

DOI: 10.12264/JFSC2021-0307

热带中西太平洋金枪鱼延绳钓渔获物组成及其多样性

王啸^{1,2}, 王佚兮¹, 刘文俊¹, 石建高³, 张健^{1,4,5}

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
2. 上海开创远洋渔业有限公司, 上海 200082;
3. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090;
4. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海海洋大学, 上海 201306;
5. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海海洋大学, 上海 201306

摘要: 利用金枪鱼漂流延绳钓作业方式, 于 2018 年 5 月至 2019 年 3 月期间在热带中西太平洋海域($2^{\circ}03' \sim 11^{\circ}17'S$, $163^{\circ}14' \sim 173^{\circ}35'E$)进行渔获取样, 分析渔获组成及物种多样性, 并使用广义线性混合模型(GLMM)和圆形统计方法分析渔获水深、月相等时空要素对物种多样性、目标种类和兼捕 CPUE 等影响。结果表明: (1) 3673 尾渔获隶属于 9 目 21 科 30 属 35 种, 其中目标种类大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)和黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacores*)为优势种, 蓝枪鱼(*Makaira nigricans*)、长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)、镰状真鲨(*Carcharhinus falciformis*)、帆蜥鱼(*Alepisaurus ferox*)和紫魟(*Pteroplatytrygon violacea*)为重要种; (2) 大眼金枪鱼、黄鳍金枪鱼以及兼捕种类 CPUE 分别为 (1.662 ± 0.89) ind/千钩、 (1.39 ± 1.45) ind/千钩、 (2.52 ± 1.27) ind/千钩。渔获多样性指数 Shannon-Wiener 指数(H')、Margalef 指数(D)、Pielou 指数(J)分别为 (1.78 ± 0.28) 、 (2.53 ± 0.60) 、 (0.79 ± 0.09) ; (3) GLMM 结果显示, 月相(余弦)对大眼金枪鱼的 CPUE 的具有极其显著的影响($P=0.001$, CPUE 在满月较高, 而在新月较低), 而月相(正弦)对黄鳍金枪鱼 CPUE 具有边际显著影响($P=0.067$, CPUE 在上弦月较高, 而在下弦月较低), 月相兼捕 CPUE 则没有显著影响, 水深对 CPUE 具有极显著的影响($P<0.001$); (4) 月相对多样性指数均不存在显著影响, 但水深对渔获 Shannon-Weiner 指数(H')和 Margalef 指数(D)均有显著影响($P<0.001$)。研究结果反映出热带中西太平洋海域物种丰富、群落的复杂程度较高、稳定性较好, 群落对环境变化、渔业活动等具有较好的耐受性。

关键词: 延绳钓; 渔获组成; 多样性; CPUE; 水深; 月相; 热带中西太平洋

中图分类号: S931 **文献标志码:** A

文章编号: 1005-8737-(2022)05-0732-12

大洋生态系统的稳定和功能不仅取决于区域内生物总量、大洋生产者和消费者的生产量, 还取决于区域内群落组成和丰富度^[1]。中上层海洋生物通过自身生物量的发生、对元素循环以及大气成分的影响, 在调节全球生态系统功能方面发挥着重要作用^[2], 特别是生态系统中的高级捕食者^[3]。然而, 海洋渔业中的兼捕以及对目标物种的过度开发造成了全球海洋生物多样性变化和丢失^[4-5], 而生物多样性的下降将导致资源崩溃速

率提高、资源恢复能力、种群结构稳定以及水质下降^[5]。

太平洋作为世界上最大的海洋, 长期以来一直以其生物多样性水平高而闻名, 热带中西太平洋(WCPO)中上层海域具有水温和盐度高、栖息地较单一和温度随深度变化较明显等海洋环境特征, 是生物多样性最高的海洋生态系统^[6]; 此外, 海山林立的热带中西太平洋海底地形复杂, 是海洋生物多样性的热点区域^[7]。中西太平洋海域是世

收稿日期: 2021-07-06; **修订日期:** 2021-08-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31001138); 国家重点研发计划项目(2020YFD0900803); 农业农村部全球重要鱼种资源监测评估专项.

作者简介: 王啸(1995-), 男, 硕士, 从事远洋渔业资源研究. E-mail: 457506879@qq.com

通信作者: 张健, 副教授, 从事生态型渔具渔法研究. E-mail: j-zhang@shou.edu.cn

界金枪鱼渔业的主要作业区域^[8], 其大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)和黄鳍金枪鱼(*T. albacores*)渔获量分别占太平洋海域总产量的 62% 和 75%^[9]。越来越多的科学证据表明, 太平洋金枪鱼延绳钓对海洋生态系统和生物多样性造成了破坏^[10], 其中对顶级捕食者的影响尤为突出^[11]。在过去的数十年中, 中西太平洋渔业管理委员会(WCPFC)等金枪鱼区域性渔业管理组织(tRFMO)通过采纳并实施基于生态系统的渔业管理措施(EBFM)以降低渔业对生态系统和生物多样性的影响^[12-13], 但仍缺乏能将渔业活动与生物多样性联系起来的定量模型^[12], 支撑 EBFM 措施实施的科学信息仍然有限^[2,14]; 要全面实施基于生态系统的管理和预防性措施, 需要逐步推进兼捕死亡率对海洋生物多样性各个方面影响的科学认识^[4]。

金枪鱼漂流延绳钓是WCPO 主要的作业方式之一, 2019 年延绳钓渔船占 WCPFC 区域作业的渔船总数的 82%^[9]。我国在中西太平洋区域的金枪鱼延绳钓渔业起始于 20 世纪 90 年代, 是我国远洋渔业的重要组成部分, 2019 年产量为 4.57 万 t^[9]。了解我国中西太平洋金枪鱼延绳钓渔获物组成和多样性及其时空分布不仅可为渔业管理组织制定合理的管理措施、保障渔业可持续发展提供科学依据、维护我国负责任渔业行为大国形象, 也可为我国远洋渔业企业作业策略调整等提供参考。有鉴于此, 本研究通过对上海蒂尔远洋渔业有限公司“沪渔 927”金枪鱼延绳钓渔船 2018 年 5 月至 2019 年 3 月在热带中西太平洋作业期间所有渔获个体进行观察, 分析渔获物组成、物种多样性、目标种类和兼捕 CPUE 及其与时空因子的关系。

1 材料与方法

1.1 调查渔船及渔具

调查船为上海蒂尔远洋渔业有限公司的“沪渔 927”超低温金枪鱼延绳钓渔船, 该船全长 49.90 m, 总吨位 560 t。

对大眼金枪鱼(*T. obesus*)、黄鳍金枪鱼(*T. albacores*)的采样均符合 WCPFC 等组织对渔具和渔法的管理要求。漂流延绳浮标绳长度 35.0 m, 两个浮标间的干线长度 1200 m, 干线间隔 40 m

钩挂支线(两浮标间共 29 条支线), 支线长 25.0 m。主要使用鲭鱼(*Pneumatophorus japonicus*)和沙丁鱼(*Sardina pilchardus*)作为诱饵。调查船投钩时船速保持 7.5 kn 左右, 干线投绳速度 6 m/s。

1.2 调查时间和海域

从 2018 年 6 月至 2019 年 3 月, 对热带中西太平洋公海海域(2°03'~11°17'S, 163°14'~173°35'E, 图 1)开展了为期 267 d(有效采样天数 244 d)的连续采样, 每日投钩数量为(2684±290)钩, 投钩时间为每日 4 时至 11 时, 起钩时间为 12 时至翌日 3 时。

