

马绍尔群岛海域大青鲨栖息地综合指数

宋利明^{1,2*}, 胡振新²

(1. 上海海洋大学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;

2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 通过2006年10月—2007年6月在马绍尔群岛海域利用金枪鱼延绳钓调查所取得的43个站点的大青鲨兼捕数据, 以及测得的温度、盐度、溶解氧浓度等环境数据, 应用分位数回归的方法分析各水层(40~280 m, 每40 m为一层)中各环境因子与大青鲨渔获率的关系, 建立“栖息地综合指数(integrated habitat index, *IHI*)模型”, 用来预测其空间分布, 并利用另外的18个站点的数据对模型进行验证。结果表明, (1)模型的预测能力良好; (2)不同的水层影响大青鲨分布的环境因子不同; (3)大青鲨较适宜的栖息水层为80~120 m; (4)大青鲨*IHI*较高的海域有两个, 分别为9°N~12°N, 172°E~176°E与3°N~6°N, 166°E~169°E。建议对大青鲨*IHI*较高的两海域采取规定延绳钓的作业深度为120 m以深等管理措施。

关键词: 大青鲨; 栖息地综合指数; 分位数回归; 马绍尔群岛

中图分类号: Q 958.2; S 937.3

文献标志码: A

鲨鱼位于海洋食物链的顶端, 是海洋生态系统的重要组成部分, 对于海洋生态系统的稳定和多样性起着极其重要的作用^[1]。对鲨鱼类栖息环境的研究有利于保护鲨鱼、减少其误捕。国内外学者对于大青鲨(*Prionace glauca*)的生物学特性^[2-7]、资源状况^[8-12]、行为特性^[13-15]、栖息环境^[16-17]、分布^[3-12]以及减少鲨鱼兼捕的方法^[18-22]等进行了广泛的研究, 但对于大青鲨在温度、盐度和溶解氧浓度共同影响下栖息环境选择的研究还未见报道。本文通过2006年10月—2007年5月在马绍尔群岛专属经济区海上调查, 获取马绍尔群岛海域大青鲨的渔获数据以及温度、盐度和溶解氧浓度等环境数据, 应用分位数回归的方法^[23-28]研究马绍尔群岛海域大青鲨在多因子共同作用下的栖息地选择, 建立栖息地综合指数(*IHI*)模型, 利用相同水域的实测数据对模型进行验证。本研究结果可为马绍尔群岛海域大青鲨的资源保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

调查船 调查船为大滚筒金枪鱼延绳钓渔船“深联成719号”, 船舶的主要参数如下: 总长32.28 m; 型宽5.70 m; 型深2.60 m; 总吨97.00 t, 净吨34.00 t; 主机功率220.00 kW。

调查时间和调查海域 调查时间为2006年10月27日~2007年5月29日。有效调查站点共61个, 调查海域为2°59'N~12°30'N, 164°05'E~177°01'E, 其中43个站点的数据用来建立大青鲨栖息地综合指数模型, 剩下18个站点的数据用来验证模型(图1)。调查中, 主捕大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*), 大青鲨为兼捕渔获物。

调查渔具和渔法 本次调查使用的钓具分传统钓具、试验钓具和防止海龟误捕钓具。各种钓具的结构、作业示意图见文献[29]。防止海龟误捕钓具仅把船上原来所用的环型钓钩换成能减少海龟误捕的圆型钓钩。以下分析过

收稿日期: 2011-03-27 修回日期: 2011-05-16

资助项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2007AA092202); 农业部远洋渔业探捕项目资助(D8006090066); 深圳市联成远洋渔业有限公司资助(D8006050026); 上海市重点学科建设项目资助(S30702)

通讯作者: 宋利明, E-mail: lmsong@shou.edu.cn

程中由于分析的是大青鲨的栖息环境,因此,把试验钓具、防止海龟误捕钓具和传统钓具的钓

钩数和钓获的大青鲨尾数综合在一起分析。调查渔法参考文献[29]。

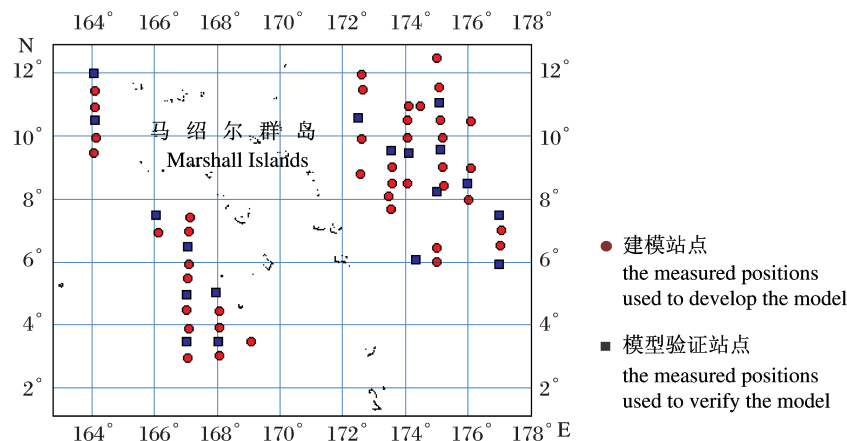


图1 调查站点

Fig.1 Survey sites

调查方法和内容 对设定的调查站点进行调查,记录作业参数、大青鲨钓获尾数、钓获大青鲨的钓钩编号,用RBR公司的XR-620多功能水质仪测定0~450 m的温度、盐度和溶解氧浓度,用TDR2050测定了部分钓钩在海水中的实际深度及其变化。

