

doi: 10. 3969/j. issn. 2095 – 0780. 2016. 04. 007

基于海洋环境因子和不同权重系数的南海中沙西沙海域鳶乌贼渔场分析

范江涛, 陈作志, 张俊, 冯雪

(中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部南海渔业资源环境重点野外科学观测实验站, 广东 广州 510300)

摘要: 根据 2014 年“南锋”号调查船在南海中沙西沙海域的声学走航调查数据, 结合遥感获得的海表温度(SST)、叶绿素 a 浓度(CHL)、海面盐度(SSS)、海面高度(SSH)等海洋环境数据, 按不同季节不同因子分别建立栖息地适应性指数模型, 对不同因子赋予不同权重系数, 计算栖息地指数模型准确度, 以此来确定不同季节各因子的权重系数。结果表明, 各因子的最适值呈明显的季节变化, 春季 SST 的权重系数为 0.7, 其余因子权重系数为 0.1 时模型准确度最高; 夏季 CHL 的权重系数为 1, 其余因子权重系数为 0 时模型准确度最高; 秋季 CHL 权重系数为 0.7, 其余因子系数为 0.1 时模型准确度最高; 冬季 SST 权重系数为 1, 其余因子系数为 0 时模型准确度最高。研究认为, 鳶乌贼(*Sthenoteuthis oualaniensis*)渔场不同季节对不同因子的响应程度不同, 赋予各因子不同的权重系数可以有效提高模型准确率。

关键词: 鳶乌贼; 渔场; 环境因子; 栖息地指数模型; 南海中沙西沙海域

中图分类号: S 943 文献标志码: A 文章编号: 2095 – 0780 – (2016)04 – 0057 – 07

Sthenoteuthis oualaniensis fishing grounds analysis based on marine environmental factors and different weight coefficients in the Zhongxisha and Xisha Islands, South China Sea

FAN Jiangtao, CHEN Zuozhi, ZHANG Jun, FENG Xue

(Key Field Scientific Experimental Station of South China Sea Fishery Resource and Environment, Ministry of Agriculture; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Based on the survey data of “Nanfeng” fishery research vessel and the data of ocean environment from remote sensing (sea surface temperature, concentration of Chl-a, sea surface salinity and sea surface height), we established a habitat suitability index model (HSI) according to different factors in different seasons, and tested different factors with different weights and different accuracy of HSI models to determine the weight coefficients of different seasons. The results show that suitable values of environmental factors varied from season to season obviously. In spring, the weight coefficient of sea surface temperature was equal to 0.7 and the others were all equal to 0.1; in summer, the weight coefficient of Chl-a was equal to 1 and the others were all equal to 0; in autumn, the weight coefficient of Chl-a was equal to 0.7 and the others were all equal to 0.1; in winter, the weight coefficient of sea surface temperature was equal to 1 and the others were all equal to 0. The results suggest that the fishing grounds of *Sthenoteuthis oualaniensis* response differently to different environmental factors in different seasons, and the accuracy of HSI model can be improved when the factors are applied with different weight coefficients.

Key words: *Sthenoteuthis oualaniensis*; fishing grounds; environmental factors; habitat suitability index models; the Zhongsha and Xisha Islands of the South China Sea

收稿日期: 2016-03-17; 修回日期: 2016-05-13
资助项目: 农业部财政重大专项(NFZX2013); 国家科技支撑计划项目(2013BAD13B06); 农业部财政项目“南海海洋捕捞生产结构调查”(640)
作者简介: 范江涛(1987-), 男, 硕士, 助理研究员, 从事渔业资源和渔情预报研究。E-mail: tianxiahaiyin@163.com
通信作者: 陈作志(1978-), 男, 博士, 副研究员, 从事渔业资源和海洋生态学研究。E-mail: zzchen2000@163.com

