

DOI: 10.12264/JFSC2023-0189

基于脂肪酸分析的太平洋黄鳍金枪鱼营养生态位研究

周成^{1,2,3}, 杨旭¹, 杨报国¹, 王少琴^{1,2,3}

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. 上海海洋大学, 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306

摘要: 黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)是生态系统中的顶级捕食者, 是海洋生态系统能量流动及物质循环的重要一环。为研究太平洋黄鳍金枪鱼在个体发育过程中的摄食变化以及不同海域营养生态位差异, 根据 2019 年东太平洋和 2021 年中西太平洋海域金枪鱼渔船采集的黄鳍金枪鱼样本, 对其肌肉的脂肪酸组成及特征进行了分析研究。结果显示, 黄鳍金枪鱼肌肉检测出 34 种脂肪酸, 包括 16 种饱和脂肪酸(SFA), 8 种单不饱和脂肪酸(MUFA), 10 种多不饱和脂肪酸(PUFA)。黄鳍金枪鱼肌肉脂肪酸中 SFA 含量与 PUFA 含量呈负相关, MUFA 含量与 PUFA 含量呈正相关。SFA 含量与叉长呈显著负相关, MUFA、PUFA 含量与叉长呈显著正相关。中西太平洋和东太平洋黄鳍金枪鱼肌肉脂肪酸含量存在差异, 两海域之间脂肪酸组成平均不相似性为 18.85%, 主要差异来自 n-3 系列多不饱和脂肪酸(n-3 PUFA)、SFA、PUFA、C22: 6n3 (DHA)、C16: 0、C18: 1n9、MUFA、C22: 6n3/C20: 5n3 (DHA/EPA)、C18: 0、n-6 系列多不饱和脂肪酸(n-6 PUFA)。主成分分析显示, 黄鳍金枪鱼的营养级越高, 肉食性越高, 以海藻和硅藻为食源的生物对黄鳍金枪鱼的能量来源贡献越大。相反, 营养级越低的黄鳍金枪鱼主要摄食以细菌、陆地植物和植食性桡足类为食源的生物。主成分回归表明, 黄鳍金枪鱼随叉长增大, 其营养级增加, 肉食性提高, 食性逐渐由以甲壳类和头足类向虾和硬骨鱼等富含多种特征脂肪酸的生物转变。东太平洋黄鳍金枪鱼较中西太平洋肉食性更强, 营养级更高, 甲壳类对其能量贡献更大。

关键词: 太平洋; 黄鳍金枪鱼; 营养生态位; 脂肪酸组成

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)10-1202-12

太平洋黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)因其丰富的资源储量、较高的营养价值和经济价值等特点, 成为最重要的经济类金枪鱼之一, 是围网和延绳钓渔业的主要捕捞对象之一^[1]。据统计, 2021 年太平洋黄鳍金枪鱼捕捞产量占全球金枪鱼捕捞产量的 19%, 占全球黄鳍金枪鱼捕捞产量的 65%^[2]。出于资源评估和管理的目的, 黄鳍金枪鱼在太平洋被划分为东太平洋种群和中西太平洋种群^[2], 这两个种群在过去几十年中都受到了高强

度的捕捞。深入了解太平洋黄鳍金枪鱼的摄食生态特性不仅有助于了解其生活史以及揭示其在食物网和海洋生态系统结构中的作用, 还能为区域性渔业管理组织(regional fisheries management organizations, RFMO)实施基于生态系统的渔业管理方式(ecosystem based fisheries management, EBFM)提供科学可靠的依据^[3]。

胃含物分析是海洋生物食性研究中一种常见且传统的方法^[4], 然而, 由于该方法往往无法捕

收稿日期: 2023-08-08; 修订日期: 2023-09-06.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42306145); 国家重点研发计划项目(2019YFD0901502, 2020YFD0901202); 上海海洋大学科技发展专项基金项目(A2-2006-22-200208).

作者简介: 周成(1987-), 男, 副教授, 研究方向为金枪鱼渔业. E-mail: c-zhou@shou.edu.cn

通信作者: 王少琴, 工程师, 研究方向为海洋鱼类摄食生态. E-mail: sqwang@shou.edu.cn

提到被快速消化的食物,所提供的信息只能反映短期摄食情况^[5]。为了解决这一问题,已有学者提出利用肌肉组织中稳定同位素比值及脂肪酸组成作为食性指标^[6-7]。不同生物对脂肪酸的合成和转化能力不同,特定的脂肪酸只能由特定的生物合成,且脂肪酸在捕食者和被捕食者之间传递时具有保守性,因此脂肪酸标记法可用于指示捕食者的食物来源以及判断生物之间的摄食关系^[8]。脂肪酸标记法已在海洋生物的食性研究中得到广泛应用,相比胃含物分析更能反映出生物较长时间段内的食性^[9]。

以往研究中,学者们已从不同地理群体^[10]和不同生长阶段^[11]等方面对黄鳍金枪鱼的生物学特性、摄食模式和繁殖等进行了深入研究^[12-13]。研究发现,黄鳍金枪鱼主要摄食鱼类、头足类和甲壳类^[14]。通过对夏威夷沿岸黄鳍金枪鱼的胃含物分析和稳定同位素分析发现,黄鳍金枪鱼在叉长 45~50 cm 时食性发生变化^[15]; Varela 等^[16]研究表明,黄鳍金枪鱼的食性变化不仅与饵料类型有关,还与饵料体型有关,与 Varghese 等^[17]在阿拉伯海捕获的黄鳍金枪鱼食性研究的结论一致。此外, Laptikhovsky 等^[18]比较了南大西洋圣赫勒拿及其邻近海山黄鳍金枪鱼的摄食策略,发现无论是在偏远的海山还是靠近岛屿,黄鳍金枪鱼全年主要摄食鱼类。

目前,对于太平洋海域的黄鳍金枪鱼摄食生态学研究主要集中在传统的胃含物分析和胃含物与稳定同位素相结合的方法上。有关脂肪酸组成的研究仅限于其营养价值方面,尚未有将脂肪酸组成应用于太平洋海域黄鳍金枪鱼摄食生态学研究。此外,关于太平洋流域不同水域黄鳍金枪鱼的营养生态位差异尚未有相关报道。为此,本研究以中西太平洋海域和东太平洋海域捕捞的黄鳍金枪鱼为研究对象,通过测定黄鳍金枪鱼肌肉脂肪酸组成,比较其不同叉长和不同海域脂肪酸组成差异,探究太平洋黄鳍金枪鱼在个体发育过程中的摄食变化以及两个海域黄鳍金枪鱼营养生态位差异,以期为进一步探究黄鳍金枪鱼资源养护和渔业管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查海域及时间

本研究东太平洋黄鳍金枪鱼样本来源于执行农业农村部东太平洋公海大眼金枪鱼资源探捕项目的调查船捕捞的渔获,调查船为大连远洋渔业金枪鱼有限公司所属的超低温玻璃钢金枪鱼延绳钓船“隆兴 801”。调查海域范围为 1°02'N~6°57'N, 124°20'W~135°15'W, 调查时间为 2019 年 12 月至次年 1 月。中西太平洋的样本来源于中国水产有限公司所属“中太 7 号”金枪鱼围网渔船捕捞的渔获,作业海域范围为 5°39'S~0°41'N, 161°24'E~179°E, 采样时间为 2021 年 2 月至 2021 年 3 月。本研究所有样品采集的调查站点见图 1。

