.
- [48] YASUNAKAS, NOJIRI Y, NAKAOKA SI, et al. Monthly maps of sea surface dissolved inorganic carbon in the North Pacific: basin-wide distribution and seasonal variation [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(8): 3843-3850.
- [49] LORRAIN A, GRAHAM B S, POPPB N, et al. Nitrogen isotopic baselines and implications for estimating foraging habitat and trophic position of yellowfin tuna in the Indian and Pacific oceans [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 113: 188-198.
- [50] MORELLO E B, ARNERI E. Anchovy and sardine in the Adriatic Sea—an ecological review [M]//GIBSON R N, ATKINSON R J A, GORDON J D M. *Oceanography and Marine Biology*. Boca Raton: CRC Press, 2009: 221-268.
- [51] MOUNIRA, ALAHYANE H, CHOUIKH N E, et al. Habitats and characteristics of *Sardina pilchardus*, off the Moroccan Atlantic coast [J]. *Annals of Marine Science*, 2022, 6(1): 7-20.
- [52] OHSHIMO S, HIRAOKA Y, SUYAMA S, et al. Geographical differences in stable isotope ratios and fatty acid and lipid signatures of chub mackerel, *Scomber japonicus*, in waters around Japan [J]. *Bulletin of Marine Science*, 2022, 98(3): 247-270.
- [53] LINDSAY D J, MINAGAWA M, MITANI I, et al. Trophic shift in the Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in its early life history stages as detected by stable isotope ratios in Sagami Bay, Central Japan [J]. *Fisheries Science*, 1998, 64(3): 403-410.
- [54] 温健, 陆鑫一, 余为, 等. 秘鲁外海茎柔鱼栖息地适宜性年代际变动[J]. *海洋学报*, 2020, 42(6): 36-43.
- WEN J, LU X Y, YU W, et al. Decadal variations in habitat suitability of *Dosidicus gigas* in the Southeast Pacific Ocean off Peru [J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(6): 36-43.
- [55] HANDELAND S O, IMSLAND A K, STEFANSSON S O. The effect of temperature and fish size on growth, feed intake, food conversion efficiency and stomach evacuation rate of Atlantic salmon post-smolts [J]. *Aquaculture*, 2008, 283(1/4): 36-42.
- [56] 肖戈. 西北太平洋日本鲭渔场预报模型构建与对比研究[J]. 上海:上海海洋大学, 2022.
- XIAO G. Construction and comparison of fishing ground forecast model of chub mackerel (*Scomber japonicus*) in Pacific Northwest [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.
- [57] DEMER D A, ZWOLINSKI J P, BYERS K A, et al. Prediction and confirmation of seasonal migration of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) in the California Current Ecosystem [J]. *Fishery Bulletin*, 2012, 110(1): 52-70.
- [58] NEWSOME S D, CLEMENTZ M T, KOCH P L. Using stable isotope biogeochemistry to study marine mammal ecology [J]. *Marine Mammal Science*, 2010, 26(3): 509-572.
- [59] 高淳仁, 王印庚, 马爱军, 等. 温度对大菱鲆幼鱼生长、成活率和体内蛋白酶活性的影响[J]. *海洋水产研究*, 2006, 27(6): 33-36.
- GAO C R, WANG Y G, MA A J, et al. The effects of temperature on growth, survival rate and protease activities of juvenile turbot (*Scophthal musmaximus*) [J]. *Marine Fisheries Research*, 2006, 27(6): 33-36.
- [60] BJÖRNSSON B, STEINARSSON A, ÁRNASON T. Growth model for Atlantic cod (*Gadus morhua*): effects of temperature and body weight on growth rate [J]. *Aquaculture*, 2007, 271(1/4): 216-226.
- [61] 杨超, 张衡, 韩海斌, 等. 北太平洋远东拟沙丁鱼渔场时空分布及其最适环境特征[J]. *渔业科学进展*, 2023, 44(4): 99-110.
- YANG C, ZHANG H, HAN H B, et al. Spatio-temporal distribution of *Sardinops sagax* in the North Pacific: optimal environmental characteristics [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2023, 44(4): 99-110.
- [62] BODE A, ALVAREZ-OSSORIO T, VARELA M. Phytoplankton and macrophyte contributions to littoral food webs in the Galician upwelling estimated from stable isotopes [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, 318: 89-102.
- [63] 赵静, 章守宇, 汪振华, 等. 基于GAM模型鱼类群落多样性分布及影响因素[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(12): 3226-3235.
- ZHAO J, ZHANG S Y, WANG Z H, et al. Fish community diversity distribution and its affecting factors based on GAM model [J]. *Chinese Journal of Ecology*,