鸢乌贼 (*Sthenoteuthis oualaniensis*) 属柔鱼科, 鸢乌贼属, 属于大洋性头足类, 广泛分布于热带亚热带海域^[1], 其中南海的资源量尤为丰富, 据评估南海鸢乌贼现存生物量高达 $(110 \sim 150) \times 10^4$ t, 年可捕量为 $(140 \sim 200) \times 10^4$ t^[2-4]。而目前中国鸢乌贼的开发利用非常有限, 资源开发潜力巨大。

鸢乌贼渔场的形成与海洋环境因子密切相关, 而栖息地指数模型能够很好地综合各种环境因子, 全面地分析渔场的形成机制。近年来国内外对鸢乌贼的研究逐渐增多, 但多集中于生物学^[5-7]、种群分布^[8-10]和种群结构^[11-13]等方面, 对鸢乌贼与海洋环境因子关系的研究也多见于 1~2 个因子^[14], 未能综合考虑多因子共同作用及各因子作用的大小。为此该研究通过 2014 年南锋专项渔业声学调查结果, 结合遥感数据, 并通过对不同环境因子赋予不同权重系数, 构建南海中沙西沙海域鸢乌贼栖息地指数模型, 分析影响渔场分布的因子与渔场形成的机制, 为开展南海鸢乌贼渔业渔情预报提供科学依据与理论基础。

1 材料与方法

1.1 数据来源

渔场数据来自南锋专项 2014 年春、夏、秋、冬 4 个季节调查的声学走航数据, 鸢乌贼虽有昼夜垂直移动的现象, 但其主要生活在 300 m 以浅的水层, 故而以 300 m 以浅水层的鸢乌贼生物量数据作为表征渔场好坏的指标^[15]。声学探测设备为 Simrad EK60, 探测 300 m 以上水层, 每 5 nmile 积分 1 次, 换能器频率为 38 kHz, 发射功率为 2 kW, 脉冲宽度 1 ms。走航范围见图 1。

环境数据来自美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的海洋环境遥感产品 (<http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/info/index.html>), 海洋环境因子包括海表温度 (sea surface temperature, SST)、叶绿素 a 浓度 (Chlorophyll-a concentration, CHL)、海表盐度 (sea surface salinity, SSS)、海面高度 (sea surface height, SSH) 数据, 均选取声学走航当天的数据。

1.2 数据处理方法

基于栖息地指数模型原理, 将生物量分别与 SST、CHL、SSS、SSH 建立适应性指数 (SI) 模型^[16]。假设每季度调查生物量 Y 最多的海域其栖

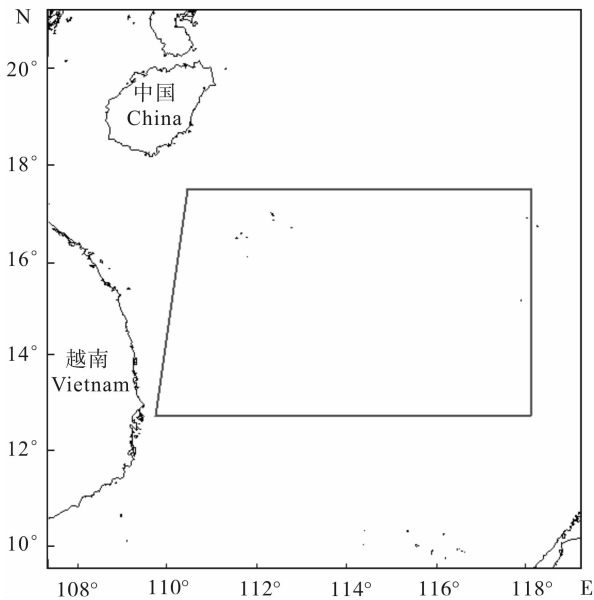


图 1 走航范围示意图
南海九段线参见彩色宣传页的调查区域图
Fig. 1 Schematic diagram of navigation range
For information about the nine-dash line of the South China Sea, see the survey area map on the colored leaflet.