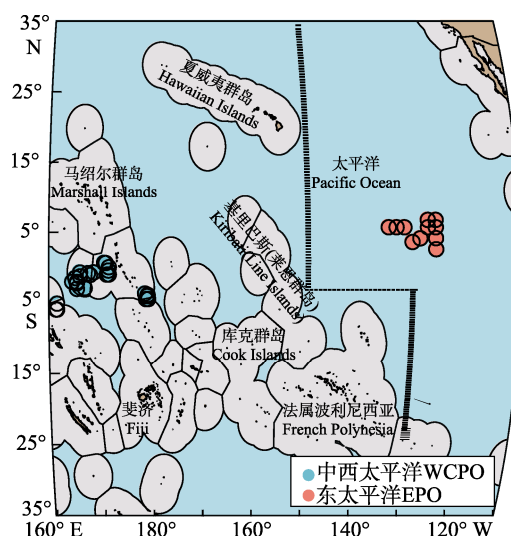


图 1 调查区域及采样站点

Fig. 1 Survey area and sampling stations

1.2 调查方法

按照海洋调查规范(GB12763.3-91)测定黄鳍金枪鱼的叉长、体重和性腺成熟度、摄食等级等生物学参数,取黄鳍金枪鱼背鳍附近的白肌组织,用锡箔纸包裹放入冻库,带回实验室进行分析,运回实验室后于-80℃冷冻保存。

1.3 实验方法

1.3.1 样品处理 实验室解冻后,使用超纯水漂洗后放入冷冻干燥机(Christ Alpha 1-4) -55℃干燥 24 h,干燥后,用冷冻混合球磨仪(Mixer mill MM440)磨碎成粉末(直径 5 μm)。

1.3.2 脂肪酸提取及测定 本实验采用 Folch 法^[19]提取脂肪酸,称取每条黄鳍金枪鱼肌肉组织粉末 0.2 g 于离心管中,并作标记,加 15 mL 二氯甲烷-甲醇溶液(体积比 2 : 1),摇匀使接触充分,浸泡 20 h 以上。将泡好的样品过滤到新的离心管中,并在新离心管中加入 4 mL 0.9%氯化钠溶液,静置 2 h,取 4 mL 下清液移入圆底烧瓶中,蒸发得到粗脂肪样品。在圆底烧瓶中加入 4 mL 浓度为 0.5 mol/L 的氢氧化钾和甲醇混合溶液,连接水浴装置,打开回流,水浴加热 8 min 后加入 4 mL 三氯化硼-甲醇溶液,继续加热 25 min,加入 4 mL 正己烷溶液,回流萃取 2 min 后,将圆底烧瓶移出水浴装置,冷却后加入 10 mL 氯化钠饱和溶液,摇匀后移入试管中静置 30 min,用一次性针管吸取 1 mL 上层溶液于样品瓶中。吸取 200 μ L 正己烷层置于 1.5 mL 玻璃样品瓶中,加入相同量十九烷酸甲酯内标(50 mg/L),置于气相色谱-质谱联用仪(GC-MS, 美国 Agilent, 7890B)中测定。色谱柱规格为 HP-88 (60 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.20 μ m)。程序的升温条件:初始为 125 $^{\circ}$ C,以 8 $^{\circ}$ C/min 频率升至 145 $^{\circ}$ C,保持 26 min,后以 2 $^{\circ}$ C/min 频率升至 220 $^{\circ}$ C,保持 1 min,后以 1 $^{\circ}$ C/min 频率升至 227 $^{\circ}$ C,保持 1 min。分流比 10 : 1,载气为高纯氦气。

以 37 种脂肪酸甲酯混标的保留时间为标准定性分析脂肪酸成分,以十九烷酸甲酯为标准品,对脂肪酸进行定量分析,计算各脂肪酸占总脂肪酸含量的百分比,脂肪酸含量以平均值 $\pm$ 标准差的形式表示。

1.4 数据处理

使用 Mann-Whitney U 检验分析两个海域黄鳍金枪鱼的叉长是否存在显著差异;分别计算太平洋海域总样本各脂肪酸含量、中西太平洋海域样本各脂肪酸含量和东太平洋海域样本各脂肪酸含量,用 Kruskal-Wallis 检验分析两个海域间各脂肪酸含量是否存在显著性差异;采用非度量多维尺度分析(NMDS)探究不同海域黄鳍金枪鱼肌肉脂肪酸组成的空间差异,并以胁强系数(stress)评估分析结果的质量。当 stress 值小于 0.1 时,可认为排序效果良好;使用 Bray-Curtis 相似性系数,

以相似性分析(ANOSIM)比较不同海域间的空间差异大小。当 R 值大于等于 0.75 时,表示组间分离强,组间差异显著大于组内;当 R 值介于 0.25 和 0.75 之间时,表示组间有分离,组间差异大于组内;当 R 值小于 0.25 时,表示组间几乎不分离,组间差异小于组内;通过分析相似性百分比(SIMPER),确定导致黄鳍金枪鱼肌肉脂肪酸组成空间差异的主要脂肪酸类型;利用 Spearman 相关性分析检验脂肪酸含量与叉长的相关性;采用主成分分析(PCA)提取特征脂肪酸的主要成分,并利用主成分回归拟合叉长与主成分之间的关系。

2 结果与分析

本研究共收集热带太平洋海域黄鳍金枪鱼 66 尾,其叉长范围为 250~1500 mm,平均叉长为(849 $\pm$ 430) mm。东太平洋黄鳍金枪鱼的叉长范围为 740~1500 mm,平均叉长为(1222 $\pm$ 210) mm;中西太平洋黄鳍金枪鱼的叉长范围为 250~545 mm,平均叉长为(427 $\pm$ 100) mm(图 2a)。Mann-Whitney U 检验结果显示,东太平洋和中西太平洋捕获黄鳍金枪鱼群体的叉长差异显著($P<0.05$),中西太平洋海域黄鳍金枪鱼叉长显著小于东太平洋海域。

2.1 黄鳍金枪鱼肌肉脂肪酸组成

本研究于 66 尾黄鳍金枪鱼肌肉组织中检测出 34 种脂肪酸(表 1),其中,16 种饱和脂肪酸(SFA),约占总脂肪酸的(52.70 $\pm$ 5.96)%,主要为 C16 : 0、C18 : 0 和 C14 : 0;8 种单不饱和脂肪酸(MUFA),约占总脂肪酸的(24.05 $\pm$ 3.65)%,主要为 C18 : 1n9 和 C16 : 1n7;10 种多不饱和脂肪酸(PUFA),约占总脂肪酸的(23.25 $\pm$ 7.02)%,主要为 C22 : 6n3 (DHA)、C18 : 2n6 和 C20 : 3n3。

Spearman 相关性检验结果显示(图 2b),SFA 含量与叉长呈显著负相关,而 MUFA 和 PUFA 含量与叉长呈显著正相关($P<0.01$)。此外,除了 C16 : 0 以外的所有饱和脂肪酸类型和含量均与黄鳍金枪鱼的叉长呈显著负相关($P<0.01$)。在单不饱和脂肪酸中,含量较高的 C18 : 1n9 和 C17 : 1n7 与叉长呈显著正相关($P<0.01$)。在多不饱和脂肪酸

表 1 黄鳍金枪鱼脂肪酸组成(含量)
Tab. 1 Fatty acid composition of *Thunnus albacares* (content)