- 2013, 32(12): 3226-3235.
- [64] POPP B N, GRAHAM B S, OLSON R J, et al. Insight into the trophic ecology of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, from compound-specific nitrogen isotope analysis of proteinaceous amino acids [J]. *Terrestrial Ecology*, 2007, 1: 173-190.
- [65] 陈玲, 王凯, 周曦杰, 等. 岛礁水域海藻场食物网基准生物的选择 [J]. *海洋渔业*, 2016, 38(4): 364-373.
- CHEN L, WANG K, ZHOU X J, et al. Investigation on food web's isotopic baseline in typical reef ecosystem-seaweed bed [J]. *Marine Fisheries*, 2016, 38(4): 364-373.
- [66] GIMÉNEZ J, ALBO-PUIGSERVER M, LAIZ-CARRIÓN R, et al. Trophic position variability of European sardine by compound-specific stable isotope analyses [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2023, 80(5): 761-770.

## Feeding Ecology of *Sardinops melanostictus* in Northwest Pacific Ocean in La Niña Year

LI Jinhui<sup>1</sup>, HU Guanyu<sup>1,2,3,4</sup>, ZHAO Zhenfang<sup>1</sup>, GE Siyu<sup>1</sup>, CHEN Long<sup>1</sup>, CHEN Yingcong<sup>1</sup>

(1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

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

3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 4. Key Laboratory of Sustainable Utilization of Oceanic Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** *Sardinops melanostictus* is mainly distributed in Northwest Pacific Ocean, which is significantly affected by climate change. The carbon and nitrogen stable isotope ratios of the muscles of Japanese sardines from the Northwest Pacific Ocean were measured based on samples taken by the ocean-going fishery resources survey ship “Songhang” in the high seas of the Northwest Pacific Ocean between June and July 2021. The GAM model was then used to examine the effects of both biotic (body length) and abiotic (Latitude, sea surface temperature, offshore distance, chlorophyll-a) factors on the stable nitrogen isotopes; The differences in the trophic niche among sex and body length groups were also analyzed in Japanese sardines in Northwest Pacific Ocean. The results showed that there was no significant difference in muscle  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  between males and females during La Niña years. However, both  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  differed among body length groups. The GAM model's results showed that as body length increases, both  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  exhibited a trend of first decreasing and then increasing;  $\delta^{13}\text{C}$  also exhibits this trend with increasing latitude;  $\delta^{15}\text{N}$  exhibits a negative correlation with both offshore distance and chlorophyll-a. The overlap rate between female and male niche is generally high, with a similar niche width between females and males ranging from 100 to 160 mm. The width of the ecological niche varied across the length groups, and its position changed with growth. However, compared to males, females have substantially broader niches, ranging from 161 to 220 mm. In contrast to usual years, the La Niña year's readings for  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  are all low. The study demonstrates that the feeding ecology of Japanese sardines in Northwest Pacific Ocean varies depending on sex and body length, and that changes in the marine environmental elements under La Niña events affected the feeding ecology of Japanese sardines.

**Key words:** *Sardinops melanostictus*; feeding ecology; stable isotopes; La Niña