

doi: 10.12131/20190178

文章编号: 2095-0780-(2020)01-0069-09

南太平洋长鳍金枪鱼延绳钓渔获率与环境因子的关系研究

张嘉容¹, 杨晓明^{1,2}, 戴小杰^{1,2}, 邹莉瑾^{1,2}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 2. 远洋渔业协同创新中心/国家远洋渔业工程技术研究中心/
大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306)

摘要: 为掌握不同水层的环境因子对长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)延绳钓渔获率的影响, 根据2015—2017年中国大陆在该海域的长鳍金枪鱼延绳钓渔捞日志资料, 结合同期海洋环境数据, 采用广义可加模型(Generalized additive model, GAM)对渔获率与各因子的关系进行研究。通过相关分析获取各环境因子相关系数, 对相关性较大的环境因子分组建模。结果表明: 1) 海表面温度与120 m水深温度、海表面温度与海表面高度、120 m水深温度与海表面高度、300 m水深温度与300 m水深盐度为高度相关因子, 海表面盐度、叶绿素a浓度、海表风场南北分量与其他环境因子之间的相关性均较小; 2) 模型的总解释偏差介于30%~40%, 各环境因子重要性依次为120 m水深温度、海表温度、300 m水深温度、120 m水深盐度、海表面高度、300 m水深盐度、海表盐度、混合层深度、海面风场南北分量、海面风场东西分量、叶绿素a浓度; 3) 120 m水深温度与单位捕捞努力渔获量(CPUE)在15~30 °C呈负相关。海表温度整体趋势与120 m水深温度类似, 其中在25~28 °C呈正相关。300 m水深温度与CPUE在10~18 °C呈现明显的正效应关系。

关键词: 长鳍金枪鱼; 单位捕捞努力渔获量; 相关分析; 广义可加模型; 南太平洋

中图分类号: S 932.4

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Relationship between catch rate of longline albacore (*Thunnus alalunga*) and environmental factors in South Pacific

ZHANG Jiarong¹, YANG Xiaoming^{1,2}, DAI Xiaojie^{1,2}, ZOU Lijin^{1,2}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Collaborative Innovation Center for Distant-Water Fisheries/National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries/Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China)

Abstract: Based on the data of albacore logbook (*Thunnus alalunga*) collected by mainland China from 2015–2017 in the South Pacific and the marine environmental data in the same period, we analyzed the relationship between catch rate and environmental factors, so as to examine the effects of environmental factors at different depths on *T. alalunga* by establishing a GAM (Generalized additive model). In addition, we had obtained the correlation coefficient of each environmental factor (those with large correlation were grouped and modeled) by correlation analysis. The results show that: 1) Sea surface temperature and sea temperature at depth of 120 m, sea surface temperature and sea surface height, sea temperature at depth of 120 m and sea surface height, sea temperature and sea salinity at depth of 300 m were highly correlated factors. However, sea surface salinity, chlorophyll *a* concentration and northward sea surface wind had no significant correlation with the other environmental factors. 2) The explained cumulative deviance was

收稿日期: 2019-09-09; 修回日期: 2019-10-25

资助项目: 国家自然科学基金项目(41506151)

作者简介: 张嘉容(1995—), 女, 硕士研究生, 从事长鳍金枪鱼渔场研究。E-mail: jrzhang0922@163.com

通信作者: 戴小杰(1966—), 男, 博士, 教授, 从事渔业资源研究。E-mail: xjdai@shou.edu.cn

30%–40%; the environmental factors sorted by importance are as follows: sea temperature at depth of 120 m, sea surface temperature, sea temperature at depth of 300 m, sea salinity at depth of 120 m, sea surface height, sea salinity at depth of 300 m, sea surface salinity, mixed layer depth, northward sea surface wind, eastward sea surface wind and chlorophyll *a* concentration. 3) The sea temperature at depth of 120 m was negatively correlated with CPUE (Catch per unit effort) at 15–30 °C. The trend of sea surface temperature was similar to the sea temperature at depth of 120 m, with a positive correlation at 25–28 °C. The sea temperature at depth of 300 m and CPUE showed a significant positive relationship at 10–18 °C.

Key words: *Thunnus alalunga*; CPUE; Correlation analysis; Generalized additive model (GAM); South Pacific

近年来，在南太平洋海域进行商业捕捞作业的船队主要为中国大陆和中国台湾船队^[1]。有研究表明环境变化对于长鳍金枪鱼 (*Thunnus alalunga*) 的分布和洄游有显著影响^[2-3]，由于长鳍金枪鱼的高度洄游性使商业捕捞作业船队对其渔场的寻找成为一项高成本生产活动。因此，了解长鳍金枪鱼的资源分布与环境因子的关系对提高该渔业的生产效率具有重要意义。南太平洋长鳍金枪鱼作为延绳钓渔船的主要捕捞对象，一般栖息在 200~300 m 水层^[4]。而目前国内学者多选择表层环境因子作为研究对象^[5-7]，较少采用不同水层的环境数据。广义可加模型 (Generalized additive model, GAM) 作为定量分析渔获率与环境要素之间关系的方法，目前已得到广泛应用。而这些研究在变量选择中多加入了时空因子^[8-10]，忽略了时空因子与环境因子之间和不同环境因子之间的多重共线性^[11]。此外，由于缺少该鱼种完整的渔捞日志数据，研究多采用 5°方格数据^[7,10]，但这种较低空间分辨率的环境数