脂肪酸 fatty acid	太平洋海域/% Pacific Ocean	中西太平洋海域/% western and central Pacific Ocean	东太平洋海域/% eastern Pacific Ocean	<i>P</i>	食源指示 corresponding sources
C6 : 0	2.10±0.71	2.4±0.6	1.8±0.6	0.000	
C8 : 0	1.20±0.42	1.4±0.4	1.0±0.4	0.000	
C10 : 0	0.77±0.27	0.9±0.2	0.6±0.2	0.000	
C11 : 0	1.12±0.40	1.3±0.4	0.9±0.4	0.000	
C12 : 0	0.89±0.31	1.0±0.3	0.8±0.3	0.000	
C13 : 0	1.48±0.53	1.7±0.5	1.2±0.5	0.000	
C14 : 0	2.85±0.78	3.4±0.6	2.4±0.6	0.000	
C15 : 0	2.30±0.60	2.7±0.4	2.0±0.5	0.000	细菌 bacteria
C16 : 0	20.10±6.65	20.3±6.7	20.0±6.7	0.6760	
C17 : 0	2.48±0.47	2.8±0.3	2.2±0.4	0.000	细菌 bacteria
C18 : 0	9.12±1.72	10.1±1.6	8.3±1.4	0.000	
C20 : 0	1.06±0.29	1.2±0.2	0.9±0.3	0.000	
C21 : 0	1.78±0.63	2.1±0.5	1.5±0.6	0.000	
C22 : 0	1.29±0.42	1.5±0.4	1.1±0.4	0.000	
C23 : 0	1.93±0.68	2.3±0.6	1.6±0.6	0.000	
C24 : 0	2.26±0.78	2.7±0.7	1.9±0.7	0.000	
SFA	52.70±5.96	57.8±3.6	48.2±3.4	0.000	
C14 : 1n5	2.08±0.74	2.4±0.6	1.7±0.7	0.000	
C15 : 1n5	2.40±0.92	2.8±0.8	1.9±0.8	0.000	
C16 : 1n7	2.85±0.80	3.0±0.5	2.7±1.0	0.032	硅藻 diatom
C17 : 1n7	2.06±0.53	2.5±0.5	1.9±0.4	0.001	
C18 : 1n9	10.69±4.50	8.3±3.5	12.8±4.2	0.000	肉食性 carnivorous
C20 : 1	1.53±0.34	1.8±0.2	1.3±0.3	0.000	植食性桡足类 phytophagous copepods
C22 : 1n9	1.34±0.46	1.6±0.4	1.1±0.4	0.000	
C24 : 1n9	2.35±0.67	2.7±0.6	2.1±0.6	0.000	
MUFA	24.05±3.65	23.2±2.8	24.8±4.1	0.125	
C18 : 2n6	2.84±0.98	2.7±1.0	3.0±1.0	0.215	陆源植物 terrestrial plant
C18 : 3n6	1.57±0.56	1.8±0.5	1.3±0.5	0.000	
C18 : 3n3	1.26±0.42	1.4±0.4	1.1±0.4	0.010	陆源植物 terrestrial plant
C20 : 2	1.72±0.56	2.0±0.5	1.5±0.5	0.000	
C20 : 3n6	1.69±0.59	2.0±0.5	1.4±0.5	0.00	
C20 : 3n3	2.21±0.79	2.8±0.5	2.0±0.8	0.110	
C20 : 4n6 (ARA)	0.15±0.26	0.1±0.1	0.3±0.4	0.221	大型藻类 macroalgae
C22 : 2n6	1.11±0.23	1.1±0.3	1.1±0.2	0.542	
C20 : 5n3 (EPA)	1.20±0.43	0.9±0.3	1.5±0.3	0.000	硅藻 diatom
C22 : 6n3 (DHA)	10.90±6.27	6.6±3.3	14.7±5.8	0.000	甲藻 dinoflagellates
PUFA	23.25±7.02	19.0±4.9	27.0±6.5	0.000	
PUFA/SFA	0.46±0.18	0.3±0.1	0.6±0.2	0.000	营养级 trophic level
DHA/EPA	8.50±2.44	7.2±1.5	9.7±2.5	0.000	营养级 trophic level
n-3 PUFA	14.39±6.94	9.5±4.0	18.7±6.1	0.000	
n-6 PUFA	7.14±1.90	7.5±1.8	6.8±2.0	0.125	
n-3 PUFA/n-6 PUFA	2.19±1.36	1.3±0.6	3.0±1.4	0.000	

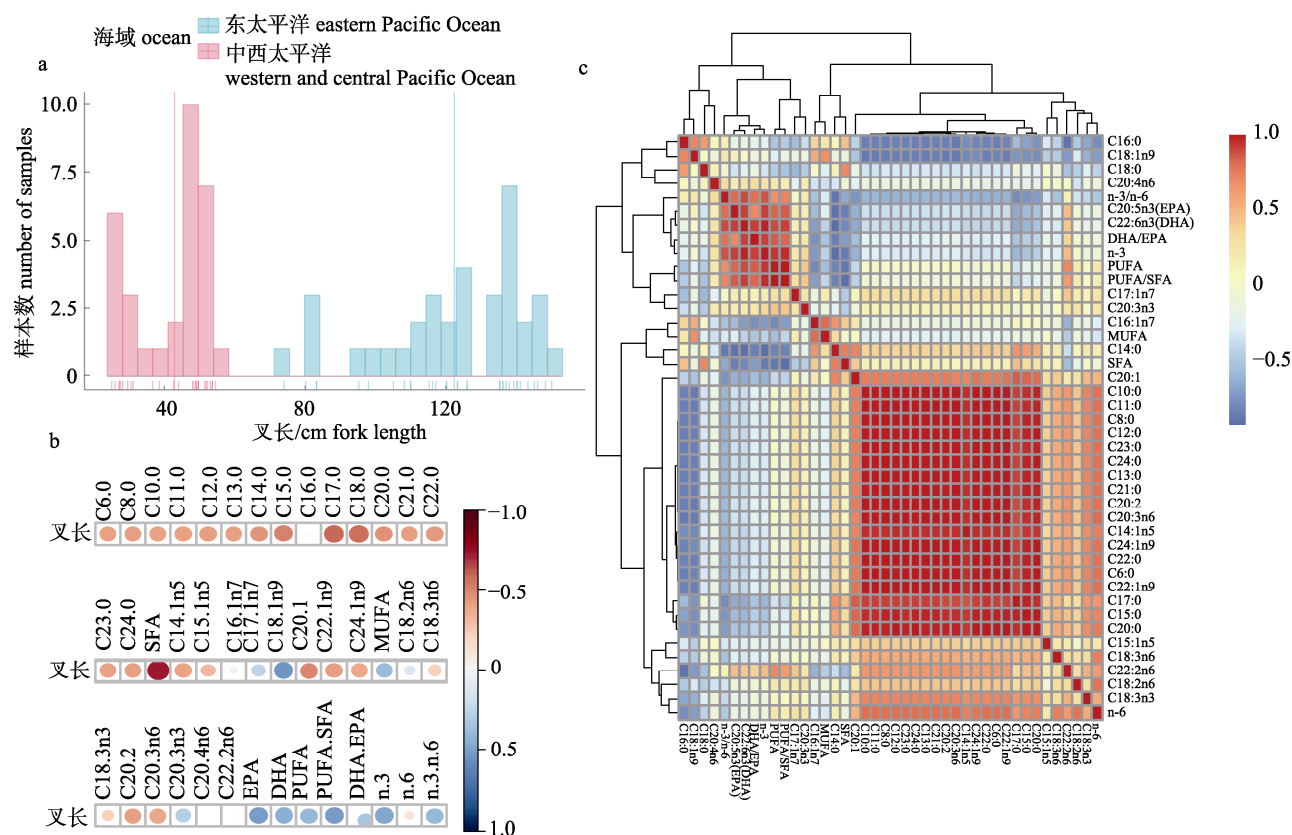


图 2 黄鳍金枪鱼叉长组成、叉长脂肪酸关系、脂肪酸间相关性

a: 黄鳍金枪鱼叉长分布; b: 叉长与脂肪酸关系热图; c: 各脂肪酸间相关性热图

Fig. 2 Composition of *Thunnus albacares* fork length, relationship between fork length and fatty acids, and correlation between fatty acids