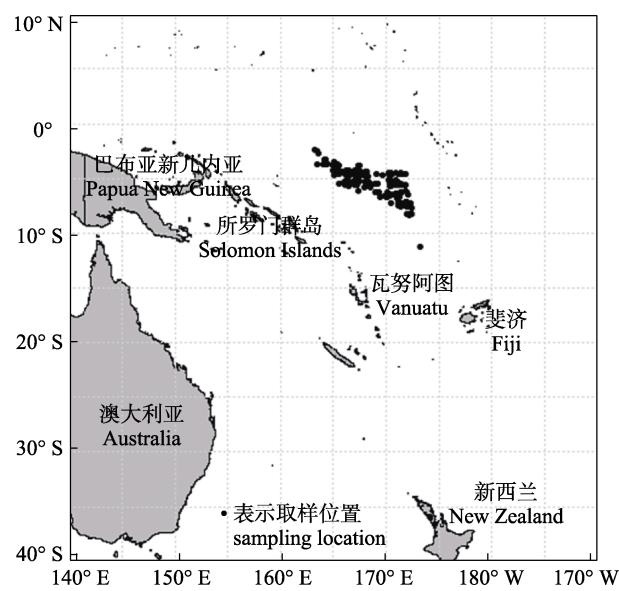


图 1 数据采集作业海域

Fig. 1 The locations of sampling sites

1.3 数据采样方法

海上调查期间, 对调查船所捕获的所有生物全部取样, 并逐尾进行观察, 记录生物种类、捕获时间、浮标号以及钩位、渔获上甲板时的活跃状态等信息, 并对主要渔获种类进行了体长、体重等基础生物学测量。

调查船每天作业过程中, 在某一干线(共 29 条支线)的第 1(最浅)、第 5、第 11 和第 15(最深)支线的钩钩位置钩挂温深仪(型号: DST centi-TD), 对钩钩作业深度和水温进行实测; 基于悬链线理论、结合 4 个钩钩的实测水深估算其他各支线钩钩的作业深度。由于钩钩深度随浸泡时间发生变化, 本研究中采用钩钩平均水深作为渔获水深。

1.4 数据处理

1.4.1 渔获优势种 采用 Pinkas 相对重要性指数 IRI (Index of Relative Importance) 来作为判定渔获优势种的指标^[15]:

$$\text{IRI} = (N_p + W) \times F \times 10^4 \quad (1)$$

式中, N_p 为某个种类的尾数占总渔获尾数百分数; W 为某个种类的质量占总渔获质量百分数; F 为某种类出现的频率。各渔获种类的 IRI 处于 $[0, 1)$ 、 $[1, 10)$ 、 $[10, 100)$ 、 $[100, 1000)$ 和 $[1000, +\infty)$ 区间, 分别对应少见种、一般种、常见种、重要种和优势种^[16]。

1.4.2 渔获 CPUE 使用每千钩的渔获尾数作为 CPUE 指标:

$$\text{CUPE} = \frac{C}{H} \times 1000 \quad (2)$$

式中, C 表示一定作业时间和范围内渔获尾数, H 为对应作业时间和范围内的实际投放钩数。

1.4.3 物种多样性指数 采用 Shannon-Weiner 指数(H' , 综合了群落中物种丰富性和均匀性两方面的影响, 反映群落结构的复杂程度)、Margalef 指数(D , 反映群落中物种的丰富程度)和 Pielou 指数(J , 反映群落中物种间个体分布的均匀程度)作为渔获多样性指标^[17-19]:

$$H' = -\sum [(n_i/N_a) \cdot \ln(n_i/N_a)] \quad (3)$$

$$D = (S-1)/\ln N_a \quad (4)$$

$$J = H'/\ln S \quad (5)$$

式中, n_i 为第 i 个种类的渔获尾数; N_a 为渔获中所有渔获总尾数; S 为渔获种类数量。

1.4.4 CPUE、渔获多样性与时空因素的关系 按 50 m 水深间距对渔获水层进行分组、农历日期 3 天间隔将月划分为 10 个月相组, 并使用广义线性混合模型(GLMM)^[20]分析不同渔获种类 CPUE、渔获多样性指数等与时空因子的关系; 由于月相具有周期性循环变化特性, 采用圆形统计的方法对其进行量化^[21], 建立 CPUE 与时空因子关系:

$$\log(\text{CUPE}+1) \sim \gamma_0 + \gamma_1 \cdot D_j + \gamma_2 \cdot \cos(\omega t) + \gamma_3 \cdot \sin(\omega t) + \varepsilon \quad (6)$$

式中, γ_0 为截距, D_j 为渔获水深(m), γ_1 为水深的回归系数; ε 为误差项, 月份作为随机因素;

$\gamma_2 \cdot \cos(\omega t) + \gamma_3 \cdot \sin(\omega t)$ 为月相对 CPUE 的影响, 其中 t 为月相, ω 为角频率, 且

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (7)$$

式中, T 为月相的周期。

多样性指数(H' 为例)与时空因子关系:

$$H' \sim \gamma_4 + \gamma_5 \cdot D_j + \gamma_6 \cdot \cos(\omega t) + \gamma_7 \cdot \sin(\omega t) + \gamma_8 \cdot \text{CUPE} + \varepsilon \quad (8)$$

式中, γ_4 为截距, γ_5 和 γ_8 分别为水深 D_j 和目标种类 CPUE 对多样性指数的回归系数; $\gamma_6 \cdot \cos(\omega t) + \gamma_7 \cdot \sin(\omega t)$ 表示月相对多样性指数的影响, 月份作为随机因素。由于多样性指数需要一定的样本数量, 因此在模型应用中, 仅同时对一个时空要素进行分析。

使用 R 语言中“lme4”包的 glmer 函数实现 GLMM 模型的拟合, 使用“MASS”包中的 coef 函数获得回归系数。

2 结果与分析

2.1 渔获物组成

本次调查期间共观察到渔获种类 9 目 21 科 30 属 35 种(表 1), 共计 3673 尾。其中, 鲽科(Scombridae)类渔获尾数占总渔获 64.08%、魟科(Dasyatidae)占 8.39%, 鲨鱼类如长尾鲨科(Alopiidae)、糙齿鲨科(Pseudocarchariidae)、鼠鲨科(Lamnidae)、真鲨科(Carcarhinidae)占 7.81%; 蛇鲭科(Gempylidae)占 3.68%, 旗鱼科(Istiophoridae)占 2.64%, 其他种类占 13.40%。

2.1.1 渔获优势种 对比不同渔获种类出现的频次和 IRI (表 1)发现, 目标种类大眼金枪鱼和黄鳍金枪鱼是渔获组成中的绝对优势种(IRI>>1000), 渔获尾数占比 55.62%; 重要种有蓝枪鱼(*Makaira nigricans*)、长鳍金枪鱼(*T. alalunga*)、镰状真鲨(*Carcharhinus falciformis*)、帆蜥鱼(*Alepisaurus ferox*)和紫魟(*Pteroplatytrygon violacea*) 5 种, 渔获尾数占 26.16%; 常见种有斑点月鱼(*Lampris guttatus*)、凹尾长鳍乌鲂(*Taractichthys steindachneri*)、异鳞蛇鲭(*Lepidocybium flavobrunneum*)等 9 种, 渔获尾数占 14.15%; 一般种有大眼长尾