据往往会使弱化数值分析的效果。

本文根据中国大陆地区所有渔船 2015—2017 年在南太平洋的渔捞日志，整理出了空间分辨率为 1°×1°的月渔获数据，用 GAM 模型逐步回归分析各环境因子与长鳍金枪鱼资源的关系，以探讨环境因子的变化对长鳍金枪鱼资源分布的影响，以期为南太平洋长鳍金枪鱼的合理开发利用和资源养护管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 渔业数据 来自中国大陆地区 2015—2017 年所有渔船渔捞日志，选取在南太平洋海域 (140°E—130°W, 0°N—50°S, 图 1) 且捕捞对象为长鳍金枪鱼的渔捞日志数据 (具体数据总量见表 1)，包括日期、作业位置、投钩数、各鱼种渔获量尾数和千克数等。

1.1.2 水文环境数据 包括海表温度 (Sea surface

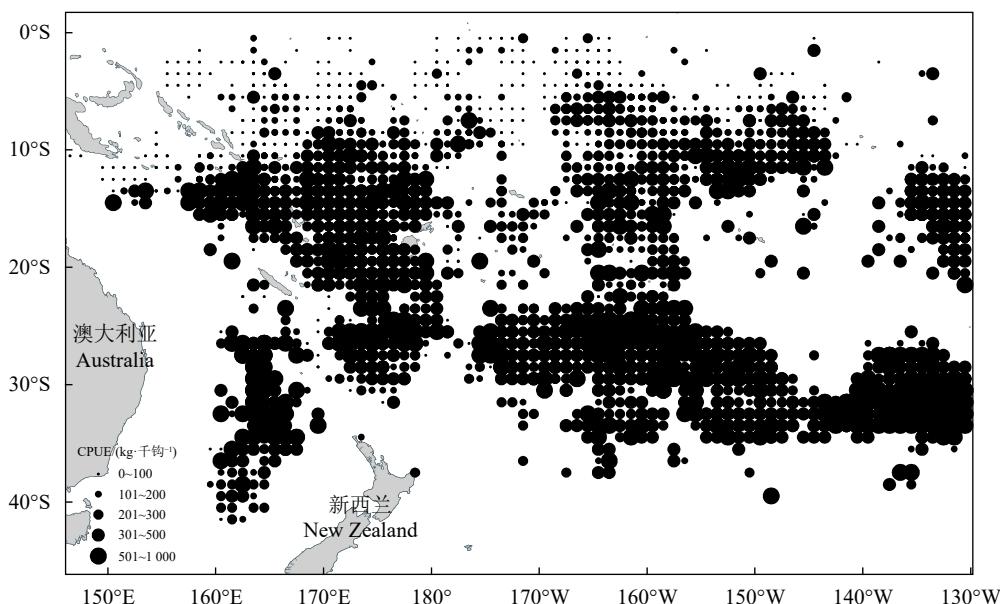


图1 2015—2017年南太平洋长鳍金枪鱼单位捕捞努力渔获量的平均分布

Figure 1 Average distribution of CPUE of *T. alalunga* in South Pacific during 2015–2017

表1 南太平洋长鳍金枪鱼延绳钓渔业作业天数情况**Table 1** Fishing days of longline fishery of *T. alalunga* in South Pacific

年份 Year	总渔船数 Total vessels	累计作业天数 Total fishing days
2015	107	18 070
2016	115	20 591
2017	136	26 291

temperature, SST) 及不同深度水温、海表盐度 (Sea surface salinity, SSS) 及不同水层盐度、叶绿素 *a* 浓度 (Chlorophyll *a* concentration, Chla)、海表风场 (Sea surface wind, SSW)、海表面高度 (Sea surface height, SSH)、混合层深度 (Mixed layer depth, MLD) 的月数据。其中海表温度及不同水深温度、海表盐度及不同水层盐度、混合层深度来自中国 Argo 实时资料中心提供的《全球海洋 Argo 网格数据集 (BOA_Argo)》, 空间分辨率为 1°。叶绿素 *a* 浓度来自美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的 Ocean Watch 网站, 空间分辨率为 0.05°。海表风场来自美国宇航局物理海洋学数据分发存档中心 (PO.DAAC) 提供的 CCMP 风速, 空间分辨率为 0.25°, 海表面高度来自德国汉堡大学的综合气候数据中心提供的 ORA-S4 资料, 空间分辨率为 1°。

1.2 数据预处理

1) 单位捕捞努力量渔获量 (Catch per unit effort, CPUE) 可以作为代表长鳍金枪鱼渔业资源状态的指标。其计算公式为:

$$\text{CPUE} = \frac{U_{\text{catch}}}{f_{\text{hooks}}} \quad (1)$$

式中 U_{catch} 表示 1°×1°单位渔区内的累计渔获量 (kg), f_{hooks} 是 1°×1°单位渔区内的累计投钩数 (千钩), 时间尺度为月。

2) 用 Matlab 读取海表温度、叶绿素 *a* 浓度、海表风场数据, 并与单位渔区进行数据匹配。受云层遮挡等因素影响, 环境数据尤其是叶绿素 *a* 浓度数据存在缺失情况。本文采用计算周围变量均值的方法对缺失数据进行处理。