1.2 数据处理方法

钓钩深度计算方法 由于本研究所用的渔具作业数据与文献[29]的相同,直接引用文献[29]的钓钩深度计算公式:

$$D_{fk} = (V_g^{-0.218} \times k^{-0.107} \times V_w^{-0.251} \times 10^{-0.113}) \times D_k \quad (1)$$

$$D'_{fk} = (V_g^{-0.196} \times k^{-0.135} \times V_w^{-0.208} \times 10^{-0.110}) \times D'_k \quad (2)$$

式中, D_{fk} 和 D'_{fk} 分别为传统渔具和试验渔具的钓钩深度(m),其中 V_g 为钓具漂流速度(m/s)、 k 为两浮子间钓钩的编号、 V_w 为风速(m/s)、 D_k 、 D'_k 分别为传统渔具和试验渔具 k 号钓钩的理论深度(m)。

每个站点大青鲨的渔获率 $CPUE_i$ 每个站点大青鲨的渔获率 $CPUE_i$ 的计算方法^[27-33]如下:

$$CPUE_i = \frac{N_i}{f_i} \times 1000 \quad (3)$$

式中, N_i 为 i 站位钓获的大青鲨尾数, f_i 为 i 站位投放的钓钩数量, $i=1,2,3,\dots,61$ 。

不同站位、不同水层的渔获率 $CPUE_{ij}$ 根据调查数据,水深为40~280 m,每40 m为一层,共分为6层,即40~80、80~120、120~160、160~200、200~240和240~280 m。不同站位、不同水层的渔获率 $CPUE_{ij}$ ^[27-33]定义为

$$CPUE_{ij} = \frac{N_{ij}}{H_{Tij}} \times 1000 \quad (4)$$

式中, N_{ij} 为第 i 站位、第 j 水层钓获的大青鲨尾数, H_{Tij} 为在第 i 站位、第 j 水层投放的钓钩数,具体计算方法见文献[27-33]。其中, $i=1,2,3,\dots,61$,在钓获的285尾大青鲨中,记录钓获时钩号(深度)的大青鲨为252尾(取样覆盖率为88%)。

不同水层的渔获率 $CPUE_j$ 不同水层的渔获率 $CPUE_j$ ^[27-33]定义为

$$CPUE_j = \frac{N_j}{f_j} \times 1000 \quad (5)$$

式中, N_j 为第 j 水层钓获的大青鲨尾数, f_j 为 j 水层中的钓钩数。

基于各水层渔获率为权重的环境因子值的计算 环境因子包括温度、盐度、溶解氧浓度。基于各水层渔获率为权重的环境因子值计算公式^[26-28]为

$$F_i = \frac{\sum (CPUE_j F_{ij})}{\sum CPUE_j} \quad (6)$$

式中, F_i 为第 i 站位的环境因子(T_i 、 S_i 、 DO_i)值, $CPUE_j$ 表示第 j 水层大青鲨的渔获率, F_{ij} 表示第 i 站位 j 水层的环境因子值(T_{ij} 、 S_{ij} 、 DO_{ij} ,为XR-620测得的该水层内温度、盐度、溶解氧浓度的算术平均值)。

温跃层参数的计算 根据温跃层强度标准^[34],确定温跃层的上界深度 D_{ui} 、下界深度 D_{li} 、温跃层上界温度(T_{ui})、温跃层下界温度(T_{li})、温跃层强度(I_{thmi})、温跃层厚度(TH_{thmi})、温跃层温差(DIF_{thmi})^[34]。

分位数回归模型的建立 分位数回归模型最早由 KOENKE 等^[35]提出,模型建立的具体方法见文献[26-28]。本文采用美国地理调查局中陆生态科学研究中心(Midcontinent Ecological Science Center, U. S. Geological Survey)开发的 Blossom 统计学软件^[36]进行分位数回归。

不同水层栖息地综合指数(IHI_{ij}) 根据不同站位、不同水层的渔获率 $CPUE_{ij}$ 与该水层内温度 T_{ij} 、盐度 S_{ij} 和溶解氧浓度 DO_{ij} 的最佳模型方程,即 \hat{CPUE}_{ij} , 利用其计算 IHI_{ij} 指数。

应用分位数回归得出不同站位、不同水层渔获率($CPUE_{ij}$)与该水层温度 T_{ij} 、盐度 S_{ij} 和溶解氧浓度 DO_{ij} 之间回归方程的一般形式为:

$$CPUE_{ij} = C_j + a_j T_{ij} + b_j S_{ij} + c_j DO_{ij} + d_j TS_{ij} + e_j TDO_{ij} + f_j SDO_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (7)$$