表 1 热带中西太平洋金枪鱼延绳钓渔获种类组成
Tab. 1 Composition of species caught by pelagic longline in tropical WCPO

目 order	科 family	属 genus	种 species	缩写 code	频数 F	重要性指数 IRI
月鱼目 Lampriformes	冠带鱼科 Lophotidae 月鱼科 Lampridae 粗鳍鱼科 Trachipteridae	冠带鱼属 <i>Lophotus</i> 月鱼属 <i>Lampris</i> 粗鳍鱼属 <i>Trachipterus</i>	凹鳍冠带鱼 <i>L. capellei</i> 斑点月鱼 <i>L. guttatus</i> 福氏粗鳍鱼 <i>T. fukuzakii</i>	LOP LAG TRP	1 21 3	0.01 14.07 0.1
鲈形目 Perciformes	乌鲂科 Bramidae 鲯鳅科 Coryphaenidae 蛇鲭科 Gempylidae 鲹科 Carangidae 乌鲂科 Bramidae 旗鱼科 Istiophoridae	长鳍乌鲂属 <i>Taractichthys</i> 鲯鳅属 <i>Coryphaena</i> 纺锤蛇鲭属 <i>Promethichthys</i> 棘鳞蛇鲭属 <i>Ruvettus</i> 直线蛇鲭属 <i>Nesiarchus</i> 异鳞蛇鲭属 <i>Lepidocybium</i> 蛇鲭属 <i>Gempylus</i>	凹尾长鳍乌鲂 <i>T. steindachneri</i> 鲯鳅 <i>C. hippurus</i> 纺锤蛇鲭 <i>P. prometheus</i> 棘鳞蛇鲭 <i>R. pretiosus</i> 无耙蛇鲭 <i>N. nasutus</i> 异鳞蛇鲭 <i>L. flavobrunneum</i> 黑刃蛇鲭 <i>G. serpens</i>	TST DOL PRP OIL NEN LEC GES	91 21 2 4 1 67 61	73.15 4.2 0.05 0.18 0.01 48.81 33.36
枪鱼目 Xiphiidae		纺锤鲷属 <i>Elagatis</i>	纺锤鲷 <i>E. bipinnulata</i>	RRU	1	0.01
剑鱼科 Xiphidae		棱鲂属 <i>Taractes</i>	红棱鲂 <i>T. rubescens</i>	TCR	56	43.39
金枪鱼科 Scombridae		四鳍旗鱼属 <i>Tetrapturus</i>	小吻四鳍旗鱼 <i>T. angustirostris</i> 条纹四鳍旗鱼 <i>T. audax</i>	SSP MLS	8 1	1.07 0.04
		枪鱼属 <i>Makaira</i>	蓝枪鱼 <i>M. nigricans</i>	BUM	73	160.9
		旗鱼属 <i>Istiophorus</i>	平鳍旗鱼 <i>I. platypterus</i>	SFA	14	4.28
		印度枪鱼属 <i>Istiomrax</i>	印度枪鱼 <i>I. indica</i>	BLM	1	0.18
		剑鱼属 <i>Xiphias</i>	剑鱼 <i>X. gladius</i>	SWO	64	62.54
鼠鲨目 Lamniformes	金枪鱼属 <i>Thunnus</i>		大眼金枪鱼 <i>T. obesus</i> 黄鳍金枪鱼 <i>T. albacores</i> 长鳍金枪鱼 <i>T. alalunga</i>	BET	1123	7778.21
		刺鲅属 <i>Acanthocybium</i>	沙氏刺鲅 <i>A. solandri</i>	WAH	61	51.43
		鰤属 <i>Katsuwonus</i>	鰤鱼 <i>K. pelamis</i>	SKJ	67	92.1
	鮣科 Sphyraenidae	鮣属 <i>Sphyraena</i>	大鮣 <i>S. barracuda</i>	GBA	14	2.47
真鲨目 Carcharhiniformes	长尾鲨科 Alopiidae	长尾鲨属 <i>Alopias</i>	大眼长尾鲨 <i>A. superciliosus</i>	BTH	12	1.21
	糙齿鲨科 Pseudocarchariidae	拟锥齿鲨属 <i>Pseudocarcharias</i>	拟锥齿鲨 <i>P. kamoharai</i>	PSK	1	0.01
	鼠鲨科 Lamnidae	鲭鲨属 <i>Isurus</i>	尖吻鲭鲨 <i>I. oxyrinchus</i> 长鳍鲭鲨 <i>I. paucus</i>	SMA LMA	2 32	0.05 10.35
			镰状真鲨 <i>C. falciformis</i>	FAL	190	239.63
			长鳍真鲨 <i>C. longimanus</i>	OCS	13	2.95
		鲨鱼类(未鉴别) sharks (unidentified)			37	
仙女鱼目 Aulopiformes	帆蜥鱼科 Alepisauridae	帆蜥鱼属 <i>Alepisaurus</i>	帆蜥鱼 <i>A. ferox</i>	ALX	207	475.8
鲀形目 Tetraodontiformes	翻车鲀科 Molidae	翻车鲀属 <i>Mola</i>	翻车鲀 <i>M. mola</i>	MOX	1	0.01
龟鳖目 Testudines	海龟科 Cheloniidae	丽龟属 <i>Lepidochelys</i>	丽龟 <i>L. olivacea</i>	LKV	5	0.28
鳐形目 Rajiformes	蝠鲼科 Myliobatidae	前口蝠鲼属 <i>Manta</i>	双吻前口蝠鲼 <i>M. birostris</i>	RMB	1	0.01
鲼形目 Myliobatiformes	魟科 Dasyatidae	翼魟属 <i>Pteroplatytrygon</i>	紫魟 <i>P. violacea</i>	PLS	308	605.02

鲨(*Alopias superciliosus*)、小吻四鳍旗鱼(*Tetrapurus angustirostris*)、大鮣(*Sphyraena barracuda*)等6种, 渔获尾数占2.23%。

2.1.2 渔获水深分布 渔获组成中优势种、重要种和常见种(16种)的渔获水深范围差异较大(图2), 其中沙氏刺鲅(*Acanthocybium solandri*)平均钓获

深度最小($99.35 \text{ m} \pm 63.19 \text{ m}$), 而凹尾长鳍乌鲂平均钓获深度最大($306.88 \text{ m} \pm 66.69 \text{ m}$); 大眼金枪鱼($232.88 \text{ m} \pm 83.53 \text{ m}$)、黄鳍金枪鱼($149.92 \text{ m} \pm 75.36 \text{ m}$)、

帆蜥鱼(体长: $238.10 \text{ m} \pm 75.25 \text{ m}$)渔获水深范围较广, 而鲣鱼(*Katsuwonus pelamis*)渔获水深范围($116.58 \text{ m} \pm 59.77 \text{ m}$)相对较窄。