息地指数为 1, 生物量为 0 时栖息地指数为 0, 各因子的栖息地指数模型计算公式为:

$$SI = \frac{Y}{Y_{\max}}$$

式中 SI 为该季度的适应性指数; Y_{\max} 为该季度调查的生物量最大值。

1.3 渔场因子权重系数

采用一元非线性回归^[17-18]建立各环境因子与栖息地适应性指数的关系, 将各单因子适应性模型赋予不同权重系数 $a^{[19]}$, 其余因子权重系数为 $(1 - a)/3$, 进而建立栖息地指数模型。

$$\begin{aligned} HSI &= a \times SI_{SST} + \frac{1-a}{3} \times SI_{CHL} + \frac{1-a}{3} \times SI_{SSS} + \frac{1-a}{3} \times SI_{SSH} \\ HSI &= a \times SI_{CHL} + \frac{1-a}{3} \times SI_{SST} + \frac{1-a}{3} \times SI_{SSS} + \frac{1-a}{3} \times SI_{SSH} \\ HSI &= a \times SI_{SSS} + \frac{1-a}{3} \times SI_{CHL} + \frac{1-a}{3} \times SI_{SST} + \frac{1-a}{3} \times SI_{SSH} \\ HSI &= a \times SI_{SSH} + \frac{1-a}{3} \times SI_{CHL} + \frac{1-a}{3} \times SI_{SSS} + \end{aligned}$$

$$\frac{1-a}{3} \times SI_{SST}$$

式中 a 分别取 0.25、0.5、0.6、0.7、1.0。取值大于 0.7 时，其余各因子系数均小于 0.1，对模型的贡献度极小，故可忽略。

将模型计算的栖息地指数值与实际值进行比较，两者之差小于等于 0.4，则认为模型准确。以

模型准确度来判断各因子权重系数的取值。

2 结果

2.1 单因子 SI 模型

对不同环境因子分季节分别建立 SI 适应性指数模型，结果如表 1，各模型 *P* 值均小于 0.01，各模型均准确。

表 1 各因子 SI 模型
Tab. 1 SI model of factors

季节 season	变量 variable	模型 model	<i>P</i>
春季 spring	SST-SI	$SI = 1 / (2\ 169.41 - 162.48 \times SST + 3.04SST^2)$	0.000 1
	CHL-SI	$SI = 1 / (76.78 - 1\ 258.66 \times CHL + 5\ 197.66 \times CHL^2)$	0.002 1
	SSH-SI	$SI = 1 / (453.1 - 845.28 \times SSH + 394.91 \times SSH^2)$	0.001 5
	SSS-SI	$SI = 1 / (309\ 094.40 - 18\ 702.97 \times SSS + 282.92 \times SSS^2)$	0.000 1
夏季 summer	SST-SI	$SI = 1 / (998.89 - 69.12 \times SST + 1.19 \times SST^2)$	0.000 1
	CHL-SI	$SI = 1 / (34.52 - 719.46 \times CGK + 3\ 857.76 \times CHL^2)$	0.000 1
	SSH-SI	$SI = 1 / (1\ 129.19 - 2\ 086.94 \times SSH + 964.84 \times SSH^2)$	0.000 1
	SSS-SI	$SI = 1 / (79\ 835.86 - 4\ 816.52 \times SSS + 72.65 \times SSS^2)$	0.000 1
秋季 autumn	SST-SI	$SI = 1 / (1\ 438.76 - 101.92 \times SST + 1.81 \times SST^2)$	0.000 1
	CHL-SI	$SI = 1 / (202.26 - 3\ 041.69 \times CHL + 14\ 208.34 \times CHL^2)$	0.000 2
	SSH-SI	$SI = 1 / (383.75 - 720.49 \times SSH + 338.99 \times SSH^2)$	0.000 1
	SSS-SI	$SI = 1 / (40\ 447.21 - 2\ 469.62 \times SSS + 37.70 \times SSS^2)$	0.001 1
冬季 winter	SST-SI	$SI = 1 / (513.47 - 40.28 \times SST + 0.79 \times SST^2)$	0.000 1
	CHL-SI	$SI = 1 / (113.74 - 1\ 505.14 \times CHL + 5\ 023.50 \times CHL^2)$	0.000 1
	SSH-SI	$SI = 1 / (593.26 - 1\ 170.35 \times SSH + 578.10 \times SSH^2)$	0.002 0
	SSS-SI	$SI = 1 / (33\ 548.50 - 1\ 040.68 \times SSS + 31.03 \times SSS^2)$	0.001 0