Distribution of fork length of *Thunnus albacares* (a); heat map of relationship between fork length (b); heat map of correlation between fatty acids (c)

中, 含量较高的 DHA、EPA 和 C20 : 3n3 均与叉长呈显著正相关($P < 0.01$), DHA/EPA、PUFA/SFA 和 n-3 PUFA/n-6 PUFA 比值与叉长呈正相关($P < 0.05$)。

热带太平洋海域黄鳍金枪鱼肌肉脂肪酸间的相关性热图(图 2c)显示, 总体脂肪酸含量关系中, SFA 与 PUFA 的含量呈负相关, MUFA 与 PUFA 的含量呈正相关。在聚类分析中, 将脂肪酸分为 5 组, 第一组包括 C16 : 0、C18 : 1n9、C18 : 0、C20 : 4n6, 第二组包括 n-3 PUFA/n-6 PUFA、EPA、DHA、DHA/EPA、n-3 PUFA, 第三组包括 PUFA、PUFA/SFA、C17 : 1n7、C20 : 3n3, 第四组包括 C16 : 1n7、MUFA、C14 : 0、SFA, 第五组包括 C20 : 1、C10 : 0、C11 : 0、C8 : 0、C12 : 0、C23 : 0、C24 : 0、C13 : 0、C21 : 0、C20 : 2、C20 : 3n6、C14 : 1n5、C24 : 1n9、C22 : 0、C6 : 0、C22 : 1n9、C17 : 0、C15 : 0、C20 : 0、C15 :

1n5、C18 : 3n6、C22 : 2n6、C18 : 2n6、C18 : 3n3、n-6 PUFA。其关系表明, 具有营养级指示作用的特征脂肪酸与肉食性特征脂肪酸、食源指示硅藻、甲藻的特征脂肪酸呈正相关, 与食源指示细菌和植食性桡足类特征脂肪酸呈负相关。

非度量多维尺度分析(NMDS)结果如图 3a 所示, 表明两海域黄鳍金枪鱼脂肪酸组成存在差异(stress<0.1)。ANOSIM 分析结果显示, 两个海域的黄鳍金枪鱼脂肪酸组成存在显著差异($R = 0.463$, $P < 0.05$)。根据 SIMPER 分析结果, 中西太平洋黄鳍金枪鱼肌肉脂肪酸含量平均相似性为 87.78%, 东太平洋黄鳍金枪鱼肌肉脂肪酸含量平均相似性为 85.76%。两个海域之间的平均不相似性为 18.85%, 其差异主要来自 n-3 PUFA、SFA、PUFA、DHA、C16:0、C18:1n9、MUFA、DHA/EPA、C18:0、n-6 PUFA, 总贡献率为 71.57% (表 2)。

表 2 不同海域黄鳍金枪鱼脂肪酸平均相异性贡献率

Tab. 2 Average dissimilarity contribution rate of fatty acids of *Thunnus albacares* in different waters

脂肪酸 fatty acid	中西太平洋平均丰度 average abundance in the western and central Pacific	东太平洋平均丰度 average abundance in the eastern Pacific	组间差异贡献率/% contribution rate of difference between groups	累积贡献率/% cumulative contribution rate
n-3 PUFA	9.48	18.73	11.37	11.37
SFA	57.81	48.16	11.19	22.56
PUFA	19.00	27.02	10.97	33.53
DHA	6.61	14.70	9.93	43.45
C16 : 0	20.26	19.96	8.30	51.75
C18 : 1n9	8.30	12.80	6.52	58.27
MUFA	23.19	24.82	4.68	62.95
DHA/EPA	7.17	9.68	3.58	66.53
C18 : 0	10.05	8.30	2.57	69.10
n-6 PUFA	7.51	6.81	2.47	71.57

2.2 特征脂肪酸分析

对黄鳍金枪鱼肌肉特征脂肪酸数据进行主成分分析(PCA), 前两个主成了解释了数据总方差的 80% (图 3b)。第一主成了解释了数据方差的 51.1%, PUFA/SFA、DHA/EPA、DHA、EPA、C18 : 1n9 处于第一主成分正半轴, C15 : 0、C17 : 0、C20 : 1、C16 : 1n7、C18 : 2n6、C18 : 3n3 处于第一主成分负半轴, 这说明黄鳍金枪鱼的营养级越高, 肉食性越高, 以甲藻和硅藻为食源的生物对黄鳍金枪鱼的能量来源贡献越大。相反, 营养级越低的黄鳍金枪鱼越多摄食以细菌、陆地植物和植食性桡足类为食源的生物。第二主成了解释了数据方差的 28.9%, 在第二主成分中, C16 :

1n7、C18 : 1n9 位于正半轴, 而 PUFA/SFA、DHA/EPA、DHA、EPA、C15 : 0、C17 : 0、C20 : 1、C18 : 2n6、C18 : 3n3 则在负半轴。

中西太平洋海域的黄鳍金枪鱼样本主要分布在第一主成分的负半轴, 而东太平洋海域的样本分布更广, 主要分布在第一和第二主成分的正半轴。两个海域的样本之间存在一些重叠区域(图 3b)。

主成分回归分析发现主成分一与叉长有显著相关性($P<0.05$), 解释率为 41.2% (图 4); 而第二主成分对叉长则无显著影响($P>0.05$)。这表明随着黄鳍金枪鱼叉长的增加, C18 : 1n9、EPA 和 DHA 的含量增加, PUFA/SFA 和 DHA/EPA 比值增大; 与此同时, C16 : 1n7、C15 : 0、C17 : 0、C18 : 2n6、