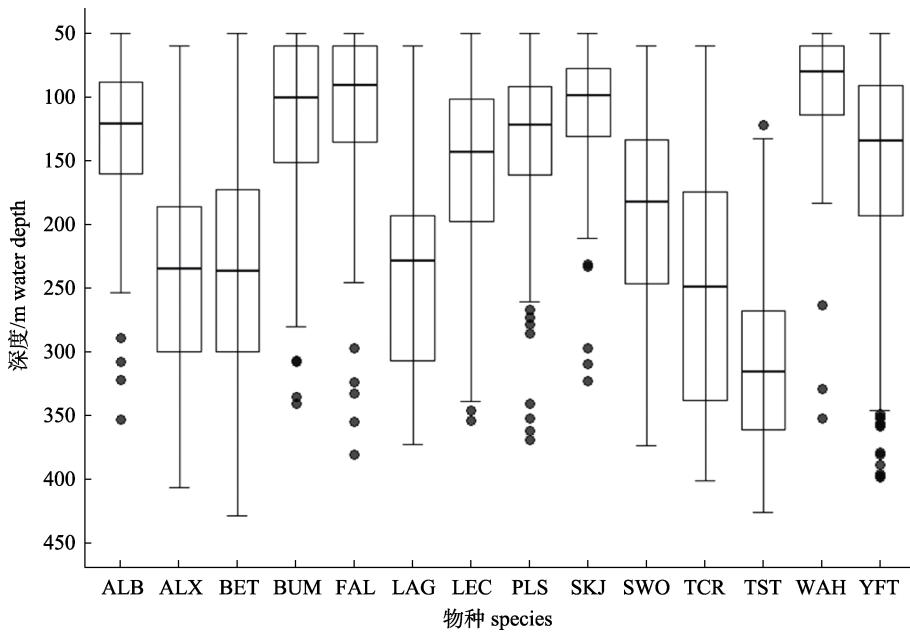


图 2 16 种主要渔获种类水深分布范围

物种名见表 1.

Fig. 2 The depth ranges for 16 main species caught by pelagic longline in tropical WCPO Species's names are shown in table 1.

2.2 CPUE 分布

此次调查中目标种类平均 CPUE 为 (3.05 ± 1.74) ind/千钩, 其中大眼金枪鱼和黄鳍金枪鱼 CPUE 分别为 (1.66 ± 0.89) ind/千钩和 (1.39 ± 1.45) ind/千钩; 兼捕种类平均 CPUE 为 (2.52 ± 1.27) ind/千钩。

皮尔逊相关性分析显示, 大眼金枪鱼与黄鳍金枪鱼及兼捕种类的 CPUE 之间不存在显著的相关关系, 但黄鳍金枪鱼与兼捕种类 CPUE 存在极显著正相关关系($r=0.339, P<0.001$)。

2.2.1 时间分布 图 3a 显示了不同月度的目标种类和兼捕种类的 CPUE, 不难看出大眼金枪鱼的 CPUE 从 9 月开始至翌年 2 月呈逐渐降低的趋势, 而黄鳍金枪鱼的 CPUE 从 5~10 月呈现降低趋势, 而后又开始增长; 兼捕种类 CPUE 在 10~12 月最低, 其余月份相对较高。

GLMM 拟合结果(表 2)显示, 月相(余弦)对大眼金枪鱼 CPUE 具有极其显著影响($P=0.001$), 月相(正弦)对黄鳍金枪鱼 CPUE 具有边际显著影响

($P=0.067$); 而月相对兼捕种类 CPUE 则没有显著影响。不同种类 CPUE 随月相的分布分别如图 3b、图 3c 和图 3d 所示(图中实线表示 CPUE 的拟合值, 虚线表示 95% 置信区间), 表明大眼金枪鱼 CPUE 在满月阶段较高, 而在新月阶段较低, 黄鳍金枪鱼 CPUE 在上弦月阶段较高, 而在下弦月阶段较低。

2.2.2 空间分布 水深对不同种类 CPUE 都具有极显著的影响(表 2, $P<0.001$), 随着水深的增加大眼金枪鱼 CPUE 逐渐增加至 250~300 m 水层, 随后逐渐下降; 黄鳍金枪鱼 CPUE 主要分布在水深 50~150 m 水层, 而后随水深增加而逐渐下降; 兼捕种类高 CPUE 出现在较浅水层(50~200 m), 随后逐渐降低, 但在 350~400 m 水层又有所提高(图 4)。

2.3 渔获种类多样性

渔获种类多样性指数 H' 、 D 和 J 分别为 (1.78 ± 0.28) 、 (2.53 ± 0.60) 和 (0.79 ± 0.09) 。

2.3.1 时间分布 各多样性指数随月度变化(图 5a)较小, 其中 H' 和 J 在 1 月后呈一定程度的上升,

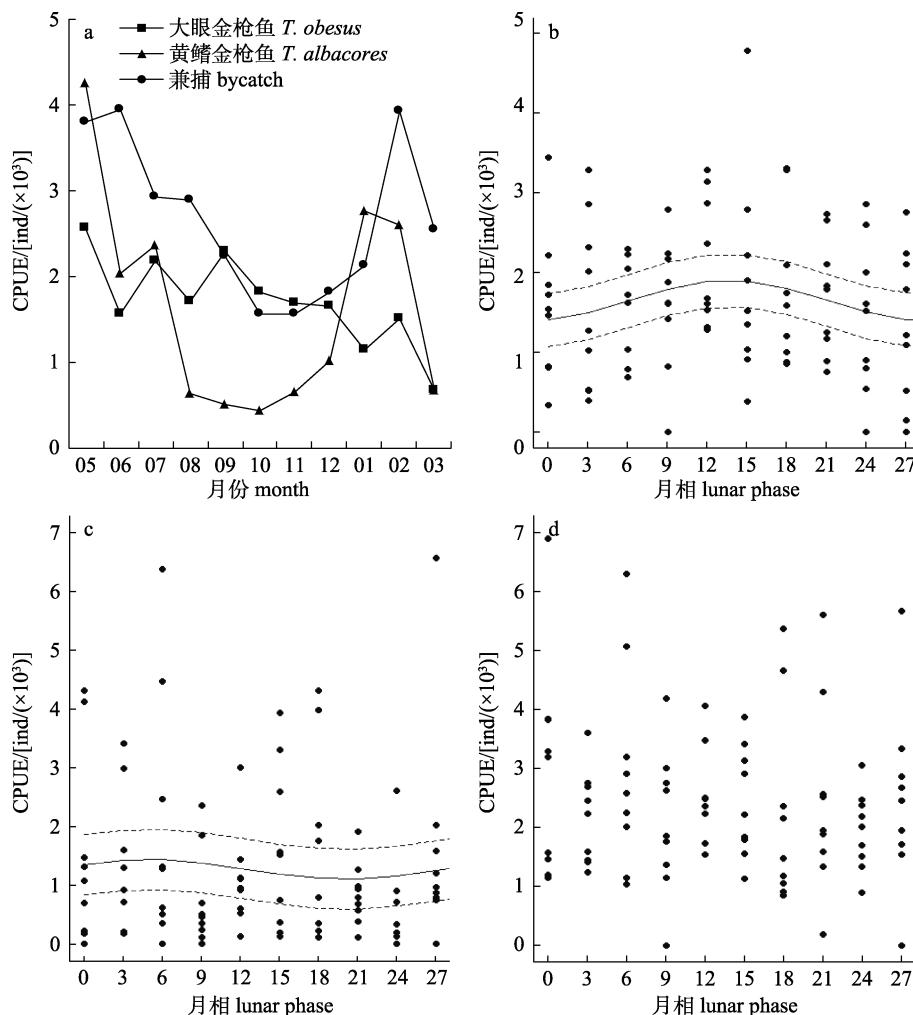


图3 CPUE 随时间的分布

a: 随月份的分布; b、c 和 d: 分别表示大眼、黄鳍金枪鱼和兼捕的 CPUE 随月相分布.

Fig. 3 Temporal distribution of CPUEs of different species

a: based on month; b, c and d: based on lunar phases for *Thunnus obesus*, *Thunnus albacores* and bycatches, respectively.