1.3 分析方法

1.3.1 相关性分析 利用 Pearson 相关系数计算环境因子之间的相关系数^[12], 其公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中 r 表示相关系数, x_i 表示环境因子 x 的第 i 个观测值, \bar{x} 表示环境因子的均值, y_i 表示环境因子 y 的第 i 个观测值, \bar{y} 表示环境因子 y 的均值。

1.3.2 GAM 模型 GAM 模型能够较好地处理响应变量和一组解释变量之间高度非线性和非单调关系的能力, 被广泛用于渔获率与环境关系研究^[13-14]。其一般表达式为:

$$g(\mu) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k f_i(x_i) + \varepsilon \quad [\mu = E(Y/X)] \quad (3)$$

式中 $g(\mu)$ 表示联系函数, β_0 表示常数截距项, $f_i(x_i)$ 表示用来描述 $g(\mu)$ 与第 i 个解释变量关系的平滑函数。

GAM 模型和逐步回归计算在 R-3.5.0 中实现。

2 结果

2.1 环境因子之间的相关性

本研究在不同水深环境数据中选择了 60、120、180、240、300 m 深度水温和盐度与其他表层环境因子进行了相关性分析。计算表明各层之间温度和盐度相关性较大 (由于篇幅所限, 结果未列出), 最后选取了相关性较小的三层 (表层、120 m 和 300 m) 参与最后的要素分组中。通常认为如果相关系数大于 0.75 为强相关^[15], 介于 0.5~0.75 为中等程度相关, 小于 0.5 为弱相关。SST 和 t_{120} , t_{300} 和 s_{300} , SST 与 SSH, t_{120} 与 SSH 为高度相关因子; SST 与 s_{120} , SST 与 MLD, SST 与 U_{wind} , t_{120} 与 s_{120} , t_{120} 与 U_{wind} 均中度相关; SSS、Chla、 V_{wind} 与其他环境因子之间的相关性均较小 (表 2)。

2.2 GAM 模型的构建与分析

本研究使用 GAM 模型分析长鳍金枪鱼 CPUE 与各环境因子之间的关系, 其中 CPUE 作为响应变量, SST、 t_{120} 、 t_{300} 、SSS、 s_{120} 、 s_{300} 、Chla、 U_{wind} 、 V_{wind} 、SSH、MLD 作为解释变量, 根据相关性分析结果, 将环境因子分为 4 组分别建立 GAM 模型, 表达式为:

$$\log(\text{CPUE} + 1) \sim s(\text{SST}) + s(t_{300}) + s(\text{SSS}) + s(V_{\text{wind}}) + s(\text{Chla}) + \varepsilon$$

$$\log(\text{CPUE} + 1) \sim s(t_{120}) + s(\text{SSS}) + s(s_{300}) + s(\text{MLD}) + s(V_{\text{wind}}) + s(\text{Chla}) + \varepsilon$$

$$\log(\text{CPUE} + 1) \sim s(t_{300}) + s(\text{SSS}) + s(s_{120}) + s(\text{MLD}) + s(V_{\text{wind}}) + s(\text{SSH}) + s(\text{Chla}) + \varepsilon$$

$$\log(\text{CPUE} + 1) \sim s(t_{120}) + s(\text{SSS}) + s(\text{MLD}) + s(U_{\text{wind}}) + s(V_{\text{wind}}) + s(\text{SSH}) + s(\text{Chla}) + \varepsilon$$

式中为了防止零值出现, 采用 CPUE 加上 1 再进行对数化处理, s 为自然立方样条平滑 (Nat-

表2 各环境变量相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficients matrix of environmental factors

变量 Variable	t_{120}	t_{300}	SSS	s_{120}	s_{300}	MLD	U_{wnd}	V_{wnd}	Chla	SSH
SST	0.916	0.005	-0.359	0.545	-0.091	-0.560	-0.541	-0.146	-0.316	0.753
t_{120}	-	-0.002	-0.239	0.582	-0.098	-0.307	-0.542	-0.137	-0.221	0.757
t_{300}	-	-	0.176	0.165	0.925	-0.152	-0.277	0.428	-0.068	0.440
SSS	-	-	-	0.408	0.097	0.396	-0.056	-0.175	0.128	-0.432
s_{120}	-	-	-	-	-0.008	-0.124	-0.504	-0.242	-0.150	0.258
s_{300}	-	-	-	-	-	-0.117	-0.127	0.451	0.114	0.407
MLD	-	-	-	-	-	-	0.255	0.004	0.326	-0.451
U_{wnd}	-	-	-	-	-	-	-	-0.308	0.178	-0.493
V_{wnd}	-	-	-	-	-	-	-	-	0.137	0.212
Chla	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.238

注: SST. 海表温度; t_{120} . 120 m 水深温度; t_{300} . 300 m 水深温度; SSS. 海表盐度; s_{120} . 120 m 水深盐度; s_{300} . 300 m 水深盐度; MLD. 混合层深度; Chla. 海表面叶绿素 a 浓度; U_{wnd} . 海表风场东西分量, 即纬向风, 以东为正; V_{wnd} . 海表风场南北分量, 即经向风, 以北为正; SSH. 海表面高度; 下同