式中, C_j 为常数项,参数 TS_{ij} 、 TDO_{ij} 和 SDO_{ij} 分别指温度和盐度、温度和溶解氧浓度及盐度和溶解氧浓度之间的交互作用项, ε_{ij} 为误差项。

$$IHI_{ij} = \frac{CPUE_{ij}}{CPUE_{ij}^{\max}} \quad (8)$$

式中, $CPUE_{ij}^{\max}$ 指各个水层的 $CPUE_{ij}$ 中的最大值。

整个水体栖息地综合指数(\overline{IHI}_i) 大青鲨整个水体的渔获率($CPUE_i$)与对应站点的加权平均温度 T_i 、盐度 S_i 和溶解氧浓度 DO_i 及其交互项 TS_i 、 TDO_i 、 SDO_i 、温跃层上界深度(D_{ui})、温跃层下界深度(D_{li})、温跃层上界温度(T_{ui})、温跃层下界温度(T_{li})、温跃层强度(I_{thmi})、温跃层厚度(TH_{thmi})、温跃层温差(DIF_{thmi}),共 13 个变量,建立模型,最后用 \hat{CPUE}_i 计算 \overline{IHI}_i 指数。分位数回归方程的一般形式为:

$$CPUE_i = C + C_1 T_i + C_2 S_i + C_3 DO_i + C_4 TS_i + C_5 TDO_i + C_6 SDO_i + C_7 D_{ui} + C_8 D_{li} + C_9 T_{ui} + C_{10} T_{li} + C_{11} I_{thmi} + C_{12} TH_{thmi} + C_{13} DIF_{thmi} + \varepsilon_i \quad (9)$$

式中, C 为常数项, C_1, C_2, \dots, C_{13} 为各项系数, ε_i 为误差项。

\overline{IHI}_i 指数计算公式如下:

$$\overline{IHI}_i = \frac{CPUE_i}{CPUE_i^{\max}} \quad (10)$$

式中, $CPUE_i^{\max}$ 指整个水体的 $CPUE_i$ 中的最大值。

IHI 分布图的表达 根据上述的 IHI 估计值,利用 Marine explore 4.0 软件(日本环境模拟实验有限公司)画出 IHI 等值线分布图。

IHI 模型的预测能力及验证 将用于建模的 43 个站点相应的环境变量代入模型,得出各个水层以及整个水体的 IHI 预测值并分别计算其与实测大青鲨 $CPUE$ 间的泊松相关系数,判断模型的预测能力。不同水层预测 IHI 的算术平均值 IHI_j 与对应各水层的实测大青鲨 $CPUE_j$ 进行比较并计算其泊松相关系数来判断模型的预测能力^[27-28]。应用成对双样本均值分析 t -检验的方法分别计算用于模型验证的 18 个站点的预测 $CPUE$ 与实测 $CPUE$ (包括各个水层的 $CPUE_{ij}$ 与整个水体的 $CPUE_i$) 的泊松相关系数并进行差异性显著性检验来判断 IHI 模型的可靠性^[27-28]。

2 结果

2.1 不同水层 IHI_{ij} 指数及其分布

应用分位数回归最终得出不同水层的渔获率回归方程,具体每个水层的各个参数值见表 1。对于 200~240 m 水层,因为温度与溶解氧浓度的交互项的 P 值为 0.010,小于 0.05,故建立模型时将温度、溶解氧浓度也包括进去。对于 240~280 m 水层,每个变量的 P 值均大于 0.05,不能得出渔获率与环境变量的关系模型。

由表 1 得,不同的水层影响大青鲨渔获率的关键环境因子互不相同。5 个水层内的大青鲨 IHI_{ij} 指数分布分别如图 2 所示。不同水层 IHI_{ij} 指数分布存在差异(0.26~0.90),其高指数区域及相应的指数见表 2,由表 2 得,80~120 m 水层大青鲨 IHI_{ij} 指数最高(0.50~0.90),160~200 m 为最低(0.26~0.35)。

2.2 整个水体的 \overline{IHI}_i 指数及其分布

应用分位数回归方法,最终得出整个水体的最佳上界分位数回归方程为

$$CPUE_i = 302.07 - 16.07T_i - 8.53S_i + 1.68DO_i + 0.46TS_i - 0.16DIF_{thmi} \quad (11)$$

从式(11)得出,模型中包含温度、盐度、溶解氧浓度和温度与盐度的交互项以及温跃层温差 5 个变量,这 5 个变量的 P 值依次为 0.031、0.042、0.015、0.043 和 0.022。 $Q=0.90$ 时的分位数回归模型是解释渔获率与环境变量之间关系的最佳模型。

表 1 最佳模拟方程的参数估计
Tab.1 Estimation parameters of optimal predicting equation

水层 strata	40 ~ 80 m	80 ~ 120 m	120 ~ 160 m	160 ~ 200 m	200 ~ 240 m					
分位数 θ quantile	0.70	0.90	0.85	0.80	0.80					
	估计值 estimates	P	估计值 estimates	P	估计值 estimates	P	估计值 estimates	P	估计值 estimates	P
C_j (constant)	31 752.76		-0.48		-5.98		38.79		56.36	
$a_j(T_{ij})$	-1 115.21	0.036	0		0		-3.01	0.014	-4.35*	
$b_j(S_{ij})$	-911.52	0.046	0		0		0		0	
$c_j(DO_{ij})$	0		4.39	0.042	4.36	0.019	-14.33	0.048	-24.53*	
$d_j(TS_{ij})$	32.02	0.037	0		0		0		0	
$e_j(TDO_{ij})$	0		0		0		1.26	0.002	2.02	0.010
$f_j(SDO_{ij})$	0		0		0		0		0	

注: * . 由于交互作用项 TDO 的 $P \leq 0.05$, 该变量也进入模型。

Notes: * This variable was included in the model because the P value of the interaction term in the model was less than or equal to 0.05.