表2 渔获种类 CPUE 与时空因素的 GLMM 拟合结果

Tab. 2 Output of GLMM fit for relationship between CPUEs and temporal and spatial factors

鱼种 species	回归系数 coefficients	期望值 estimated	标准误 standard error	P
大眼金枪鱼 <i>T. obesus</i>	截距 intercept γ_0	9.14×10^{-1}	6.76×10^{-2}	<0.001
	水深 depth γ_1	-8.24×10^{-4}	2.22×10^{-4}	<0.001
	月相 lunar phase	$\cos(\omega t) \gamma_2$	-1.17×10^{-1}	3.61×10^{-2}
		$\sin(\omega t) \gamma_3$	5.25×10^{-2}	3.59×10^{-2}
黄鳍金枪鱼 <i>T. albacores</i>	截距 intercept γ_0	1.32	1.01×10^{-1}	<0.001
	水深 depth γ_1	-3.20×10^{-3}	2.59×10^{-4}	<0.001
	月相 lunar phase	$\cos(\omega t) \gamma_2$	-5.88×10^{-2}	4.04×10^{-2}
		$\sin(\omega t) \gamma_3$	7.43×10^{-2}	4.09×10^{-2}
兼捕鱼种 by catch	截距 intercept γ_0	1.93	7.29×10^{-2}	<0.001
	水深 depth γ_1	-4.03×10^{-3}	2.16×10^{-4}	<0.001
	月相 lunar phase	$\cos(\omega t) \gamma_2$	1.14×10^{-3}	3.34×10^{-2}
		$\sin(\omega t) \gamma_3$	5.20×10^{-2}	3.33×10^{-2}

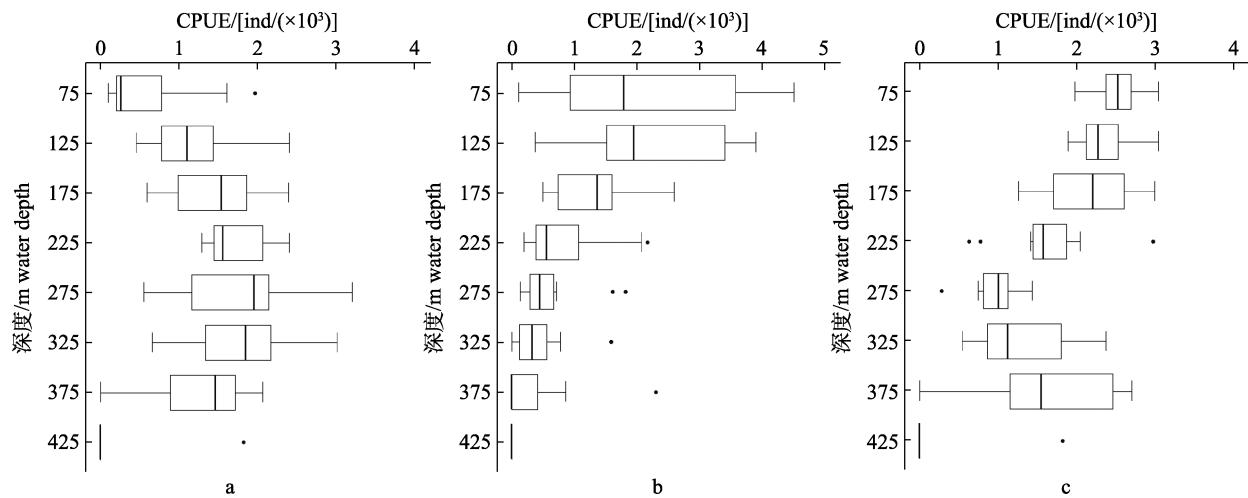


图4 CPUE 随水深的分布

a: 大眼金枪鱼; b: 黄鳍金枪鱼; c: 兼捕鱼种.

Fig. 4 Distribution of CPUEs of different species according to depth

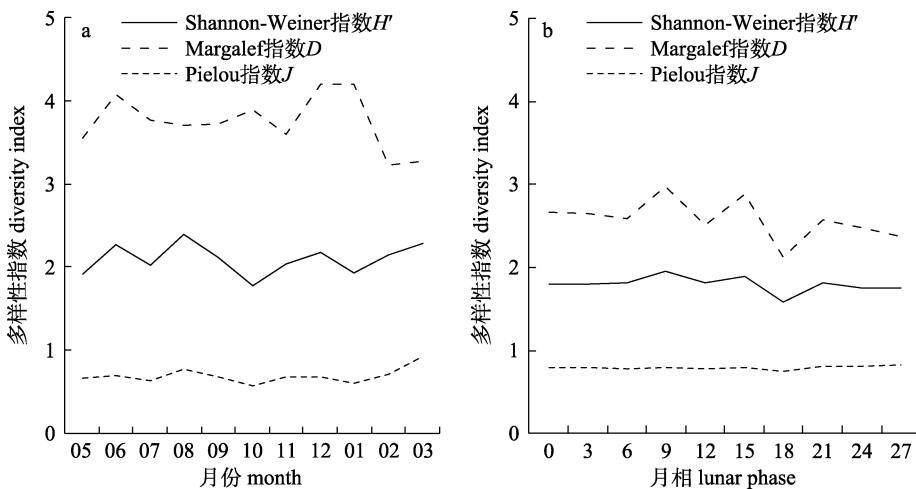
a: *Thunnus obesus*; b: *Thunnus. albacores*; c: by catches.

图5 渔获种类多样性指数随时间的分布

a: 月份; b: 月相.

Fig. 5 Temporal distribution of diversity indices

a: according to months; b: according to lunar phases.

而 D 在 1 月相对较低。GLMM 拟合结果(表 3)表明, 月相对多样性指数均不存在显著影响; 不同月相下的多样性指数分布如图 5b 所示。

2.3.2 空间分布 水深对 H' 和 D 均有显著性影响(表 4, $P<0.001$), 表明水深影响着群落结构的复杂程度和群落中物种的丰富程度, 从多样性指数分布与水深的关系(图 6a 和图 6b)不难看出, 总体上 H' 和 D 随着水深增加而逐渐减小, 即复杂和丰富程度越低; 水深对 J 无显著影响, 表明水深对渔获间个体分布的均匀程度的影响不大(图 6c); 但渔

获总体 CPUE 对 J 具有极为显著的影响($P<0.001$)。

3 讨论

热带海洋环境可以分为两个不同生物地理区域, 即广阔的印度太平洋(印太)海域和较小的新世界热带地区(加勒比海海域), 其中印太群岛海域是世界海洋和陆地生物多样性的中心^[22-23]。此次调查区域正处于这一区域, 延绳钓渔获种类共 9 目 21 科 30 属 35 种, 物种丰富度较北太平洋^[14]、西印度洋^[24]和东太平洋^[25]等海区延绳钓更高, 虽

表3 渔获种类多样性指数与时空因素的GLMM拟合结果

Tab. 3 Output of GLMM fit for relationship between biodiversity indexes and temporal and spatial factors