Note: SST. Sea surface temperature; t_{120} . Sea temperature at depth of 120 m; t_{300} . Sea temperature at depth of 300 m; SSS. Sea surface salinity; s_{120} . Sea salinity at depth of 120 m; s_{300} . Sea salinity at depth of 300 m; MLD. Mixed layer depth; Chla. Sea surface chlorophyll a concentration; U_{wnd} . Eastward Sea surface wind; V_{wnd} . Northward Sea surface wind; SSH. Sea surface height. The same case in the following table

ural cube spline smoother), ε 为误差项。

结果显示, 各模型的总偏差解释率介于 30%~40% (表 3)。各环境因子的平均可解释偏差大小依次为 t_{120} (19.7%)、SST (18.5%)、 t_{300} (12.5%)、 t_{120} (12.3%)、SSH (7.0%)、 s_{300} (4.9%)、SSS (3.3%)、MLD (2.4%)、 V_{wnd} (2.4%)、 U_{wnd} (1.8%)、Chla (0.8%)。

2.3 各因子对 CPUE 的影响和关系

GAM 模型分析发现, SST、 t_{120} 、 t_{300} 、 s_{120} 是对 CPUE 影响较大的环境变量 (表 3)。SST 与 CPUE 介于 15~30 ℃ 整体呈现负相关, 其中介于 25~28 ℃ 显示正相关 (图 2-a)。 t_{120} 与 SST 的趋势一致, 呈负效应关系, 其中介于 18~23 ℃ 保持平稳状态 (图 2-b)。 t_{300} 在 10 ℃ 之前置信区间较大且数据量较小故不予讨论, 在 10 ℃ 之后呈现出明显的正相关 (图 2-c)。 s_{120} 与 CPUE 以 35.5 为中心总体呈开口向上的抛物线, 在 36.4 之后呈负相关 (图 2-e)。

对 CPUE 影响比较小的几个环境因子分别为 SSS、 s_{300} 、MLD、 U_{wnd} 、 V_{wnd} 、SSH、Chla。各模型得出的 SSS 对 CPUE 的影响略有差异, 总体与 CPUE 保持平稳状态 (图 2-d)。 s_{300} 与 CPUE 以 34.8 为中心呈开口向上的抛物线 (图 2-f), 在 35.0 之后基本保持平稳。MLD 与 CPUE 总体保持稳定 (图 2-g), 呈现轻微的正效应关系。 U_{wnd} 与 CPUE

基本保持平稳 (图 2-h)。 V_{wnd} 与 CPUE 总体上呈现正效应关系 (图 2-i), 其中在 $-1 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 保持平稳。Chla 与 CPUE 整体上呈现轻微的负相关 (图 2-j)。SSH 与 CPUE 总体上呈负效应关系 (图 2-k), 在 0.5 m 之后这种负效应明显放缓。

在参与 2 个及以上模型的环境因子中, MLD、 V_{wnd} 、Chla 在较小的置信区间内总体趋势相似, 与 CPUE 基本保持平稳状态, t_{300} 、SSH 对 CPUE 的影响较大, 但依然表现出了较高的拟合度。SSS 在对 CPUE 的影响略有差异, 介于 35.2~35.0 拟合较好。

3 讨论

3.1 环境因子的多重共线性

目前通过 GAM 模型分析环境因子与渔场的关系时通常会加入时空因子。然而时空因子的加入可能会影响环境因子与渔场关系的判断, 如海表温度分布与纬度存在相关性, 海表温度从低纬度向高纬度递减, 纬度因素的加入会影响海表温度与渔场真实关系的推断。因此时空因子的加入对渔场与环境因子的关系分析可能会造成误判。

除了时空因子与环境因子的相互影响外, 环境因子之间也存在不可避免的自相关和多重共线性问

表3 GAM模型拟合结果的偏差分析

Table 3 Analysis of deviance for generalized additive models (GAM)

分组 Group	累加影响因子 Cumulative of influencing factors	P	决定系数 R^2	累计解释偏差 Cumulative of deviance explained	可解释偏差 Deviance explained	AIC值 AIC value
第一组 Group 1	+SST	$<2\times10^{-16}***$	0.185	18.5%	18.5%	24 376.49
	+ t_{300}	$<2\times10^{-16}***$	0.297	29.9%	11.4%	23 222.20
	+SSS	$<2\times10^{-16}***$	0.306	30.8%	0.9%	23 136.20
	+ V_{wnd}	$<2\times10^{-16}***$	0.326	32.9%	2.1%	22 908.96
	+Chla	$<2\times10^{-16}***$	0.341	34.3%	1.4%	22 746.25
第二组 Group 2	+ t_{120}	$<2\times10^{-16}***$	0.196	19.7%	19.7%	24 265.62
	+SSS	$<2\times10^{-16}***$	0.215	21.6%	1.9%	24 087.74
	+ s_{300}	$<2\times10^{-16}***$	0.263	26.5%	4.9%	23 599.79
	+MLD	$<2\times10^{-16}***$	0.282	28.5%	2.0%	23 410.19
	+ V_{wnd}	$<2\times10^{-16}***$	0.295	29.8%	1.3%	23 276.47
第三组 Group 3	+Chla	$<2\times10^{-16}***$	0.307	31%	1.2%	23 147.81
	+ t_{300}	$<2\times10^{-16}***$	0.13	13.1%	13.1%	24 881.85
	+SSS	$<2\times10^{-16}***$	0.18	18.2%	5.1%	24 428.97
	+ s_{120}	$<2\times10^{-16}***$	0.303	30.5%	12.3%	23 165.18
	+MLD	$<2\times10^{-16}***$	0.319	32.1%	1.6%	23 000.88
第四组 Group 4	+ V_{wnd}	$<2\times10^{-16}***$	0.337	34%	1.9%	22 795.21
	+SSH	$<2\times10^{-16}***$	0.393	39.6%	5.6%	22 110.88
	+Chla	0.002 75**	0.394	39.8%	0.2%	22 100.98
	+ t_{300}	$<2\times10^{-16}***$	0.13	13.1%	13.1%	24 881.85
	+SSS	$4.89\times10^{-8}***$	0.18	18.2%	5.1%	24 428.97
	+MLD	$<2\times10^{-16}***$	0.214	21.7%	3.5%	24 105.96
	+ U_{wnd}	0.030 1*	0.231	23.4%	1.7%	23 942.02
	+ V_{wnd}	$<2\times10^{-16}***$	0.267	27.1%	3.7%	23 574.18
	+SSH	$<2\times10^{-16}***$	0.352	35.5%	8.4%	22 626.40
	+Chla	$2.51\times10^{-15}***$	0.356	36%	0.5%	22 571.78