对表 1 中各个 SI 方程进行求导，即可得到不同季节各因子的最适值(表 2)，结合图 2 可知各因子最适值呈明显的季节变动。SST 值夏秋季高，冬春季低；CHL 值夏秋季较低，冬春季相对较高；SSS 值春夏季较高，秋冬季低；SSH 值夏季最高，冬季最低。

表 2 各因子最适值

Tab. 2 Optimum value of each factor

季节 season	SST/℃	$\rho(CHL)/mg \cdot m^{-2}$	SSS	SSH/m
春季 spring	26.5	0.13	33.1	1.05
夏季 summer	28.9	0.09	33.2	1.09
秋季 autumn	28.4	0.10	32.7	1.04
冬季 winter	25.3	0.15	32.9	0.98

2.2 不同因子权重系数

分不同季节，对不同因子模型赋予不同的权重系数 a，通过计算 HSI 值与实际值之差来判断模型准确率，继而选择不同的权重系数。

春季当 SST-SI 的权重系数 a 为 0.7 时，其余 CHL-SI、SSS-SI、SSH-SI 的系数均为 0.1，模型准确度最高(表 3)，故而春季鸢乌贼渔场对 SST 较为敏感。

夏季当 CHL-SI 的权重系数为 1 时，其余各因子权重系数均为 0，模型准确度最高(表 4)，故而夏季影响鸢乌贼渔场的主要因子为 CHL。

秋季当 CHL-SI 的权重系数为 0.7，其余因子权重系数为 0.1 时，模型准确度最高(表 5)，故而秋季鸢乌贼渔场对 CHL 较为敏感。

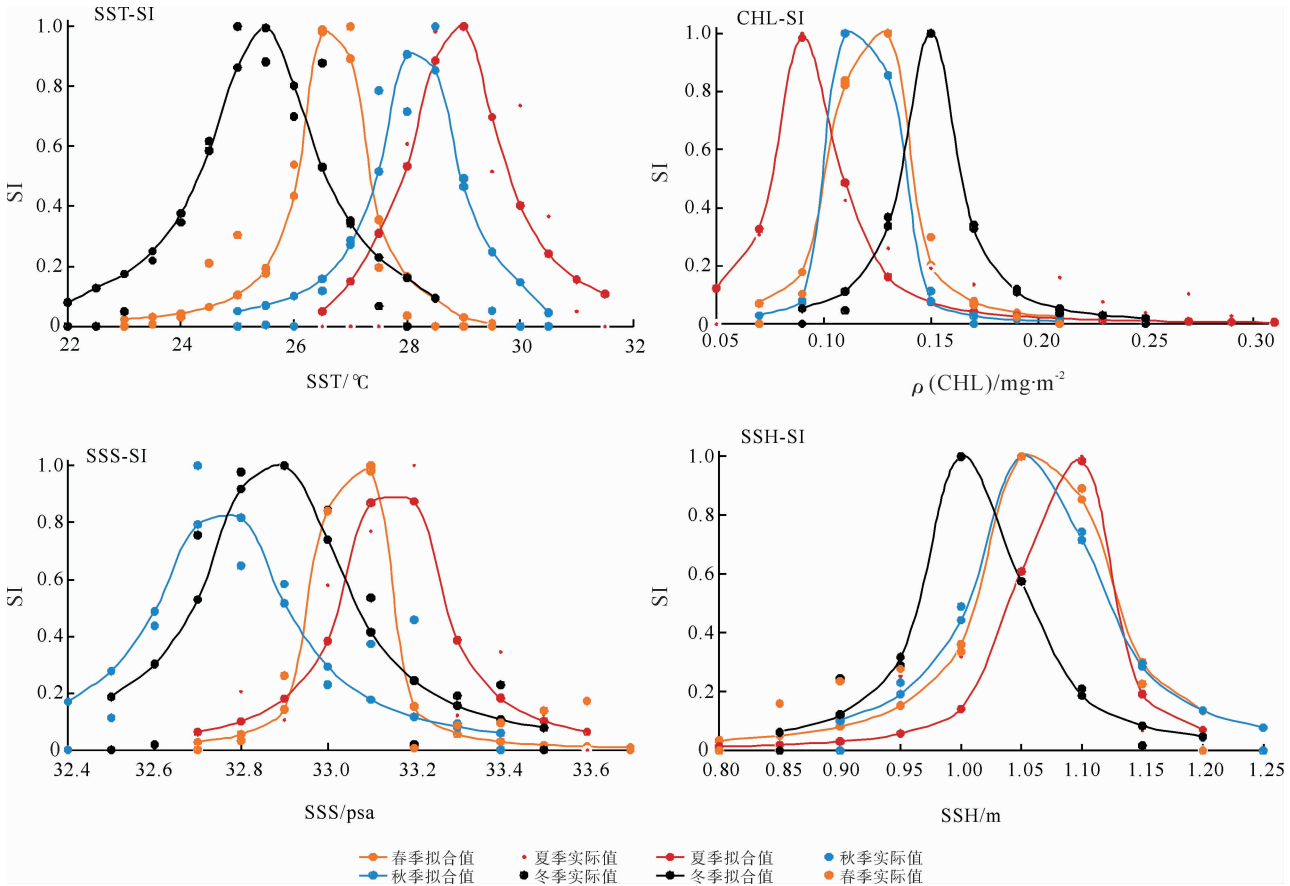


图 2 不同因子的 SI 曲线
Fig. 2 SI curves of all factors

表 3 春季不同权重系数的模型准确率					
Tab. 3 Model accuracy of different weight coefficients in spring					
a	0. 25	0. 5	0. 6	0. 7	1. 0
SST-SI	76	71	75	83	78