多样性指数 diversity indices	回归系数 coefficients	与水深的关系 water depth			与月相的关系 lunar phase		
		期望值 estimated	标准误 standard error	P	期望值 estimated	标准误 standard error	P
H'	截距 intercept γ_4	2.45	1.73×10^{-1}	<0.001	1.80	8.60×10^{-2}	<0.001
	水深 depth γ_5	-3.61×10^{-3}	7.90×10^{-4}	<0.001	—	—	—
	月相 lunar phase	$\cos(\omega t) \gamma_6$	—	—	4.16×10^{-2}	1.01×10^{-1}	0.68
		$\sin(\omega t) \gamma_7$	—	—	2.33×10^{-2}	9.93×10^{-2}	0.815
D	CPUE γ_8	-2.67×10^{-2}	2.68×10^{-2}	0.324	-3.55×10^{-3}	1.30×10^{-2}	0.787
	截距 intercept γ_4	3.68	3.35×10^{-1}	<0.001	2.35	1.79×10^{-1}	<0.001
	水深 depth γ_5	-6.32×10^{-3}	1.53×10^{-4}	<0.001	—	—	—
	月相 lunar phase	$\cos(\omega t) \gamma_6$	—	—	1.41×10^{-2}	2.16×10^{-1}	0.948
J		$\sin(\omega t) \gamma_7$	—	—	4.24×10^{-2}	2.13×10^{-1}	0.843
	CPUE γ_8	-2.94×10^{-2}	5.20×10^{-2}	0.574	3.19×10^{-2}	2.78×10^{-2}	0.254
	截距 intercept γ_4	7.86×10^{-1}	6.91×10^{-2}	<0.001	9.52×10^{-1}	2.71×10^{-2}	<0.001
	水深 depth γ_5	3.22×10^{-5}	3.22×10^{-4}	0.921	—	—	—
	月相 lunar phase	$\cos(\omega t) \gamma_6$	—	—	8.31×10^{-3}	2.64×10^{-2}	0.754
		$\sin(\omega t) \gamma_7$	—	—	-9.41×10^{-3}	2.61×10^{-2}	0.72
	CPUE γ_8	-5.01×10^{-3}	1.10×10^{-2}	0.651	-2.90×10^{-2}	3.65×10^{-3}	<0.001

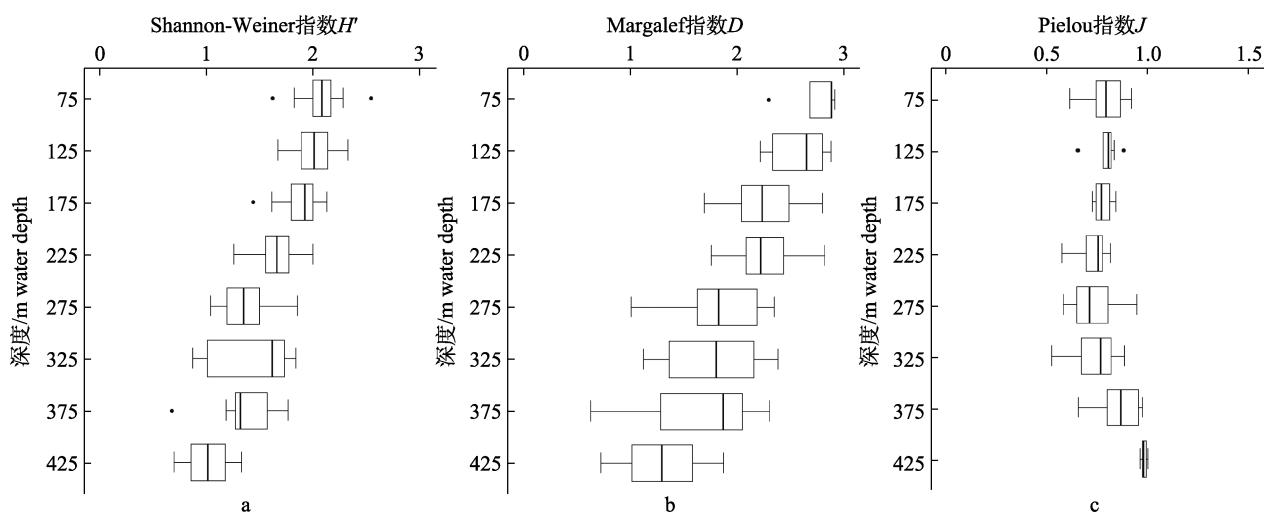


图6 物种多样性指数随水深的分布

a: Shannon-Wiener 指数 H' ; b: Margalef 指数 D ; c: Pielou 指数 J .

Fig. 6 Distribution of diversity index according to depth

a: Shannon-Wiener H' ; b, Margalef D ; c, Pielou J .

然与印度洋整体的渔获种类丰富度接近^[26], 但此次调查时间和区域更为集中, 结合较早的调查结果^[8], 体现出热带中西太平洋海区高级捕食者种类较为丰富的特点。

虽然此物种丰富度较高, 但对比渔获数量组成发现, 此次调查中目标种类(大眼金枪鱼、黄鳍

金枪鱼)渔获数量占总渔获的比例(64.1%)与中太平洋公海热带区^[25]相近, 高于印度洋^[26]、太平洋^[27]海区; 此外, 鲨和紫鯧渔获占比较印度洋^[26]、热带中太平洋^[25]海区相对更高。多样性指数分析结果显示渔获种类 Shannon-wiener 指数(H')为 1.78 (± 0.28), 高于北太平洋、东太平洋、南太平洋^[2,25]、

北大西洋^[28], Margalef 指数(D)为 2.53(± 0.60), 高于北太平洋、南太平洋^[14]、中东太平洋^[25], 表明热带中西太平洋群落中物种丰富、群落的复杂程度较高、稳定性较好, 群落对环境变化、渔业活动等具有较好的耐受性, 这与全球生物多样性分布的一般规律相一致, 即高纬和低纬海区之间在纬度上存在物种多样性梯度, 热带地区生物多样性通常较高^[29], 沿海物种在西太平洋多样性最高, 大洋群落多样性在海洋中低纬度带达到峰值^[6], 也在一定程度上反映出海山密布的热带中西太平洋区域可能是生物多样性的热点海区^[7]。但是, Pielou 指数(J)为 0.79(± 0.09), 低于中东太平洋^[25]、南太平洋^[2]海域, 高于西印度洋^[30]海域。此次调查渔获无论是渔获种类、数量组成、CPUE 还是多样性指数, 与近十年来相近海区调查结果^[8,31]基本一致, 表明在 WCPFC 等渔业管理组织愈发严格管理下, 当前热带中西太平洋海区中上层水域高级捕食者的种群结构比较稳定。

CPUE 的月度分布显示, 从 2018 年 5 月至翌年 2 月大眼金枪鱼 CPUE 总体呈现出下降趋势, 而黄鳍金枪鱼 CPUE 从 12 月至 2 月有所增加, 且波动更大, 这与 Xu 等^[32]的观察结果相类似; 值得注意的是, 此次调查发现兼捕种类 CPUE 月度变化规律与黄鳍金枪鱼比较接近(黄鳍金枪鱼 CPUE 与兼捕种类 CPUE 存在极显著正相关关系), 表明黄鳍金枪鱼与其他种类群体之间联系可能更加紧密。分析结果显示, 水深对目标种类 CPUE 分布具有显著影响, 即大眼和黄鳍金枪鱼分别偏好栖息于 170~300 m 和 90~190 m 水深, 符合大眼金枪鱼和黄鳍金枪鱼对栖息水深偏好的已有认知^[31,33-36]。水深对兼捕 CPUE 的影响同样极为显著(图 4c), 即兼捕 CPUE 整体上呈现出随水深下降的趋势, 然而 350~400 m 水层表现出较高的 CPUE, 这与多样性 H' 和 D 随着水深的变化规律存在明显差异, 值得今后关注。