题^[16]。长鳍金枪鱼的渔场分布与各环境因子显著相关, 是各个环境因子综合作用的结果, 而环境因子间的高度相关性又会掩盖单个环境因子与渔场分布的真实关系。本研究发现, 海表温度除了与混合层深度、海表风场、海表面高度等海表面环境因素有较大的相关性外, 与各水层的温度、盐度也具有较大的相关性, 因此在构建模型探讨海表温度与长鳍金枪鱼渔场的关系前, 需要进行环境因子的相关性分析, 通过排除相关系数较大的环境因子, 降低这种多重共线性的负面影响^[17]。

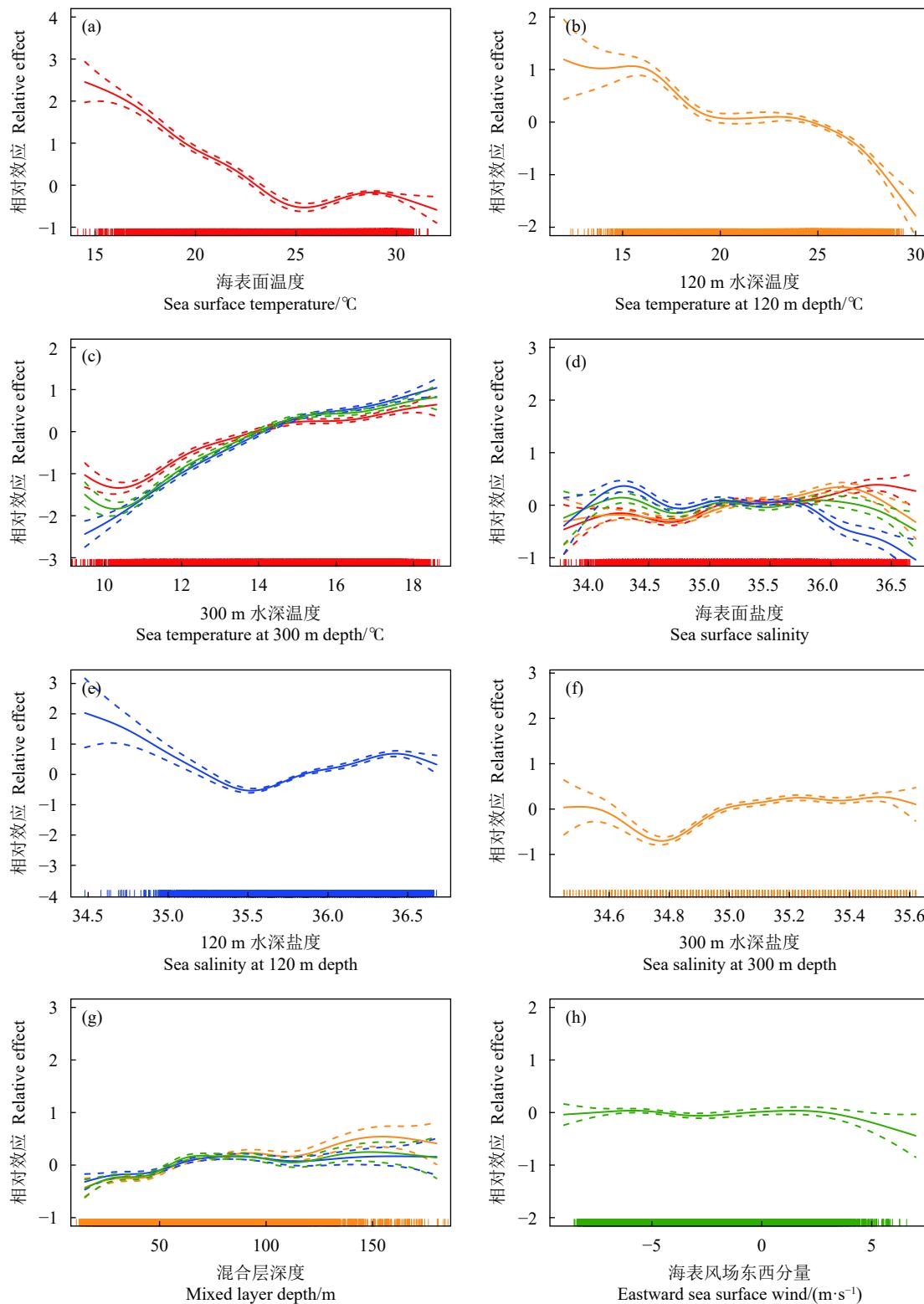
在建模过程中为避免同一模型内环境因子之

间的多重共线性, 同时又要确保放入尽量多的环境因子, 本研究将环境因子分为4组分别建立GAM模型。由于每组模型选择的环境因子不同, 得出的总解释偏差也有所差异。而在参与多个模型的环境因子中, t_{300} 、MLD、 V_{wnd} 、Chla、SSH的总体趋势相似(图2), 验证了这种分组建模方式分析环境因子与渔场分布具有较高的可信度。海表面的盐度略有差异, 可能是由于其与120 m水深盐度、混合层深度、海表面高度均呈中等程度相关, 不同的环境因子的选择影响了海表盐度与CPUE的关系。

3.2 CPUE 与环境因子的关系