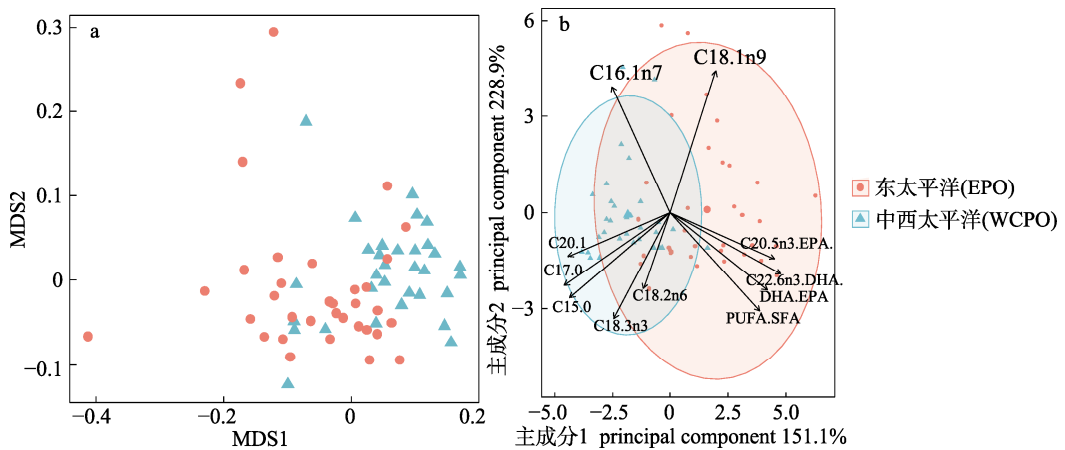


图 3 黄鳍金枪鱼脂肪酸分析

a: 两海域黄鳍金枪鱼脂肪酸 NMDS 分析; b: 特征脂肪酸主成分分析

Fig. 3 Fatty acids analysis of *Thunnus albacares*

NMDS analysis of fatty acids of *Thunnus albacares* in two sea areas (a); principal component analysis of characteristic fatty acids (b)

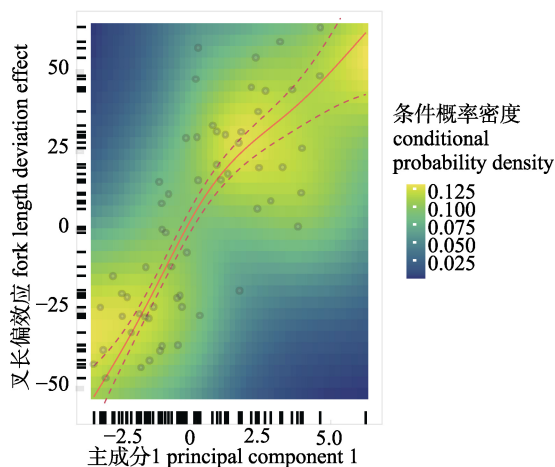


图 4 黄鳍金枪鱼叉长与特征脂肪酸主成分的回归关系
Fig. 4 Nonlinear relationship between fork length and the first principal component of characteristic fatty acids of *Thunnus albacares*

C18 : 3n3 和 C20 : 1 的含量降低。上述表明, 随着黄鳍金枪鱼叉长的增大其营养级越高, 肉食性越强, 摄食以甲藻和硅藻为食源的生物越多, 而摄食以细菌、陆地植物和植食性桡足类为食源的生物则越少。

3 讨论

3.1 黄鳍金枪鱼肌肉组织营养分析

本研究中, 太平洋海域黄鳍金枪鱼肌肉组织中含有 34 种脂肪酸, 其中 16 种 SFA, 8 种 MUFA, 10 种 PUFA。从脂肪酸含量上看, SFA 含量最高, 这与 Domingues 等^[20]的研究结果一致。另外, Peng 等^[21]研究发现黄鳍金枪鱼肌肉组织中含有 20 种脂肪酸, Sardenne 等^[22]指出黄鳍金枪鱼肌肉组织中含有 26 种脂肪酸, 结果均与本研究存在较大差异, 这可能是由于被捕食者类型不同而导致的^[23]。海洋生物脂肪酸可以追溯到海洋初级生产者, 特定海域的生物脂肪酸组成主要受浮游植物优势种的影响^[24]。浮游植物脂肪酸的组成受到环境因素如温度和光照等的影响, 因此, 生物脂肪酸的组成特征最终受所处海域的环境条件所决定^[25]。

黄鳍金枪鱼富含 n-3 和 n-6 系列多不饱和脂肪酸, 如 DHA 等必需脂肪酸, 被国际组织公认为世界三大营养鱼之一^[26]。本研究发现黄鳍金枪鱼肌肉组织中, n-3 和 n-6 系列多不饱和脂肪酸含量占

总脂肪酸的 21.53%, 其中 DHA 含量占总脂肪酸 10.9%。金枪鱼体内 DHA 含量随着摄食时间的增加而增加, 这是饵料生物 DHA 在金枪鱼体内逐渐积累的结果^[27]。DHA/EPA 随着生物营养级的升高而增加^[28]。本研究发现黄鳍金枪鱼肌肉中 EPA 含量仅为 1.2%, DHA/EPA 比值高达 9.1, 尽管在其他海洋鱼类中较为罕见, 但在金枪鱼类中比较常见, 相比非洄游性鱼类, 高度洄游鱼类的肌肉组织中 DHA 含量要更高^[29]。例如, 北大西洋和太平洋黄鳍金枪鱼肌肉中, DHA/EPA 比值分别高达 11.30 和 7.08^[30]。

3.2 黄鳍金枪鱼个体发育过程中的摄食变化

黄鳍金枪鱼是一种高度洄游的大洋性中上层鱼类, 随着叉长的增大其游泳能力得到增强。这一特征在脂肪酸组成方面也有所反映, 即不同体型个体中的供能脂肪酸含量存在一定差异^[31]。本研究发现黄鳍金枪鱼的 SFA 含量随着叉长的增大而减少, 这与陈银基等^[32], 王艳等^[33]研究的结果一致。SFA 可以为机体提供能量, 在游动过程中鱼类会优先消耗 SFA^[34]。

DHA 可用于指示甲藻为其食物来源^[35]。DHA 在许多双壳类和甲壳类中被选择性地保留在体内, 因此可作为指示摄食甲壳类的特征脂肪酸^[36]。C18 : 1n9 被认为是肉食性的食性特征^[37]。C16 : 1n7 和 EPA 被认为是硅藻的食性特征, 头足类中 EPA 含量较高, 因此 EPA 可作为摄食头足类的特征脂肪酸^[38]。本研究中发现黄鳍金枪鱼肌肉 DHA、C18 : 1n9 含量较高, DHA、EPA 和 C18 : 1n9 含量与其叉长呈显著正相关。这表明随着叉长增大, 黄鳍金枪鱼肉食性增强, 对主要以甲藻、硅藻为食的生物的摄食量也在增加, 如摄食甲壳类和头足类和以甲壳类和头足类为食的饵料生物等, 这与黄鳍金枪鱼胃含物分析结果一致^[39]。C15 : 0 和 C17 : 0 则是海洋浮游细菌的特征脂肪酸^[40], C18 : 2n6 和 C18 : 3n3 是陆地植物特征脂肪酸^[41], C20 : 1 是植食性桡足类特征脂肪酸^[42], 本研究中发现黄鳍金枪鱼肌肉中 C18 : 2n6、C18 : 3n3、C20 : 1、C15 : 0 和 C17 : 0 含量与叉长呈显著负相关, 说明随着叉长的增加, 黄鳍金