CHL-SI	76	62	65	63	67
SSS-SI	76	48	57	52	55
SSH-SI	76	45	42	65	62

表 4 夏季不同权重系数的模型准确率					
Tab. 4 Model accuracy of different weight coefficients in summer					
a	0. 25	0. 5	0. 6	0. 7	1. 0
SST-SI	71	65	72	79	77
CHL-SI	71	75	78	79	86
SSS-SI	71	59	63	72	70
SSH-SI	71	63	59	72	65

表 5 秋季不同权重系数的模型准确率					
Tab. 5 Model accuracy of different weight coefficients in autumn					
a	0. 25	0. 5	0. 6	0. 7	1. 0
SST-SI	79	69	81	79	75
CHL-SI	79	72	69	88	78
SSS-SI	79	59	62	68	71
SSH-SI	79	52	59	53	55

冬季当 SST-SI 的权重系数为 1，其余因子权重系数为 0 时，模型准确度最高(表 6)，故而冬季影响鳓乌贼渔场分布的主要因子为 SST。

2.3 渔场模型结果

结合上述结果，计算各季节 HSI 模型的拟合值，叠加声学走航所测生物量的实际值，利用 Marine Explorer 4.0 对不同季节进行分析，发现各季节生物量较高的点均出现在模型拟合值较高点，并且渔场分布的季节变化明显，各季节模型精度分别

表6 冬季不同权重系数的模型准确率

Tab. 6 Model accuracy of different weight coefficients in winter

	coefficients in winter				%
a	0.25	0.5	0.6	0.7	1.0
SST-SI	74	58	76	79	90
CHL-SI	74	70	69	72	79
SSS-SI	74	63	69	72	70
SSH-SI	74	58	64	66	69