作为影响海洋鱼类活动最重要的环境因子之一, 温度的变化对鱼类的分布、洄游和集群等会造成直接或者间接的影响^[18], 在进行长鳍金枪鱼时空分布与主要环境因子的关系研究时, 一般都会选用 SST 作为环境因子^[19-20]。海表温度对南太平洋

长鳍金枪鱼的分布有显著影响, 由 GAM 模型结果可以发现, 长鳍金枪鱼的主要作业渔区出现在 SST 介于 20~30 °C 的海域(图 2-a), 这与樊伟等^[21]的南太平洋长鳍金枪鱼产量高密度区呈双峰型, 出现在 20 °C 和 29 °C 海域的研究结果一致。同时发现, SST 与 CPUE 总体上呈现负相关, 在 25 °C 之



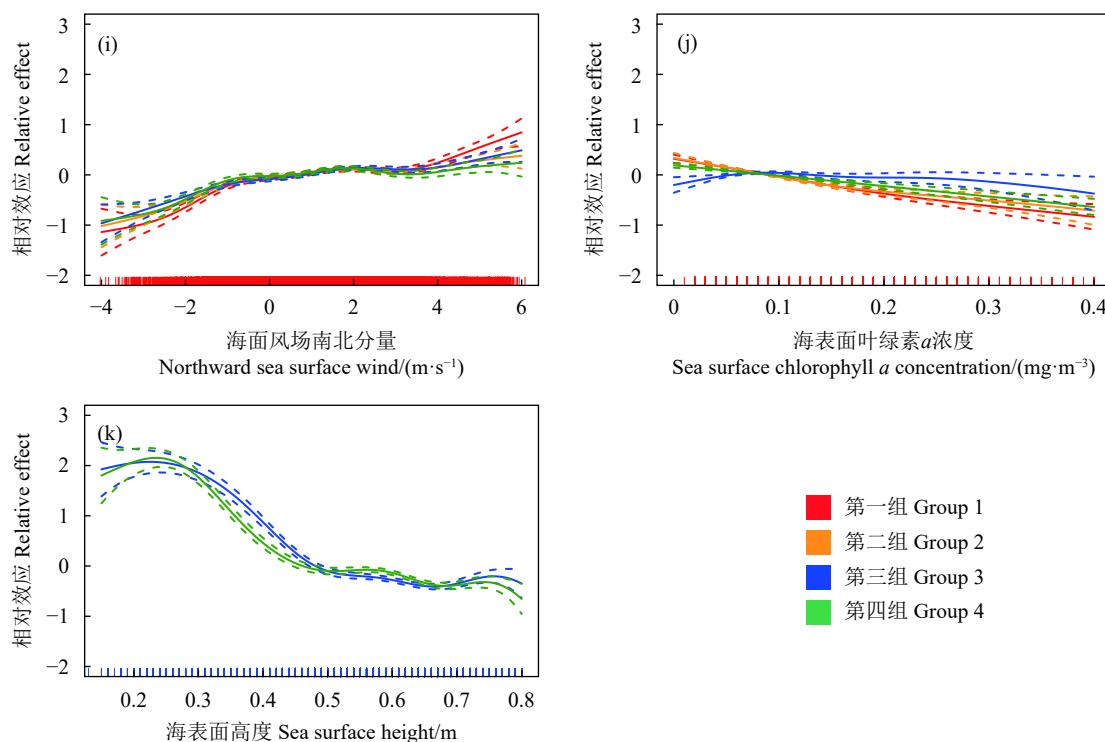


图2 不同环境因子对南太平洋延绳钓渔业长鳍金枪鱼单位捕捞努力渔获量的影响

Figure 2 Effects of different environmental factors on CPUE of longline fishery of *T. alalunga* in South Pacific

前随温度的升高 CPUE 逐渐降低，在 25 ℃ 之后略有回升。说明相对低温海域的作业频率较低但 CPUE 较高，可以探寻相对低温海域的长鳍金枪鱼渔区并进行开发。