枪鱼对以植食性桡足类、陆地植物和海洋浮游细菌为食的生物的能量来源贡献减小, 如纤毛虫等游泳动物。

PUFA 主要由 n-3 PUFA 和 n-6 PUFA 系列脂肪酸组成, n-6 PUFA /n-3 PUFA 的比值被用来估计腐生食物链和捕食食物链对于高营养级捕食者的贡献程度^[43], 同时 PUFA/SFA 和 DHA/EPA 比值可以间接指示生物营养级^[36], 本研究发现黄鳍金枪鱼 n-6 PUFA /n-3 PUFA、PUFA/SFA 和 DHA/EPA 比值与叉长呈显著正相关, 表明随着叉长的增大, 黄鳍金枪鱼营养级升高, 食物来源和食性逐渐由以甲壳类和头足类向虾和硬骨鱼等富含多种特征脂肪酸的生物转变, 这与先前研究的结论相一致, Maldeniya^[44]通过胃含物分析斯里兰卡水域黄鳍金枪鱼食性分析发现, 叉长小于 400 mm 的黄鳍金枪鱼以浮游甲壳类动物为食, 叉长大于 500 mm 的黄鳍金枪鱼则以鱼类为食。对台湾西南海域黄鳍金枪鱼幼鱼胃含物分析发现, 叉长小于 500 mm 的黄鳍金枪鱼幼鱼主要以鳶乌贼幼体和幼虾等浮游生物为食。叉长大于 500 mm 的黄鳍金枪鱼食性转换为硬骨鱼类, 如日本梭鱼等鱼类^[45]。黄鳍金枪鱼的食性转变可以减少种内竞争、提高幼鱼的存活率, 并满足其生长发育的能量需求^[45]。

3.3 两海域黄鳍金枪鱼脂肪酸组成差异

通过 NMDS、ANOSIM、SIMPER 和特征脂肪酸 PCA 分析结果表明, 两海域黄鳍金枪鱼肌肉脂肪酸组成具有显著差异, 证明肌肉脂肪酸组成特征可用于区分两个海域的黄鳍金枪鱼群体。此发现进一步支持了 Parrish 等^[27]与 Sardenne 等^[28]对特征脂肪酸在金枪鱼种群隔离上的有效性的研究结果。

东太平洋相对于中西太平洋而言, 其岛屿、海山和环礁较少, 温跃层一般较浅, 这两个因素会影响热带金枪鱼的饮食^[46]。不同海域的光照、水温和营养盐的差异可能导致浮游植物种类和丰度的空间差异, 而某些浮游植物含有特定脂肪酸, 这些脂肪酸可以通过摄食活动传递到高级营养级生物的脂肪酸组成中^[47-48]。DHA 为金枪鱼必需脂肪酸之一, 可作为摄食甲藻纲的特征脂肪酸^[49]。甲藻类具有极强的趋光性, 而东太平洋海域中岛

屿、海山和环礁较少, 光照相对充足。此外, 在赤道逆流的影响下, 赤道逆流的表层水具有高温和低盐以及高氮磷比的特征。温跃层较浅, 将下层的营养盐带到表层, 有利于甲藻类等浮游生物的生长^[50]。两海域黄鳍金枪鱼肌肉组织中 DHA 含量较高, 说明其摄食甲壳类、虾类等以甲藻为食源的生物, 这与朱国平等^[51]发现黄鳍金枪鱼胃中存在甲壳类生物的结果一致。另外, 中西太平洋海域黄鳍金枪鱼食物能量来源甲壳类或以甲壳类为食源的生物贡献低于东太平洋。石肖飞等^[52]对热带中西太平洋海域黄鳍金枪鱼的摄食生物学特性研究后发现, 其主要摄食鱼类、头足类、甲壳类; 苏天骄等^[53]东太平洋公海延绳钓黄鳍金枪鱼生物学特性的胃含物分析发现, 其主要摄食虾类、鱿鱼、乌贼等。以上两个结果进一步证实了东太平洋黄鳍金枪鱼较多的摄食甲壳类。

本研究中黄鳍金枪鱼叉长的海域差异, 可能与捕捞方式有关, 东太平洋海域黄鳍金枪鱼样本为延绳钓捕捞, 中西太平洋样本为围网捕获, 东太捕获样本平均叉长为 (1222 ± 210) mm; 中西太平洋黄鳍金枪鱼的平均叉长为 (427 ± 100) mm, 中西太平洋黄鳍金枪鱼样本 SFA 含量大于东太平洋, 其原因可能是随着叉长的增大其游动能力增强消耗更多的 SFA^[31-34]。此外, 中西太平洋黄鳍金枪鱼样本 PUFA 含量低于东太平洋, 其原因可能是随着叉长的增大黄鳍金枪鱼对 PUFA 中 DHA、EPA 和 ARA 等必需脂肪酸的需求随之增大, 黄鳍金枪鱼最小性成熟叉长为 1134 mm^[54], PUFA 对硬骨鱼的性成熟和精子产生均发挥重要作用^[55], PUFA 也可促进水生动物卵黄正常发生、胚胎发育和提高卵的孵化率^[56], 黄鳍金枪鱼产卵期随年龄和体长等变化而变化, 叉长较大的黄鳍金枪鱼通常在冬季产卵^[57], 产卵期黄鳍金枪鱼体内储存 PUFA 来满足自身需求。因此, 叉长差异可能是导致本研究结果出现两海域黄鳍金枪鱼脂肪酸组成和含量不同的因素之一。

参考文献:

- [1] Li P, Chen J T, Zhu G P, et al. Biological characteristics of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in southern and central Indian Ocean[J]. Marine Fisheries, 2010, 32(3): 283-289. [李攀, 陈