为0.83、0.86、0.88、0.90，各因子的权重系数选择准确。

3 讨论

3.1 栖息地适应性指数模型

南海面积广阔，地形、洋流等海洋物理化学环

境复杂，鸢乌贼渔场形成原因与海洋的物理化学要素直接相关。南海中沙西沙海域的鸢乌贼渔场形成，受海洋环境、饵料生物和人类活动的影响，与其他海域有相同之处，又有其独特的特点^[10,20]。该研究将声学走航与遥感数据相结合，探索影响鸢乌贼渔场分布的环境因子，采用300 m以浅的鸢乌贼生物量数据作为表征渔场的指标，正好符合鸢乌贼的栖息深度^[6,21]。采用不同的权重系数对不同因子分季节进行分析，对每个季节的环境因子赋予权重，从而可以直观地看出不同季节影响渔场分布的主要

环境因子，亦可通过对HSI模型的计算与修正，发现潜在的渔场位置，进一步指导生产。

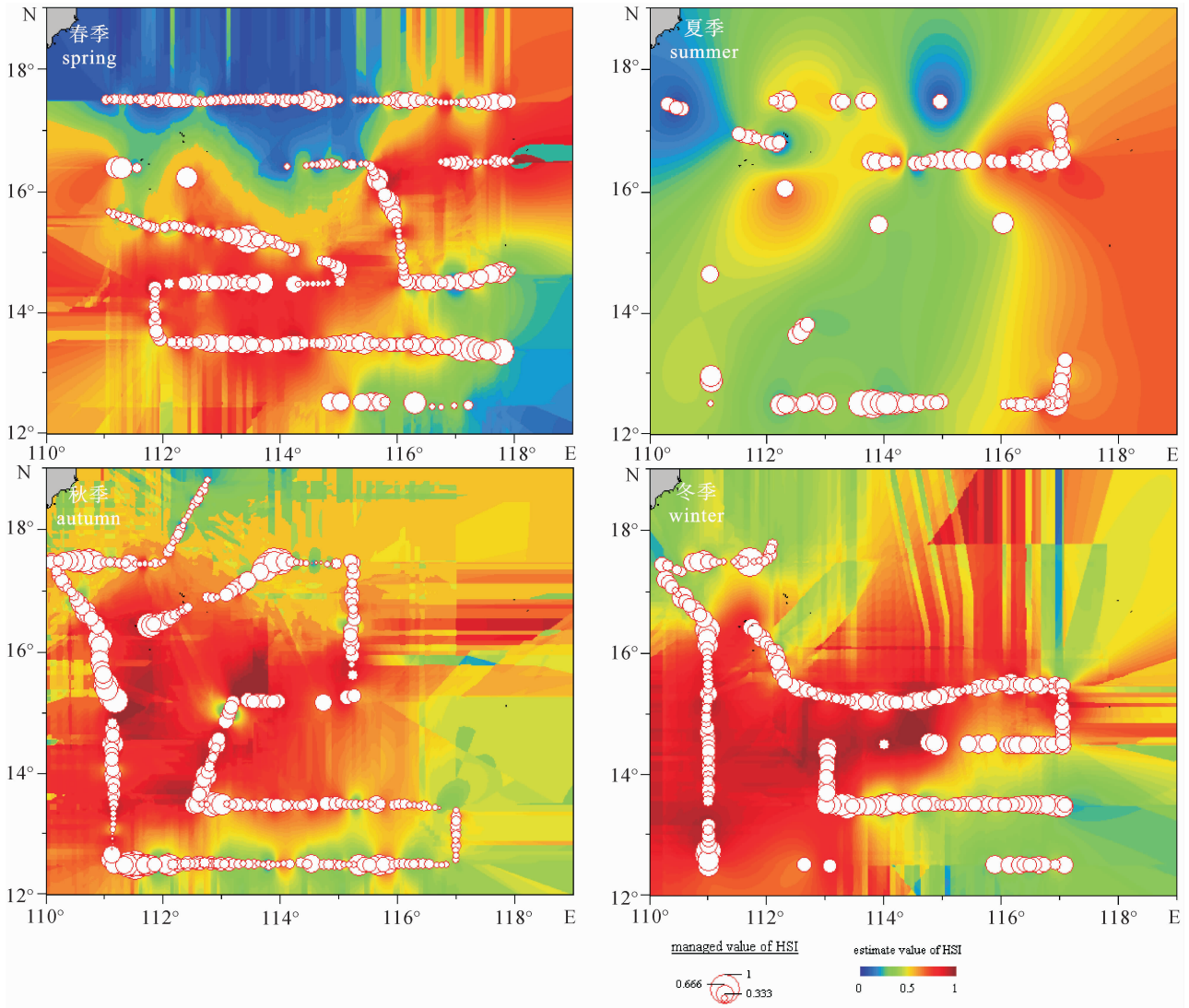


图3 模型预测结果与实际值

Fig. 3 Predicted results and actual values

3.2 鳶乌贼渔场与环境因子

通过对各因子 SI 模型的求导，计算出不同季节各因子的最适值，其结果与陈新军和叶旭昌^[22]、TIAN 等^[14]的研究结果类似。冬春季渔场与 SST 关系密切，夏秋季与 CHL 关系密切，这可能与鳶乌贼的生活史有关^[8,23]；鳶乌贼对水温较为敏感，冬春季海水温度整体较低，渔场生物量高的区域主要集中在南部低纬度水温较高的海域；夏秋季整个海域海水温度大致相同，CHL 成为影响渔场分布的主要因子，这可能是由于 CHL 的高低影响了鳶乌贼饵料生物的分布，而夏秋季正是鳶乌贼的索饵高峰期，故而 CHL 通过饵料生物影响了鳶乌贼渔场的分布。SIRIRAKSOPHON 等^[24]、CHEN 等^[8]认为头足类对海水温度较为敏感，而在该研究中发现，中沙西沙海域的鳶乌贼渔场与多种环境因子均有关联，这与其他海域的研究有共同之处，也有其独特的特点，这可能与南海复杂的地貌与水文环境有关。