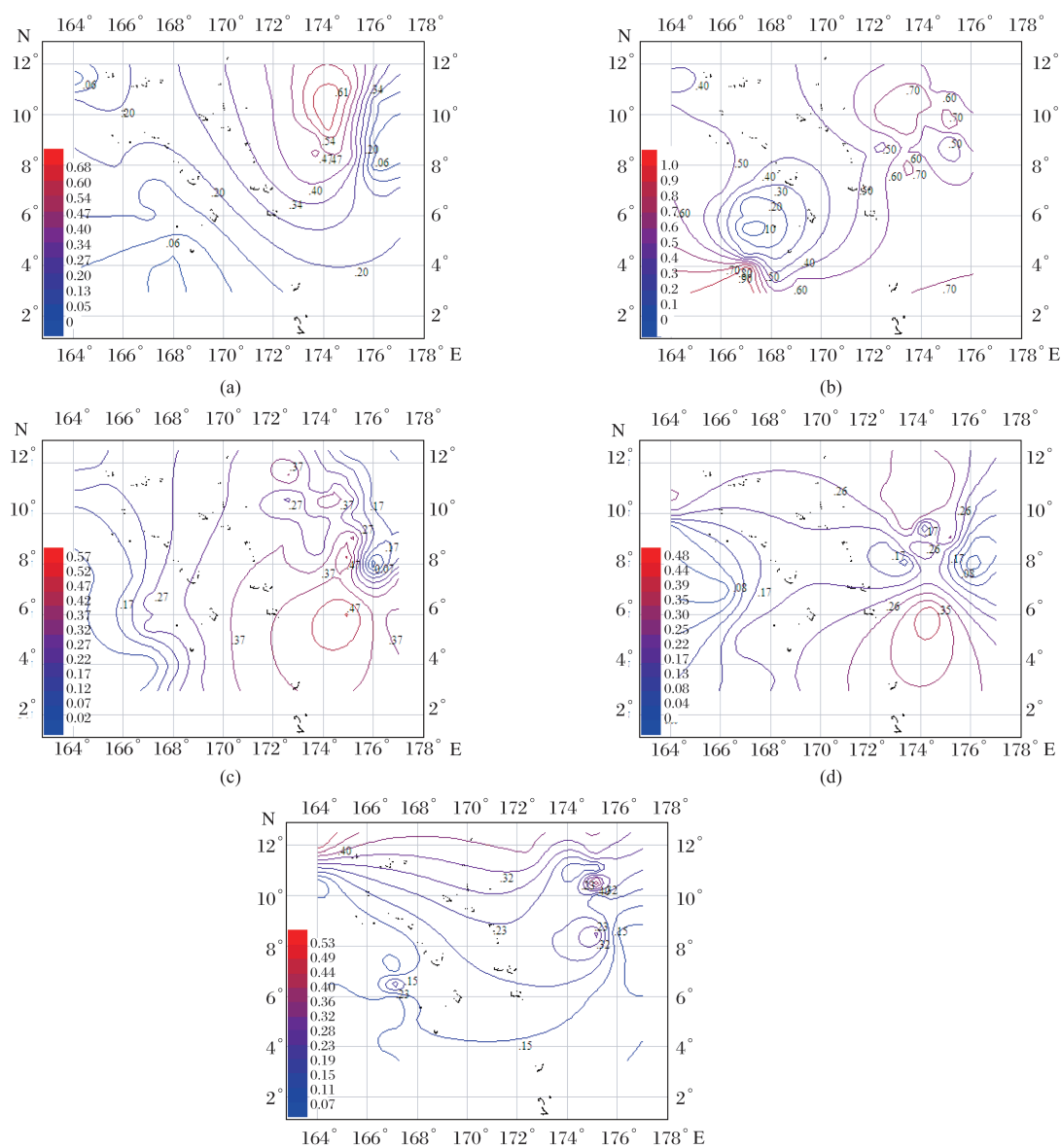


图 2 马绍尔群岛海域不同水层大青鲨 IHI_y 分布

Fig.2 Spatial distribution of blue shark IHI_y in Marshall Islands waters

(a) 40 ~ 80 m; (b) 80 ~ 120 m; (c) 120 ~ 160 m; (d) 160 ~ 200 m; (e) 200 ~ 240 m.