- 锦淘, 朱国平, 等. 印度洋中南部大眼金枪鱼生物学特性研究[J]. 海洋渔业, 2010, 32(3): 283-289.]
- [2] International Seafood Sustainability Foundation. Status of the world fisheries for tuna[R]. ISSF Technical Report 2023-01. USA: International Seafood Sustainability Foundation. 2023:1-116.
- [3] Rubio I, Ganzedo U, Hobday A J, et al. Southward re-distribution of tropical tuna fisheries activity can be explained by technological and management change[J]. Fish and Fisheries, 2020, 21(3): 511-521.
- [4] Dou S Z. Fish-stomach content analysis: Methods and application[J]. Marine Science Bulletin, 1992, 11(2): 28-31. [窦硕增. 鱼类胃含物分析的方法及其应用[J]. 海洋通报, 1992, 11(2): 28-31.]
- [5] Hyslop E J. Stomach contents analysis-a review of methods and their application[J]. Journal of Fish Biology, 1980, 17(4): 411-429.
- [6] Hobson K A, Piatt J F, Pitocchelli J. Using stable isotopes to determine seabird trophic relationships[J]. The Journal of Animal Ecology, 1994, 63(4): 786.
- [7] Tierney M, Nichols P D, Wheatley K E, et al. Blood fatty acids indicate inter- and intra-annual variation in the diet of Adélie penguins: Comparison with stomach content and stable isotope analysis[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2008, 367(2): 65-74.
- [8] Dalsgaard J, St John M, Kattner G, et al. Fatty acid trophic markers in the pelagic marine environment[J]. Advances in Marine Biology, 2003, 46: 225-340.
- [9] Xie B, Li Y K, Zhang H, et al. Food web foundation and seasonal variation of trophic structure based on the stable isotopic technique in the marine ranching of Haizhou Bay, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(7): 2292-2298. [谢斌, 李云凯, 张虎, 等. 基于稳定同位素技术的海州湾海洋牧场食物网基础及营养结构的季节性变化[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2292-2298.]
- [10] Song L M, Chen X J, Xu L X. Preliminary analysis of biological characteristics of yellowfin tuna *thunnus albacares* in the tuna longline fishing ground of the central Atlantic Ocean[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2004, 35(6): 538-542. [宋利明, 陈新军, 许柳雄. 大西洋中部金枪鱼延绳钓渔场黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)生物学特性的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(6): 538-542.]
- [11] Hynes H B N. The food of fresh-water sticklebacks (*Gasterosteus aculeatus* and *Pygosteus pungitius*), with a review of methods used in studies of the food of fishes[J]. The Journal of Animal Ecology, 1950, 19(1): 36.
- [12] Cortés E. A critical review of methods of studying fish feeding based on analysis of stomach contents: Application to elasmobranch fishes[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1997, 54(3): 726-738.
- [13] Figueiredo M, Morato T, Barreiros J P, et al. Feeding ecology of the white seabream, *Diplodus sargus*, and the ballan wrasse, *Labrus bergylta*, in the Azores[J]. Fisheries Research, 2005, 75(1-3): 107-119.
- [14] Logan J M, Lutcavage M E. Assessment of trophic dynamics of cephalopods and large pelagic fishes in the central North Atlantic Ocean using stable isotope analysis[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2013, 95: 63-73.
- [15] Graham B S, Grubbs D, Holland K, et al. A rapid ontogenetic shift in the diet of juvenile yellowfin tuna from Hawaii[J]. Marine Biology, 2007, 150(4): 647-658.
- [16] Varela J L, Intriago K M, Flores J C, et al. Feeding habits of juvenile yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in Ecuadorian waters assessed from stomach content and stable isotope analysis[J]. Fisheries Research, 2017, 194: 89-98.
- [17] Varghese S P, Somvanshi V S. Feeding ecology and consumption rates of yellowfin tuna *Thunnus albacares* (Bonnaterre, 1788) in the eastern Arabian Sea[J]. Indian J. Fish, 2016, 63(1): 16-26.
- [18] Laptikhovsky V, Naulaerts J, Clingham E, et al. Comparative feeding strategies of yellowfin tuna around St Helena and adjacent seamounts of the South Atlantic Ocean[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2021, 37(1): 38-52.
- [19] Folch J, Lees M, SLOANE STANLEY G H. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues[J]. The Journal of Biological Chemistry, 1957, 226(1): 497-509.
- [20] Domingues V F, Quaresma M, Sousa S, et al. Evaluating the lipid quality of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) harvested from different oceans by their fatty acid signatures[J]. Foods, 2021, 10(11): 2816.
- [21] Peng S M, Chen C X, Shi Z H, et al. Amino acid and fatty acid composition of the muscle tissue of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and bigeye tuna (*Thunnus obesus*)[J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2013, 1: 42-45.
- [22] Sardenne F, Bodin N, Chassot E, et al. Trophic niches of sympatric tropical tuna in the Western Indian Ocean inferred by stable isotopes and neutral fatty acids[J]. Progress in Oceanography, 2016, 146: 75-88.
- [23] Young J W, Lansdell M J, Campbell R A, et al. Feeding ecology and niche segregation in oceanic top predators off eastern Australia[J]. Marine Biology, 2010, 157(11): 2347-2368.

- [24] Parrish C C, Abrajano T A, Budge S M, et al. Lipid and phenolic biomarkers in marine ecosystems: Analysis and applications[M]//The Handbook of Environmental Chemistry. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005: 193-223.
- [25] Arts M T, Brett M T, Kainz M. Lipids in aquatic ecosystems [M]. Dordrecht: Springer, 2009.
- [26] Ishihara K, Saito H. The docosahexaenoic acid content of the lipid of juvenile bluefin tuna *Thunnus thynnus* caught in the sea off Japanese coast[J]. Fisheries Science, 1996, 62(5): 840-841.
- [27] Parrish C C, Pethybridge H, Young J W, et al. Spatial variation in fatty acid trophic markers in albacore tuna from the southwestern Pacific Ocean—a potential ‘tropicalization’ signal[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2015, 113: 199-207.
- [28] Sardenne F, Kraffe E, Amiel A, et al. Biological and environmental influence on tissue fatty acid compositions in wild tropical tunas[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A, Molecular & Integrative Physiology, 2017, 204: 17-27.
- [29] Garaffo M A, Vassallo-Agius R, Nengas Y, et al. Fatty acids profile, atherogenic (IA) and thrombogenic (IT) health lipid indices, of raw roe of blue fin tuna (*Thunnus thynnus* L.) and their salted product “bottarga”[J]. Food and Nutrition Sciences, 2011, 2(7): 736-743.
- [30] Medina I, Aubourg S P, Martín R P. Composition of phospholipids of white muscle of six tuna species[J]. Lipids, 1995, 30(12): 1127-1135.
- [31] Wang T, Gao C X, Wang S Q, et al. Characteristics of fatty acid composition and dietary indication of small yellow croaker in the offshore waters of southern Zhejiang[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(6): 992-1001. [王腾, 高春霞, 王少琴, 等. 浙江南部近海小黄鱼肌肉脂肪酸组成及食源指示分析[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(6): 992-1001.]
- [32] Chen Y J, Ju X R, Zhou G H. Classification and physiological function of saturated fatty acids[J]. China Oils and Fats, 2008, 33(3): 35-39. [陈银基, 鞠兴荣, 周光宏. 饱和脂肪酸分类与生理功能[J]. 中国油脂, 2008, 33(3): 35-39.]
- [33] Wang Y, Hu X C, Han Q. Composition of fatty acids in starved and refeeding juvenile sea perch *Lateolabrax japonicus* under different salinities[J]. Fisheries Science, 2008, 27(7): 334-339. [王艳, 胡先成, 韩强. 不同盐度条件下饥饿及恢复摄食鲈稚鱼脂肪酸的组成[J]. 水产科学, 2008, 27(7): 334-339.]
- [34] Koven W M, Kissil G W, Tandler A. Lipid and n-3 requirement of *Sparus aurata* larvae during starvation and feeding[J]. Aquaculture, 1989, 79(1-4): 185-191.
- [35] Rossi S, Youngbluth M J, Jacoby CA, et al. Fatty acid trophic markers and trophic links among seston, crustacean zooplankton and the siphonophore *Nanomia cara* in Georges Basin and Oceanographer Canyon (NW) Atlantic[J]. Scientia Marina, 2008, 72: 403-416.
- [36] Dalsgaard J, St John M, Kattner G, et al. Fatty acid trophic markers in the pelagic marine environment[J]. Advances in Marine Biology, 2003, 46: 225-340.
- [37] Johns R B, Nichols P D, Perry G J. Fatty acid composition of ten marine algae from Australian waters[J]. Phytochemistry, 1979, 18(5): 799-802.
- [38] Galván-Magaña F, Polo-Silva C, Berenice Hernández-Aguilar S, et al. Shark predation on cephalopods in the Mexican and Ecuadorian Pacific Ocean[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2013, 95: 52-62.
- [39] Buckley Troy W Miller Bruce S. Feeding habits of yellowfin tuna associated with fish aggregation devices in American Samoa[J]. Bulletin of Marine Science, 1994, 55(2-3): 445-459.
- [40] Cui Y. Study on the carbon flow within the estuarine ecosystem in China based on stable isotopes and fatty acid composition[D]. Shanghai: East China Normal University, 2012. [崔莹. 基于稳定同位素和脂肪酸组成的中国近海生态系统物质流动研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.]
- [41] Falk-Petersen S, Sargent J R, Tande K S. Lipid composition of zooplankton in relation to the sub-arctic food web[J]. Polar Biology, 1987, 8(2): 115-120.
- [42] Li L, Zhang S, Wu L Z. Fatty acid composition and feeding habits of ridgetail white prawn *Exopalaemon carinicauda* with different body length[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2019, 34(4): 552-557. [李莉, 张硕, 吴立珍. 脊尾白虾脂肪酸组成特点及其食性分析[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(4): 552-557.]
- [43] Jin X. Plankton food web analysis of the East China Sea and the Yellow Sea using analyses of fatty acids and stable isotopes[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2011. [金鑫. 黄东海浮游食物网的初步研究——基于脂肪酸标记法和碳氮稳定同位素比值法[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2011.]
- [44] Maldeniy R. Food consumption of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, in Sri Lankan waters[J]. Environmental Biology of Fishes, 1996, 47(1): 101-107.
- [45] Jinn-Shing Weng, Ming-An Lee, Kwang-Ming Liu, et al. Feeding Ecology of Juvenile Yellowfin Tuna from Waters Southwest of Taiwan Inferred from Stomach Contents and Stable Isotope Analysis[J]. Marine and Coastal Fisheries,