3.3 鳶乌贼行为与渔场关系

在实际走航调查中，发现鳶乌贼有明显的昼夜垂直迁移特性，一般在傍晚 19 时左右开始从 300 m 左右水深上浮，到晚上 22 时左右上浮至 100 m 以浅水层；清晨 4 时左右开始下沉，至 6 时左右下沉至 300 m 左右水层。故而其昼夜垂直移动的行为对渔场生物量的评估影响不大。从鳶乌贼的胃含物分析中可以看出，其昼夜垂直移动的主要目的是觅食^[8]。鳶乌贼夜晚上浮至 100 m 以浅的水层，其与 SST 和 SSH 的关系更为密切(相关系数 $P_{SST} > P_{SSH} > P_{CHL} > P_{SSS}$)，白天下沉至较深水层，其生物量与 SST 和 CHL 关系较为密切(相关系数 $P_{SST} > P_{CHL} > P_{SSH} > P_{SSS}$)。一般而言，SSS 的变化较为均匀，CHL 主要通过影响鳶乌贼饵料生物而影响其分布，故而鳶乌贼行为与 SST 和 CHL 的关系更为密切。

3.4 模型的修正与应用

通过确定各季节各因子的权重系数，进而可以建立中沙西沙鳶乌贼渔场的栖息地指数模型，这可为今后的渔情预报工作提供相应的理论依据。而权重系数的确定，也可在获取环境数据有限的情况下，通过 1~2 个因子对渔场位置进行大致判断，对指导渔民生产，提高生产效率，节能减排有一定的效果。同时，该研究仅用一年的数据，虽然存在一定的偶然性，但由于鳶乌贼属一年生的动物，生命周期短，其与海洋环境因子的关系较多年生海洋

生物更为密切，故而仍有一定的可信度；在今后的研究中要积累长时间序列的数据，结合渔民生产状况，综合分析更多的影响渔场形成因子，进一步提高模型的准确度。

参考文献：

[1] 陈新军, 刘必林, 王尧耕. 世界头足类[M]. 北京: 海洋出版社, 2009: 128-134.