从马绍尔群岛海域大青鲨 \overline{IHI}_i 空间分布(图3)得出, \overline{IHI}_i 指数较高的海域有两个(表2),分别为马绍尔群岛海域的东北部和西南部。

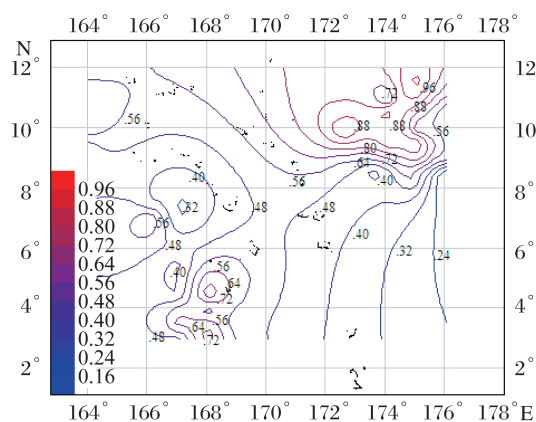


图3 马绍尔群岛海域大青鲨 \overline{IHI}_i 分布

Fig. 3 The distribution of blue shark \overline{IHI}_i in Marshall Islands waters

表2 相对较高的 \overline{IHI}_{ij} , \overline{IHI}_i 的海区范围及其对应的 \overline{IHI} 值

水层/m strata	相对较高的 \overline{IHI} 海区范围 area boundary with the relatively greater \overline{IHI}	\overline{IHI} 值 \overline{IHI} value
\overline{IHI}_{ij}		
40 ~ 80	8°N-12°N, 173°E-175°E	0.47 ~ 0.61
80 ~ 120	7°N ~ 12°N, 170°E ~ 176°E	0.50 ~ 0.70
120 ~ 160	3°N ~ 4°N, 164°E ~ 168°E	0.50 ~ 0.90
160 ~ 200	3°N ~ 8°N, 170°E ~ 177°E	0.37 ~ 0.47
200 ~ 240	3°N ~ 7°N, 171°E ~ 176°E	0.26 ~ 0.35
\overline{IHI}_i		
	9°N ~ 12°N, 172°E ~ 176°E	0.72 ~ 0.96
	3°N ~ 6°N, 166°E ~ 169°E	0.48 ~ 0.72

表3 各水层预测的 \overline{IHI} 指数与实测 $CPUE$ 间的泊松相关系数及预测能力

水层/m strata	泊松相关系数 poisson correlation coefficients	预测能力 predictive power
40 ~ 80	0.61	良 good
80 ~ 120	0.71	优 excellent
120 ~ 160	0.60	良 good
160 ~ 200	0.55	良 good
200 ~ 240	0.47	中 medium
整个水体 entire water column	0.75	优 excellent

2.3 \overline{IHI} 模型的预测能力

将用于建模的43个站点相应的环境变量代入模型,得出各个水层以及整个水体的 \overline{IHI} 预测值并分别计算其与实测大青鲨 $CPUE$ 的泊松相关系数,认为泊松相关系数小于0.400、0.400~0.499、0.500~0.699和大于0.700时相应的模型的预测能力分别为差、中、良和优^[27-28],各水层以及整个水体的 \overline{IHI} 预测指数与实测 $CPUE$ 间的泊松相关系数及预测能力分别见表3,各水层中预测能力最佳的为80~120 m水层,达到优。不同水层预测 \overline{IHI}_j 的算术平均值与对应各水层的实测大青鲨 $CPUE_j$ 的比较见图4,它们之间的泊松相关系数达到0.94。

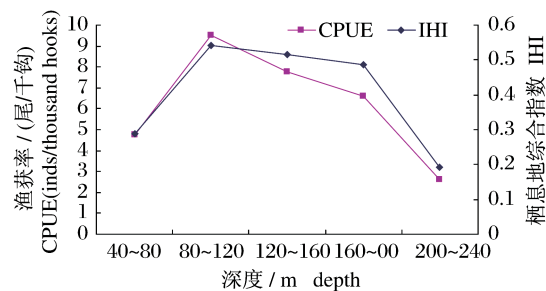


图4 各水层预测 \overline{IHI} 均值与对应各水层的实测大青鲨 $CPUE$ 的比较

Fig. 4 The comparison of arithmetic average predicting \overline{IHI} with the observed $CPUE$ of blue shark

2.4 \overline{IHI} 模型的验证

应用成对双样本均值分析 t -检验的方法分别计算用于模型验证的18个站点的预测 $CPUE$ 与实测 $CPUE$ (包括各个水层的 $CPUE_{ij}$ 与整个水体的 $CPUE_i$)的 P 值,分析其差异显著性,具体结果见表4,大部分水层(200~240 m除外)和整个水体的预测 $CPUE$ 与实测 $CPUE$ 无显著性差异($P > 0.05$)。

表4 各水层、整个水体预测与实测 $CPUE$ 间成对双样本均值分析 t -检验结果

水层/m strata	P
40 ~ 80	0.235 4
80 ~ 120	0.317 2
120 ~ 160	0.285 5
160 ~ 200	0.138 7
200 ~ 240	0.046 7
整个水体 entire water column	0.252 7

3 讨论

3.1 个别水层无法得出预测模型、个别模型预测能力较差的原因

对于 240 ~ 280 m 水层,通过分位数回归无法得出预测模型,对于 200 ~ 240 m 水层,模型的预测能力相对较低(中等,表 2)。原因可能有以下 3 方面:(1) 没有将影响该水层大青鲨分布的主要环境变量包括在模型中进行回归,未能得出主要影响因子;(2) 水深较深时,大青鲨分布在该水层内的概率较低或这两个水层不是大青鲨适宜的栖息水层,导致大青鲨的渔获尾数较少,可能存在渔获物取样误差;(3) 用于建模的站点偏少。