由于此次调查持续时间仅 10 个月, 难以通过定量统计方法评价月度对渔获 CPUE、多样性指数等影响, 但笔者采用了圆形统计方法分析月相对相关指标的影响。月相周期影响着动植物生理和行为的内在节律^[37], 改变鱼类的迁徙、摄食和

繁殖行为^[38-39]。在金枪鱼延绳钓渔业中, 月相变化会直接影响目标种类的 CPUE^[40-41]。研究结果显示, 大眼金枪鱼 CPUE 在满月时最高, 而在新月较低, 且月相对 CPUE 的影响显著, 这与大西洋漂流延绳钓渔业中剑鱼^[42-43]、西印度洋延绳钓渔业中长鳍金枪鱼^[40]研究结果相类似; 对于黄鳍金枪鱼, 月相对其 CPUE 具有边际显著影响, 在上弦月时较高, 新月和满月时次之, 下弦月时较低, 与印度洋黄鳍金枪鱼 CPUE 随月相的变化相类似^[41], 但与西太平洋游钓渔业的情况^[21](CPUE 下弦月最高, 上弦月最低)有明显的区别。作为大洋性高度洄游种类, 金枪鱼个体及群体行为的影响因素众多, 仅通过渔获试验难以解答月相对行为及分布的影响机制。通常认为, 月相影响了饵料生物垂直迁移规律的变化, 即新月期间表层天然饵料生物更加丰富, 同时海洋温跃层是影响浮游动植物垂直分布的关键因素, 黄鳍金枪鱼栖息水层较浅, 通常在温跃层内部靠近下界区域觅食^[44], 新月期间较为充分的饵料生物减弱了钓饵对其吸引力^[45], 造成 CPUE 较低。对于栖息水层较深的大眼金枪鱼, 个体在满月前后会表现出频繁进入较深水域, 这一行为在新月前后相对较弱^[46], 深度水域饵料生物较少, 且满月期间较高的光照水平会增加捕食者对钓饵的可见性^[47], 可能导致满月时 CPUE 较高。

致谢: 此次海上调查得到了上海蒂尔远洋渔业有限公司董事长杨慧敏和“沪渔 927”船长及全体船员的大力支持和帮助, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Duffy J E, Stachowicz J J. Why biodiversity is important to oceanography: Potential roles of genetic, species, and trophic diversity in pelagic ecosystem processes[J]. Marine Ecology Progress Series, 2006, 311: 179-189.
- [2] Wang J Q, Gao X D, Xu L L, et al. Biodiversity in the bycatch community of Chinese tuna longline fisheries in the Pacific Ocean[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 24: e01276.
- [3] Worm B, Lotze H K, Myers R A. Predator diversity hotspots in the blue ocean[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(17):

- 9884-9888.
- [4] Gilman E L. Bycatch governance and best practice mitigation technology in global tuna fisheries[J]. *Marine Policy*, 2011, 35(5): 590-609.
- [5] Worm B, Barbier E B, Beaumont N, et al. Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services[J]. *Science*, 2006, 314(5800): 787-790.
- [6] Tittensor D P, Mora C, Jetz W, et al. Global patterns and predictors of marine biodiversity across taxa[J]. *Nature*, 2010, 466(7310): 1098-1101.
- [7] Morato T, Hoyle S D, Allain V, et al. Seamounts are hotspots of pelagic biodiversity in the open ocean[J]. *PNAS*, 2010, 107(21): 9707-9711.
- [8] Li Y, Dai X J, Zhu J F, et al. Species composition and diversity of catches by tuna longline gear from the western and central Pacific Ocean[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2011(2): 52-58. [李勇, 戴小杰, 朱江峰, 等. 中西太平洋金枪鱼延绳钓渔获组成及其多样性分析[J]. 海洋湖沼通报, 2011(2): 52-58.]
- [9] Western and Central Pacific Fisheries Commission. Tuna fishery yearbook 2019[R]. Pohnpei, WCPFC, 2020.
- [10] Ovetz R. The bottom line: An investigation of the economic, cultural and social costs of high seas industrial longline fishing in the Pacific and the benefits of conservation[J]. *Marine Policy*, 2007, 31(2): 217-228.
- [11] Ward P, Myers R A. Shifts in open-ocean fish communities coinciding with the commencement of commercial fishing[J]. *Ecology*, 2005, 86(4): 835-847.
- [12] MRAG Americas Inc. Review of ecosystem bycatch issues for the western and central Pacific region[R]. Tampa, Florida, WCPFC, 2002.
- [13] Morato T, Hoyle S D, Allain V, et al. Tuna longline fishing around west and central Pacific seamounts[J]. *PLoS ONE*, 2010, 5(12): e14453.
- [14] Zhu J F, Dai X J, Chen Y. Species composition and diversity of pelagic fishes based on a longline fishery catch in the North Pacific Ocean[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2011, 29(2): 261-269.
- [15] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in Californian waters[J]. *Fish Bulletin of California Department of Fish and Game*, 1971, 152: 1-105.
- [16] Liu M D, Li P F, Huang C, et al. Spring community structure and species diversity of fish in the Anqing section of Yangtze River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2017, 38(6): 64-71. [刘明典, 李鹏飞, 黄翠, 等. 长江安庆段春季鱼类群落结构特征及多样性研究[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(6): 64-71.]
- [17] Burks A W, Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication[J]. *The Philosophical Review*, 1951, 60(3): 398.
- [18] Ulanowicz R E. Information theory in ecology[J]. *Computers & Chemistry*, 2001, 25(4): 393-9.
- [19] Pielou E C. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 10(2): 370-383.
- [20] Zuur A F, Ieno E N. A protocol for conducting and presenting results of regression-type analyses[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2016, 7(6): 636-645.
- [21] Lowry M, Williams D, Metti Y. Lunar landings—Relationship between lunar phase and catch rates for an Australian gamefish-tournament fishery[J]. *Fisheries Research*, 2007, 88(1-3): 15-23.
- [22] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities[J]. *Nature*, 2000, 403(6772): 853-858.
- [23] Bowen B W, Rocha L A, Toonen R J, et al. The origins of tropical marine biodiversity[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(6): 359-366.
- [24] Lucena-Frédu F, Kell L, Frédu T, et al. Vulnerability of teleosts caught by the pelagic tuna longline fleets in South Atlantic and Western Indian Oceans[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2017, 140: 230-241.
- [25] Li Y. Species composition and diversity of catches by tuna longline gear from the eastern and central Pacific Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011. [李勇. 中东太平洋金枪鱼延绳钓渔获组成及其多样性分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.]
- [26] Huang H W, Liu K M. Bycatch and discards by Taiwanese large-scale tuna longline fleets in the Indian Ocean[J]. *Fisheries Research*, 2010, 106(3): 261-270.
- [27] Xiao Y Y, Zhu J F, Dai X J. A study on the community structure of pelagic fish in tropical Pacific Ocean[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2015(4): 96-104. [肖悦悦, 朱江峰, 戴小杰. 热带太平洋中上层鱼类群落结构研究[J]. 海洋湖沼通报, 2015(4): 96-104.]
- [28] Camias J A, Báez J, García-Soto C, et al. Biodiversity changes of the water column large pelagic species in the Alboran Sea[J]. *Rapp Comm int Mer Médit*, 2007, 38: 442.
- [29] Kendall M A, Aschan M. Latitudinal gradients in the structure of macrobenthic communities: A comparison of Arctic, temperate and tropical sites[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1993, 172(1-2): 157-169.