延绳钓渔船通常以长鳍金枪鱼成鱼为目标鱼种，主要在 0~400 m 深度设钩。水温垂直结构在长鳍金枪鱼渔场的形成过程中有直接影响^[22]。研究结果显示，120~300 m 水层，温度显著影响长鳍金枪鱼的产量，这可能是因为该水层是水温急剧下降的温跃层，温度和密度变化大，溶解氧含量高，饵料资源丰富。Hoyle 等^[23]发现，东南太平洋长鳍金枪鱼主要栖息于 170~220 m 水层，中西太平洋为 150~300 m，与本文研究结果相似。Williams 等^[24]在汤加附近海域发现，长鳍金枪鱼高渔获率水深一般为 200~300 m，与本文研究结果有一定差异，这可能是缘于研究海域不同。

海表面盐度对于长鳍金枪鱼渔获量的影响较小，这与范永超等^[25]、蒋汉凌^[26]的研究结果一致。本研究还发现， s_{120} 对长鳍金枪鱼渔获量有显著影响。这说明海表面盐度影响较小可能是因为其主要通过影响溶解气体、海流等其他海表面环境因素从而对长鳍金枪鱼 CPUE 间接造成影响，而各

水深盐度是影响长鳍金枪鱼 CPUE 的一个重要因素，在以后的研究中不可忽略。120~300 m 温度和盐度显著影响长鳍金枪鱼 CPUE 的分布，这也验证了本研究长鳍金枪鱼主要栖息于 120~300 m 水层的结果。

海面高度主要与水团、水系、海流、潮汐、中尺度涡等海洋动力信息有关。随着海面高度的增加，表层水团进行辐散或汇合^[27]，底层水上升进行补充，海水底层营养盐上升对表层营养盐进行补充，使海水表层初级生产力增加，浮游生物密度增加，长鳍金枪鱼资源量增加。本研究中，SSH 与长鳍金枪鱼 CPUE 呈现负效应，可能是由于处于上升流的中心区域，营养盐浓度高，初级生产力高，浮游生物密度高，导致水体中氧气的大量消耗。

混合层深度会对栖息于混合层的长鳍金枪鱼造成垂直分布的限制^[28]。本研究中混合层深度与 CPUE 呈现出轻微的正效应。以往的研究中，可能由于存在与混合层深度有较大相关性的环境因素，导致混合层深度与 CPUE 的关系并不明显，这与本文结果略有不同，未来可作进一步探究。

从食物链的角度看，叶绿素 *a* 浓度通常表征以浮游植物为食的浮游动物量，间接影响渔场分

布^[29]。以往的研究中,叶绿素a浓度通常是影响南太平洋长鳍金枪鱼CPUE的重要原因,而本研究中仅呈现出轻微的负相关,这可能是由于在叶绿素a浓度升高、浮游植物生物量增大、长鳍金枪鱼聚集增加的过程中存在时间延迟现象^[30]。

国内外学者在长鳍金枪鱼CPUE与环境因子关系的研究中多使用海表面温度、海表面高度、叶绿素a浓度等,除此之外,海面风场也是影响鱼类活动的一个重要因子。

本研究表明, U_{wind} 与CPUE总体保持稳定, V_{wind} 与CPUE呈现正效应,其中在 $-2\sim4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 保持平稳状态。海面风场对长鳍金枪鱼CPUE的影响显著,总体呈正相关关系,可能是由于较大的风速导致海水的湍流混合加大、水柱混合加深以及海水浑浊度增加^[31-32],使海域营养盐增加、生产力提高,因此形成了良好的渔场,也有可能是这种混合造成海域适宜的水温对长鳍金枪鱼资源有促进作用。

由于本文仅有3年(2015—2017年)的渔捞日志数据,对环境关系的研究存在一些制约,未来将选择更长时间尺度的渔业数据并结合溶解气体、水系和海流、潮汐和潮流、气象因素等其他影响鱼类行为的环境因子作进一步研究。

参考文献:

- [1] TREMBLAY B L, HAMPTON J, MCKECHNIE S, et al. Stock assessment of South Pacific albacore tuna (WCPFC-SC14-2018/SA-WP-05)[R]. Busan, Republic of Korea: The Pacific Community (SPC), 2018: 13.
- [2] BRIAND K, MOLONY B, LEHODEY P. A study on the variability of albacore (*Thunnus alalunga*) longline catch rates in the southwest Pacific Ocean[J]. Fish Oceanogr, 2011, 20(6): 517-529.
- [3] 宋利明, 谢凯, 赵海龙, 等. 库克群岛海域海洋环境因子对长鳍金枪鱼渔获率的影响 [J]. 海洋通报, 2017(1): 96-106.
- [4] NIKOLIC N, MORANDEAU G, HOARAU L, et al. Review of albacore tuna, *Thunnus alalunga*, biology, fisheries and management[J]. Rev Fish Biol Fish, 2017, 27: 775-810.
- [5] SAGARMINAGA Y, ARRIZABALAGA H. Spatio-temporal distribution of albacore (*Thunnus alalunga*) catches in the northeastern Atlantic: relationship with the thermal environment[J]. Fish Oceanogr, 2010, 19(2): 121-134.
- [6] DOMOKOS R, SEKI M P, POLOVINA J J, et al. Oceanographic investigation of the American Samoa albacore (*Thunnus alalunga*) habitat and longline fishing grounds[J]. Fish Oceanogr, 2007, 16(6): 555-572.
- [7] 毛江美, 陈新军, 余景. 基于神经网络的南太平洋长鳍金枪鱼渔场预报 [J]. 海洋学报, 2016, 38(10): 34-43.
- [8] 闫敏, 张衡, 伍玉梅, 等. 基于GAM模型研究时空及环境因子对南太平洋长鳍金枪鱼渔场的影响 [J]. 大连海洋大学学报, 2015, 30(6): 681-685.
- [9] GONI N, DIDOUAN C, ARRIZABALAGA H, et al. Effect of oceanographic parameters on daily albacore catches in the Northeast Atlantic[J]. Deep-Sea Res II, 2015, 113: 73-80.
- [10] 杨胜龙, 张忭忭, 唐宝军, 等. 基于GAM模型分析水温垂直结构对热带大西洋大眼金枪鱼渔获率的影响 [J]. 中国水产科学, 2017, 24(4): 875-883.
- [11] 王茹琳, 李庆, 封传红, 等. 基于MaxEnt的西藏飞蝗在中国的适生区预测 [J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8556-8566.
- [12] 周兆丁, 吕锐, 沈瑾, 等. 统计软件SPSS相关分析及应用 [J]. 电脑知识与技术, 2019, 15(20): 301-302.
- [13] 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): 70-82.
- [14] VENABLES W N, DICHMONT C M. GLMs, GAMs and GLMMs: an overview of theory for applications in fisheries research[J]. Fish Res, 2004, 70(2/3): 319-337.
- [15] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征——半变异函数 [J]. 地理学报, 2000, 55(4): 428-438.
- [16] 朱耿平, 刘强, 高玉葆. 提高生态位模型转移能力来模拟入侵物种的潜在分布 [J]. 生物多样性, 2014, 22(2): 223-230.
- [17] YANG X Q, KUSHWAHA S, SARAN S, et al. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills[J]. Ecol Eng, 2013, 51: 83-87.
- [18] CHEN I C, LEE P F, TZENG W N. Distribution of albacore (*Thunnus alalunga*) in the Indian Ocean and its relation to environmental factors[J]. Fish Oceanogr, 2005, 14(1): 71-80.
- [19] LAN K W, KAWAMURA H, LEE M A, et al. Relationship between albacore (*Thunnus alalunga*) fishing grounds in the Indian Ocean and the thermal environment revealed by cloud-free microwave sea surface temperature[J]. Fish Res, 2012, 113(1): 1-7.
- [20] 储宇航, 戴小杰, 田思泉, 等. 南太平洋延绳钓长鳍金枪鱼生物学组成及其与栖息环境关系 [J]. 海洋渔业, 2016, 38(2): 130-139.
- [21] 樊伟, 张晶, 周为峰. 南太平洋长鳍金枪鱼延绳钓渔场与海水表层温度的关系分析 [J]. 大连水产学院学报, 2007, 22(5): 366-371.
- [22] 郭刚刚, 张胜茂, 樊伟, 等. 南太平洋长鳍金枪鱼垂直活动水层空间分析 [J]. 南方水产科学, 2016, 12(5): 123-130.
- [23] HOYLE S, LANGLEY A, HAMPTON J. Stock assessment of albacore tuna in the south Pacific Ocean (WCPFC-SC4-2008/SA-WP-8)[R]. Port Moresby, Papua New Guinea: The Pacific Community (SPC), 2008: 7.
- [24] WILLIAMS A J, ALLAIN V, NICOL S J, et al. Vertical behavior and diet of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) vary with latitude in the South Pacific Ocean[J]. Deep-Sea Res II, 2015, 113:

- 154-169.
- [25] 范永超, 戴小杰, 朱江峰, 等. 南太平洋长鳍金枪鱼延绳钓渔业 CPUE 标准化 [J]. 海洋湖沼通报, 2017(1): 122-132.
- [26] 蒋汉凌. 南太平洋长鳍金枪鱼渔场与环境因素关系的研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2014: 29.
- [27] 宋婷婷, 樊伟, 伍玉梅. 卫星遥感海面高度数据在渔场分析中的应用综述 [J]. 海洋通报, 2013, 32(4): 474-480.
- [28] 杨晓明, 王学昉, 田思泉, 等. 赤道太平洋中部围网自由群的空间点模式的影响因子 [J]. 水产学报, 2018, 42(8): 1220-1228.
- [29] SAGARMINAGA Y, ARRIZABALAGA H. Relationship of Northeast Atlantic albacore juveniles with surface thermal and chlorophyll-a fronts[J]. Deep-Sea Res II, 2014, 107: 54-63.
- [30] 赖诗涵. 中西太平洋鲔延绳钓黄鳍鲔潜在栖地分布与预测模式建置之研究 [D]. 基隆: 国立台湾海洋大学, 2018: 18.
- [31] BAKUN A, BLACK B A, BOGRAD S J, et al. Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems[J]. Curr Clim Change Rep, 2015, 1(2): 85-93.
- [32] 陈芃, 陈新军, 雷林. 秘鲁上升流对秘鲁鳀渔场的影响 [J]. 水产学报, 2018, 36(9): 1367-1377.