3.2 *IHI* 模型预测能力的评价

总体上 *IHI* 模型的预测能力良好。由图 4 得,对于各水层预测 *IHI* 指数的算术平均值与对应各水层实测大青鲨 *CPUE* 的算术平均值的泊松相关系数为 0.94,并且各水层的变化趋势基本一致。在 80 ~ 120 m 的实测 *CPUE* 算术平均值、*IHI* 预测指数最高,表明大青鲨较为适宜的栖息水层为 80 ~ 120 m(基本上在 12 ~ 28 °C 的温跃层内)^[29]。在热带海域,根据延绳钓渔业数据分析得出大青鲨较为适宜的水温范围为 12 ~ 25 °C^[1,37],这一研究结果基本上与本实验 *IHI* 模型的预测结果一致,说明 *IHI* 模型的预测能力良好。由表 3 得,除了 200 ~ 240 m 水层以外,其它各个水层预测 *IHI* 与实测 *CPUE* 相关系数都在 0.5 以上,预测能力良好;对于马绍尔群岛海域整个水体,预测 *IHI* 与实测 *CPUE* 泊松相关系数达到 0.75,为优。由图 2(b)与图 3 可得出 80 ~ 120 m 水层所反映的高 *IHI* 区与整个水体反映的高 *IHI* 区比较接近,即今后可利用 80 ~ 120 m 水层的 *IHI* 来表达整个水体的 *IHI*。

3.3 *IHI* 模型的有效性

IHI 模型可用来预测相应水层的大青鲨的渔获率。将用于模型验证的 18 个站点相应的环境变量代入模型,得出各水层和整个水体的大青鲨预测 *CPUE*,大部分水层大青鲨预测 *CPUE* 与实测 *CPUE* 无显著性差异($P > 0.05$),但 200 ~ 240 m 水层除外($P = 0.0467$)(表 4)。这可能是 200 ~ 240 m 水层的 *IHI* 模型的预测能力为中等,使得该水层的预测结果存在不确定性。对于马绍尔群岛水域整个水体的大青鲨预测 *CPUE* 与实测

CPUE 也无显著性差异($P = 0.2527$),泊松相关系数为 0.71,预测值与实际结果较接近。综上分析,*IHI* 模型基本上可用来预测不同水层(特别是 40 ~ 200 m 的各水层)和整个水体的大青鲨的渔获率和 *IHI*。

3.4 空间分布的决定性环境因子

不同水层决定大青鲨分布的环境因子不同(表 1 和式 11)。这可能是由于大青鲨特定的生物学特性、不同的生态因素和处于不同的生理时期造成的。如,大青鲨食性广泛、依靠嗅觉来发现饵料生物,不同的饵料生物具有不同的环境偏好和垂直洄游模式,为了捕食不同的饵料生物其不得不作上下垂直洄游和水平洄游^[14];不同性别的大青鲨在不同的生理时期具有不同的分布和洄游方式^[12]。FRY 等^[38]研究得出温度不但影响鱼类的新陈代谢而且影响其反应速率,是鱼类分布的重要影响因子。大青鲨的体温、肌肉温度与周围水温之间的热力关系也是其作上下垂直洄游的原因,而表温与大青鲨垂直洄游的关系不大^[14]。SONG 等^[31]认为鱼类被捕获的深度是所有环境变量综合作用的结果。因此,建议在大青鲨 *CPUE* 的标准化研究模型中包括加权平均水温和渔具作业深度参数。

3.5 减少大青鲨误捕的措施

对于马绍尔群岛海域大青鲨 *IHI* 较高的两个海域,即,9°N ~ 12°N,172°E ~ 176°E 与 3°N ~ 6°N,166°E ~ 169°E,建议规定延绳钓的作业深度为 120 m 以深,以减少大青鲨的误捕、保护生态系统的稳定和生物多样性。

3.6 展望

本研究中用到马绍尔群岛海域 43 个站点的温度、盐度和溶解氧浓度 3 个环境变量以及它们的交互项来构建不同水层的大青鲨栖息地指数,构建整个水体大青鲨栖息地综合指数时加上了温跃层参数。由于收集到的数据类型的限制,有些变量,例如浮游生物量、叶绿素浓度、大青鲨饵料种类分布和海流可能会影响大青鲨的空间分布,本次研究中没有考虑,对结果的可靠性造成一定影响,在今后的研究中应当考虑这些变量。由于在 168°E ~ 173°E 这一群岛区域渔船考虑到渔具在海中漂流,安全性得不到保障和当地政府的管理规定,未能在该区域调查,调查结果的精度可能会受到影响,本研究的目的是为了大青鲨资源,因此该海域数据的缺失不影响本研究的目的。

本研究用于建模的数据为一艘渔船的调查数据,并缺乏同步性,可能会影响模型预测的精度,今后应尽可能增加调查渔船的数量,提高调查的同步性,进一步扩大调查的范围、水深和时间,以便更好地了解大青鲨的栖息地选择。

本研究得到马绍尔群岛共和国政府的许可,并得到深圳市联成远洋渔业有限公司周新东董事长、李和协总经理、吕志良先生、陈清白先生、马绍尔基地经理杨良滨先生、朱永利工程师、张自永先生、“深联成719”船长及全体船员和硕士研究生张禹等的大力支持,谨致谢忱。

参考文献:

- [1] 戴小杰. 东太平洋主要几种中上层鲨鱼生物学和生态学研究[D]. 上海:华东师范大学,2004.
- [2] PRATT J H. Reproduction in the blue shark, *Prionace glauca*[J]. Fishery Bulletin, 1979, 77(2): 445-470.
- [3] CASTRO J, MEJUTO J. Reproductive parameters of blue shark, *Prionace glauca*, and other sharks in the Gulf of Guinea [J]. Marine and Freshwater Research, 1995, 46(6): 967-974.
- [4] NAKANO H. Age, reproduction and migration of blue shark in the North Pacific Ocean[J]. Bulletin of National Research Institute of Far Seas Fisheries, 1994, 31(1): 141-256.
- [5] SKOMAL G, NATANSON L. Age and growth of the blue shark (*Prionace glauca*) in the North Atlantic Ocean [J]. Fishery Bulletin, 2003, 101(3): 627-639.
- [6] LESSA R, SANTANA F M, HAZIN F H. Age and growth of the blue shark *Prionace glauca*(Linnaeus, 1758) off northeastern Brazil[J]. Fisheries Research, 2004, 66(1): 19-30.
- [7] MANCINI P, CASAS A, AMORIM A. Morphological abnormalities in a blue shark *Prionace glauca*(Chondrichthyes: Carcharhinidae) foetus from southern Brazil[J]. Journal of Fish Biology, 2006, 69(6): 1881-1884.
- [8] VAS P. The abundance of the blue shark, *Prionace glauca*, in the western English Channel [J]. Environmental Biology of Fishes, 1990, 29(3): 209-225.
- [9] HAZIN F, BOECKMAN C E, LEAL E C, *et al.* Distribution and relative abundance of the blue shark, *Prionace glauca*, in the southwestern equatorial Atlantic Ocean [J]. Fishery Bulletin, 1994, 92(2): 474-480.
- [10] BAUM J, MYERS R. Shifting baselines and the decline of pelagic sharks in the Gulf of Mexico [J]. Ecology Letters, 2004, 7(2): 135-145.
- [11] KLEIBER P, CLARKE S, BIGELOW K, *et al.* North Pacific blue shark stock assessment [R]. NOAA Technical Memorandum NMFS-PIFSC-17, 2009: 1-83.
- [12] MONTEALEGRE-QUIJANO S, VOOREN C M. Distribution and abundance of the life stages of the blue shark *Prionace glauca* in the Southwest Atlantic [J]. Fisheries Research, 2010, 101(3): 168-179.
- [13] SCIARROTTA T, NELSON D. Diel behavior of the blue shark, *Prionace glauca*, near Santa Catalina Island, California [J]. Fishery Bulletin, 1977, 75(3): 519-528.
- [14] CAREY F G, SCHAROLD J V. Movements of blue sharks (*Prionace glauca*) in depth and course [J]. Marine Biology, 1990, 106(3): 329-342.
- [15] STEVENS J, BRADFORD R, WEST G. Satellite tagging of blue sharks (*Prionace glauca*) and other pelagic sharks off eastern Australia: depth behaviour, temperature experience and movements [J]. Marine Biology, 2010, 157(3): 575-591.
- [16] SIMPFENDORFER C, HUETER R, BERGMAN U, *et al.* Results of a fishery-independent survey for pelagic sharks in the western North Atlantic 1977-1994 [J]. Fisheries Research, 2002, 55(1-3): 175-192.
- [17] BIGELOW K, BOGGS C, HE X. Environmental effects on swordfish and blue shark catch rates in the US North Pacific longline fishery [J]. Fisheries Oceanography, 1999, 8(3): 178-198.
- [18] WATSON J, EPPERLY S, SHAH A, *et al.* Fishing methods to reduce sea turtle mortality associated with pelagic longlines [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2005, 62(5): 965-981.
- [19] YOKOTA K, KIYOTA M, MINAMI H. Shark catch in a pelagic longline fishery: comparison of circle and tuna hooks [J]. Fisheries Research, 2006, 81(2-3): 337-341.
- [20] WARD P, HINDMARSH S. An overview of historical changes in the fishing gear and practices of pelagic longliners, with particular reference to Japan's Pacific fleet [J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2007, 17(4): 501-516.