- [30] Lezama-Ochoa N, Murua H, Chust G, et al. Biodiversity in the by-catch communities of the pelagic ecosystem in the western Indian Ocean[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2015, 24(11): 2647-2671.
- [31] Yang S L, Wu Y M, Zhang B B, et al. Relationship between fishing grounds temporal-spatial distribution of *Thunnus obesus* and thermocline characteristics in the Western and Central Pacific Ocean[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(1): 281-290. [杨胜龙, 伍玉梅, 张忭忭, 等. 中西太平洋大眼金枪鱼中心渔场时空分布与温跃层的关系[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 281-290.]
- [32] Xu G Q, Zhu W B, Zhang H L, et al. Relationship between fishing grounds of *Thunnus obesus* and *Thunnus albacores* with environmental factors in the Indian Ocean based on generalized additive model[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 40(12): 68-80. [徐国强, 朱文斌, 张洪亮, 等. 基于GAM模型分析印度洋大眼金枪鱼和黄鳍金枪鱼渔场分布与不同环境因子关系[J]. 海洋学报, 2018, 40(12): 68-80.]
- [33] Chen X Z, Yang S L, Zhang Y, et al. Vertical distribution of bigeye tuna *Thunnus obesus* in the tropical Indian Ocean[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(3): 660-671. [陈雪忠, 杨胜龙, 张禹, 等. 热带印度洋大眼金枪鱼垂直分布空间分析[J]. 中国水产科学, 2013, 20(3): 660-671.]
- [34] Song L M, Xu L X, Chen X J. Relationship between bigeye tuna vertical distribution and the temperature, salinity in the Central Atlantic Ocean[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2004, 11(6): 561-566. [宋利明, 许柳雄, 陈新军. 大西洋中部大眼金枪鱼垂直分布与温度、盐度的关系[J]. 中国水产科学, 2004, 11(6): 561-566.]
- [35] Zheng X C. Investigation on feeding ecology and habitat characteristics of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the eastern Pacific Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014. [郑晓春. 东太平洋大眼金枪鱼摄食生态及其栖息环境研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.]
- [36] Nakano H, Okazaki M, Okamoto H. Analysis of catch depth by species for tuna longline fishery based on catch by branch lines[J]. *Bulletin of the National Research Institute of Far Seas Fisheries*, 1997, 34: 43-62.
- [37] Gliwicz Z M. A lunar cycle in zooplankton[J]. *Ecology*, 1986, 67(4): 883-897.
- [38] de Bruyn A, Meeuwigg J J. Detecting lunar cycles in marine ecology: Periodic regression versus categorical ANOVA[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 214: 307-310.
- [39] Hernández-León S. Natural variability of fisheries and lunar illumination: A hypothesis[J]. *Fish and Fisheries*, 2008, 9(2): 138-154.
- [40] Poisson F, Gaertner J, Taquet M, et al. Effects of lunar cycle and fishing operations on longline-caught pelagic fish: Fishing performance, capture time, and survival of fish[J]. *Fishery Bulletin*, 2010, 108(3): 268-281.
- [41] Sajeevan M K, Sanadi R B. Evaluation of the effect of lunar cycle and monsoon on catch of yellowfin tuna[J]. *Journal of the Marine Biological Association of India*, 2014, 56(2): 62-66.
- [42] Mohan M, Kunhikoya K. Bait-fish and tuna catches at Minicoy Island (Lakshadweep) in relation to lunar cycle during 1983-84 season[J]. *Indian Journal of Fisheries*, 1987, 34(3): 355-358.
- [43] Santos M N, Garcia A. The influence of the moon phase on the cpues for the Portuguese swordfish (*Xiphias gladius* L., 1758) fishery[J]. *Collective Volumes of Scientific Papers ICCAT*, 2005, 58(4): 1466-1469.
- [44] Song L M, Chen X J, Xu L X. Relationship between vertical distribution of yellowfin tunas' (*Thunnus albacares*) and the concerned environmental factors in the central Atlantic Ocean[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, 35(1): 64-68. [宋利明, 陈新军, 许柳雄. 大西洋中部黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)的垂直分布与有关环境因子的关系[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(1): 64-68.]
- [45] Vinagre C, França S, Cabral H N. Diel and semi-lunar patterns in the use of an intertidal mudflat by juveniles of Senegal sole, *Solea senegalensis*[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 69(1-2): 246-254.
- [46] Schaefer K M, Fuller D W. Movements, behavior, and habitat selection of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the eastern equatorial Pacific, ascertained through archival tags[J]. *Fishery Bulletin*, 2002, 100(4): 765-788.
- [47] Somers K M, Stechey D P M. Variable trappability of crayfish associated with bait type, water temperature and lunar phase[J]. *American Midland Naturalist*, 1986, 116(1): 36.

Catch composition and species diversity of pelagic longline fishing in the tropical Western and Central Pacific Ocean

WANG Xiao^{1,2}, WANG Yixi¹, LIU Wenjun¹, SHI Jiangao³, ZHANG Jian^{1,4,5}

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

2. Shanghai Kai Chuang Deep Sea Fisheries Co, Ltd., Shanghai 200082, China;

3. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;

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

5. National Engineering Research Centre for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Composition and species diversity of catches caught by pelagic longline fishing in the tropical Western and Central Pacific Ocean (WCPO, 2°03'—11°17'S 163°14'—173°35'E) during May 2018 and Mar 2019 were analyzed. The generalized linear mixed model (GLMM) and circle statistics methods were used to assess the effects of temporal and spatial factors, such as water depth and lunar phase, on the catch composition and species diversity. The results showed that: (1) the total number of catches was 3673, and catches consist of 35 species, in 30 genera, 21 families, and 9 orders. According to index of relative importance (IRI), bigeye tuna (*Thunnus obesus*) and yellowfin tuna (*Thunnus albacores*) are dominant species, while blue marlin (*Makaira nigricans*), albacore (*Thunnus alalunga*), silky shark (*Carcharhinus falciformis*), long-snouted lancetfish (*Alepisaurus ferox*), and pelagic stingray (*Pteroplatytrygon violacea*) are important species. (2) The CPUEs of bigeye tuna, yellowfin tuna, and bycatch species were (1.66±0.89), (1.39±1.45), and (2.52±1.27) ind/1000 hooks, respectively. The Shannon-Wiener (H'), Margalef (D) and Pielou (J) indices were (1.78±0.28), (2.53±0.60), and (0.79±0.09), respectively. (3) The GLMM model fit indicated that the lunar phase (cosine) had an extremely significant effect on the CPUE of bigeye tuna ($P=0.001$, higher CPUE in full moon and lower in new moon), and the lunar phase (sine) had a marginal effect on the CPUE of yellowfin tuna (higher CPUE in the first quarter and lower in the last quarter lunar phase). As for bycatch species, no significant effect of lunar phase on CPUE was detected. Water depth had a highly significant effect on CPUEs ($P<0.001$). (4) No significant effect of lunar phase on species diversity indices was detected. However, water depth significantly influences the Shannon-Weiner index (H') and Margalef index (D) ($P<0.001$). The results revealed that the high richness of species and complexity of community in the tropical WCPO would provide good community tolerance to environmental changes and fishing activities.

Key words: pelagic longline; catch composition; species diversity; CPUE; water depth; lunar phase; tropical western and central Pacific Ocean

Corresponding author: ZHANG Jian. E-mail: j-zhang@shou.edu.cn