- 2015,7(1): 537-548.
- [46] Olson R J, Boggs C H. Apex predation by yellowfin tuna (*Thunnus albacares*): Independent estimates from gastric evacuation and stomach contents, bioenergetics, and cesium concentrations[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1986, 43(9): 1760-1775.
- [47] Yang D F, Chen S T, Hu J, et al. Magnitude order of the effect of light, water temperature and nutrients on phytoplankton growth[J]. Marine Environmental Science, 2007, 26(3): 201-207. [杨东方, 陈生涛, 胡均, 等. 光照、水温 和营养盐对浮游植物生长重要影响大小的顺序[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(3): 201-207.]
- [48] Iverson S J, Field C, Don Bowen W, et al. Quantitative fatty acid signature analysis: A new method of estimating predator diets[J]. Ecological Monographs, 2004, 74(2): 211-235.
- [49] Borobia M, Gearing P J, Simard Y, et al. Blubber fatty acids of finback and humpback whales from the Gulf of St. Lawrence[J]. Marine Biology, 1995, 122(3): 341-353.
- [50] Tang H B, Hu S, Hu Z Y, et al. Relationship between *Peridiniopsis* sp. and environmental factors in Lake Donghu, Wuhan[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(6): 632-636. [汤宏波, 胡圣, 胡征宇, 等. 武汉东湖甲藻水华与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2007, 19(6): 632-636.]
- [51] Zhu G P, Xu L X, Zhou Y Q, et al. Feeding habits and its seasonal variations of *Thunnus albacares* in the west-central Indian Ocean[J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(5): 725-732. [朱国平, 许柳雄, 周应祺, 等. 印度洋中西部水域黄鳍金枪鱼的食性及其季节性变化[J]. 水产学报, 2008, 32(5): 725-732.]
- [52] Shi X F, Wang X, Wang Y X, et al. Feeding biology of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in tropical central and western Pacific Ocean[J]. South China Fisheries Science, 2022, 18(1): 43-51. [石肖飞, 王啸, 王佚兮, 等. 热带中西太平洋海域黄鳍金枪鱼的摄食生物学特性[J]. 南方水产科学, 2022, 18(1): 43-51.]
- [53] Su T J, Yu C D, Song W H, et al. Preliminary analysis on biological characteristics of yellowfin tuna longline fishing in the high seas of the East Pacific Ocean[J]. China Water Transport, 2017, 17(5): 149-151. [53] [苏天骄, 虞聪达, 宋伟华, 等. 东太平洋公海延绳钓黄鳍金枪鱼生物学特性的初步分析[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(5): 149-151.]
- [54] Chen F, Guo A, Zhu W B, et al. Preliminary study on fishery biology of yellowfin tuna *Thunnus albacares* in the South Pacific Ocean near Solomon Islands[J]. Progress in Fishery Sciences, 2013, 34(3): 12-20. [陈峰, 郭爱, 朱文斌, 等. 南太平洋所罗门群岛海域黄鳍金枪鱼的渔业生物学特性[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(3): 12-20.]
- [55] Baeza R, Mazzeo I, Vilchez M C, et al. Effect of thermal regime on fatty acid dynamics in male European eels (*Anguilla anguilla*) during hormonally-induced spermatogenesis[J]. Aquaculture, 2014, 430: 86-97.
- [56] Xu Y Q, Han J H, Chen H D, et al. Effect and mechanism of highly unsaturated fatty acids on growth, development and reproduction in aquatic animals: A review[J]. Fisheries Science, 2018, 37(2): 271-277. [许友卿, 韩进华, 陈亨德, 等. 高度不饱和脂肪酸对水生动物生长、发育和繁殖的影响与机理[J]. 水产科学, 2018, 37(2): 271-277.]
- [57] Dai D N. ENSO impact on fishing ground of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the eastern Pacific Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011. [代丹娜. ENSO 现象对东太平洋黄鳍金枪鱼资源及渔场的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.]

Nutritional ecological niche of Pacific yellowfin tuna based on fatty acid analysis

ZHOU Cheng^{1,2,3}, YANG Xu¹, YANG Baoguo¹, WANG Shaoqin^{1,2,3}

1. College of Marine Science, 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 Ocean Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) is an apex predator in marine ecosystems and plays a vital role in energy flow and nutrient cycling. This study aimed to investigate the dietary modifications of Pacific yellowfin tuna throughout ontogeny and variations in nutritional niches among different maritime regions. The fatty acid composition and properties of yellowfin tuna muscle were examined using specimens obtained from tuna fishing vessels operating in the eastern Pacific Ocean in 2019 and the western and central Pacific Ocean in 2021. Thirty-four fatty acids in yellowfin tuna muscle, including 16 saturated fatty acids (SFA), 8 monounsaturated fatty acids (MUFA), and 10 polyunsaturated fatty acids (PUFA), were identified. The SFA content of yellowfin tuna muscle was negatively correlated with the PUFA content, whereas the MUFA content was positively correlated with the PUFA content. Furthermore, a significant negative correlation was observed between SFA content and fork length, whereas both MUFA and PUFA content exhibited a significant positive correlation with fork length. Distinct variations were observed in the muscle fatty acid composition of yellowfin tuna inhabiting the western and central Pacific Oceans compared to those in the eastern Pacific Ocean, with an average compositional dissimilarity of 18.85%. Primary disparities were found in n-3 polyunsaturated fatty acids (n-3 PUFA), SFA, PUFA, C22 : 6n3 (DHA), C16 : 0, C18 : 1n9, MUFA, C22 : 6n3/C20:5n3 (DHA/EPA), C18 : 0, and n-6 series of polyunsaturated fatty acids (n-6 PUFA). Principal component analysis showed that the higher the trophic level of yellowfin tuna, the higher the carnivorous ability of yellowfin tuna and the greater the contribution of organisms that feed on dinoflagellates and diatoms to the energy sources of yellowfin tuna. In contrast, yellowfin tuna at lower trophic levels mainly feed on bacteria, terrestrial plants, and phytophagous copepods. Principal component regression analysis indicated that, as fork length increased, the nutritional level and carnivorous nature of yellowfin tuna also increased. Additionally, their feeding behavior progressively shifts from relying on crustaceans and cephalopods to organisms abundant in characteristic fatty acids, such as shrimp and teleosts. Compared to the yellowfin tuna inhabiting the western and central Pacific Oceans, those in the eastern Pacific Ocean exhibit a higher degree of carnivorous behavior and occupy higher trophic levels, with crustaceans contributing significantly to their energy intake.

Key words: Pacific Ocean; *Thunnus albacares*; trophic niche; fatty acid composition

Corresponding author: WANG Shaoqin. E-mail: sqwang@shou.edu.cn