- [21] GILMAN E, CLARKE S, BROTHERS N, *et al.* Shark interactions in pelagic longline fisheries [J]. *Marine Policy*, 2008, 32(1): 1-18.
- [22] WARD P, LAWRENCE E, DARBYSHIRE R, *et al.* Large-scale experiment shows that nylon leaders reduce shark bycatch and benefit pelagic longline fishers [J]. *Fisheries Research*, 2008, 90(1-3): 100-108.
- [23] EASTWOOD P D, MEADEN G J, CARPENTIER A, *et al.* Estimating limits to the spatial extent and suitability of sole (*Solea solea*) nursery grounds in the Dover Strait [J]. *Journal of Sea Research*, 2003, 50(2-3): 151-165.
- [24] 王家樵. 基于分位数回归的印度洋大眼金枪鱼栖息地适应性指数模型研究 [D]. 上海: 上海水产大学, 2006.
- [25] 冯波, 陈新军, 许柳雄. 应用栖息地指数对印度洋大眼金枪鱼分布模式研究 [J]. *水产学报*, 2007, 31(6): 805-812.
- [26] 宋利明, 高攀峰, 周应祺, 等. 基于分位数回归的大西洋中部公海大眼金枪鱼栖息环境综合指数 [J]. *水产学报*, 2007, 31(6): 798-804.
- [27] SONG L M, ZHOU Y Q. Developing an integrated habitat index for bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Indian Ocean based on longline fisheries data [J]. *Fisheries Research*, 2010, 105(2): 63-74.
- [28] 武亚苹, 宋利明. 印度洋黄鳍金枪鱼“栖息地综合指数” [J]. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(增): 65-72.
- [29] CAO D M, SONG L M, ZHANG Y, *et al.* Environmental preferences of *Alopias superciliosus*, and *Alopias vulpinus* in waters near Marshall Islands [J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 2011, 45(1): 103-119.
- [30] SONG L M, ZHANG Y, XU L X, *et al.* Environmental preferences of longlining for yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the tropical high seas of the Indian Ocean [J]. *Fisheries Oceanography*, 2008, 17(4): 239-253.
- [31] SONG L M, ZHOU J, ZHOU Y Q, *et al.* Environmental preferences of bigeye tuna, *Thunnus obesus*, in the Indian Ocean: an application to a longline fishery [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2009, 85(2): 153-171.
- [32] 宋利明, 李玉伟, 高攀峰. 帕劳群岛附近海域延绳钓渔场大眼金枪鱼 (*Thunnus obesus*) 的环境偏好 [J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(6): 768-776.
- [33] 宋利明, 吕凯凯, 胡振新, 等. 吉尔伯特群岛海域延绳钓渔场大眼金枪鱼的环境偏好 [J]. *海洋渔业*, 2010, 32(4): 374-382.
- [34] 国家海洋局编. 海洋调查规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [35] KOENKER R, BASSETT G. Regression quantiles [J]. *Econometrica*, 1978, 46(1): 43-61.
- [36] CADE B S, RICHARDS J D. User manual for BLOSSOM statistical software [M]. Colorado: Midcontinent Ecological Science Center U. S. Geological Survey, 2001: 1-106.
- [37] GUBANOV Y, GRIGOR' YEV V. Observations on the distribution and biology of the blue shark *Prionace glauca* (Carcharhinidae) of the Indian Ocean [J]. *Journal Ichthyologic*, 1975, 15(1): 37-43.
- [38] FRY F E J. The effect of environmental factors on the physiology of fish [M] // Hoar W S, Randall D J. *Fish Physiology*, New York: Academic Press, 1971: 1-98.

Developing an integrated habitat index for blue shark (*Prionace glauca*) in waters near Marshall Islands

SONG Li-ming^{1,2*}, HU Zhen-xin²

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

2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: This study is based on a survey carried out by the longliner “Shengliancheng 719” in waters near Marshall Islands from Oct, 2006 to May, 2007. Based on the survey data collected by “Shengliancheng 719” at 43 sampling stations, the vertical profile data of temperature, salinity, dissolved oxygen concentration and the catch rate data of blue shark were applied to develop the “Integrated Habitat Index (IHI)” models by the quantile regression method. Models were developed for six water strata from 40 m to 280 m (40 m each) and the entire water column to understand the blue shark’s spatial distribution. Models were developed with the consideration of interactions among environmental variables. IHI model of the entire water column was developed using the weighted average temperature, salinity, dissolved oxygen concentration and the thermocline parameters, such as, upper-limit depth, lower-limit depth, upper-limit temperature, lower-limit temperature, intensity, thickness, temperature difference. Models of five water strata from 40 m to 240 m and the entire water column were reasonably developed. The measured environmental variables at 43 sampling stations were input into the IHI models to predict the IHI of five strata and the entire water column. The paired two sample *t*-test was used to calculate the Poisson correlation coefficients between predicted IHI and observed catch per unit effort (CPUE) of five strata and the entire water column. The Poisson correlation coefficients were assumed to indicate the predictive power of the IHI model. The trend line of the arithmetic average about the predicted IHI of five strata was compared with those of the catch rates in the specific depth stratum. The measured environmental variables at the other 18 sampling stations were used to validate the models’ predictive power. These data were input into the CPUE models to predict the CPUE of five strata and the entire water column. A comparison between the predicted and observed catch rates at five strata and the entire water column was conducted by a paired two sample *t*-test to validate the IHI models. The results showed: (1) the predicted CPUE had greater relevance to the observed CPUE, the models’ predictive power was good; (2) the key environmental parameters in the IHI models differed among the depth strata. This might be resulted from the blue shark’s specific biology characteristic, the different ecological factors, and the different life stages of blue shark; (3) the blue sharks’ IHI in the areas of 9°N – 12°N, 172°E – 176°E and 3°N – 5°N, 166°E – 169°E were relatively higher; (4) the optimal depth that blue shark inhabit was from 80 m to 120 m in the survey area. The high IHI area in 80 – 120 m stratum was similar to the high IHI area of the entire water column. It means we could use the IHI distribution in 80 – 120 m stratum to express the IHI distribution of the entire water column.

Key words: blue shark (*Prionace glauca*); integrated habitat index; quantile regression; Marshall Islands

Corresponding author: SONG Li-ming. E-mail: lmsong@shou.edu.cn