[2] SIRIRAKSOPHON S, SUKRAMONGKOL N, NAKAMURA Y. Exploration of oceanic squid, *Sthenoteuthis oualaniensis* resources in the South China Sea, Vietnamese waters[C] // Proceedings of the Third Technical Seminar on Marine Fishery Resources Survey in the South China Sea, Area IV: Vietnamese Waters Special Paper No SEC/SP/44. Bangkok: Southeast Asian Fisheries Development Center, 2001: 181-197.

[3] 张鹏, 杨齐, 张旭丰, 等. 南海金枪鱼和鳶乌贼资源开发现状及前景[J]. 南方水产, 2010, 6(1): 68-74.

[4] 张俊, 陈作志, 陈国宝, 等. 南海鳶乌贼水声学测量和评估相关技术研究[J]. 南方水产科学, 2014, 10(6): 1-11.

[5] 张宇美, 颜云榕, 卢伙胜, 等. 西沙群岛海域鳶乌贼摄食与繁殖生物学初步研究[J]. 广东海洋大学学报, 2013, 40(3): 56-64.

[6] 范江涛, 冯雪, 邱永松, 等. 南海鳶乌贼生物学研究进展[J]. 广东农业科学, 2013, 40(23): 122-128.

[7] YOUNG R E, HIROTA J. Review of the ecology of *Sthenoteuthis oualaniensis* near the Hawaiian Archipelago[C] // Contributed papers to international symposium on large pelagic squids. Tokyo: Japan Marine Fishery Resources Research Center, 1998: 131-143.

[8] CHEN X J, LIU B L, TIAN S Q, et al. Fishery biology of purple-back squid, *Sthenoteuthis oualaniensis*, in the northwest Indian Ocean[J]. Fish Res, 2007, 83(1): 98-104.

[9] PARRY M P. The trophic ecology of two ommastrephid squid species, *Ommastrephes bartramii* and *Sthenoteuthis oualaniensis*, in the North Pacific sub-tropical gyre[D]. Manoa: University of Hawaii, 2003: 39-48.

[10] TAKAGI K, KITAHARA T, SUZUKI N, et al. The age and growth of *Sthenoteuthis oualaniensis* (Cephalopoda: Ommastrephidae) in the Pacific Ocean[J]. Bull Mar Sci, 2002, 71(2): 1105-1108.

[11] 范江涛, 邱永松, 陈作志, 等. 南海鳶乌贼两个群体间角质颚形态差异分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(10): 42-49.

[12] CHESALIN M. Distribution and biology of the squid *Sthenoteuthis oualaniensis* in the Arabian Sea[J]. Hydrobiol J, 1994, 30(2): 61-73.

[13] 陈新军, 刘金立. 利用形态学方法分析印度洋西北部海域鳶乌贼种群结构[J]. 上海水产大学学报, 2007, 16(2): 174-179.

[14] 田思泉, 陈新军, 杨晓明. 阿拉伯北部公海海域鳶乌贼渔场分布及其与海洋环境因子关系[J]. 海洋湖沼通报, 2006

(1): 51-57.

[15] 杨权, 李永振, 张鹏, 等. 基于灯光罩网法的南海鳶乌贼声学评估技术研究[J]. 水产学报, 2013, 37(7): 1032-1039.

[16] 范江涛, 张俊, 冯雪, 等. 基于栖息地模型的南沙海域鳶乌贼渔情预报研究[J]. 南方水产科学, 2015, 11(5): 20-26.

[17] 李春喜, 王志和, 王文林. 生物统计学[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 137-155.

[18] 茆诗松, 程依明, 濮晓龙, 等. 概率论与数理统计教程[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2011: 36-49.

[19] 刘自远, 刘成福. 综合评价中指标权重系数确定方法探讨[J]. 中国卫生质量管理, 2006, 13(2): 44-46, 48.

[20] 颜云榕, 冯波, 卢伙胜, 等. 南沙群岛北部海域鳶乌贼(*Sthenoteuthis oualaniensis*)夏季渔业生物学研究[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(6): 1177-1186.

[21] 杨晓明, 陈新军, 周应祺, 等. 基于海洋遥感的西北印度洋鳶乌贼渔场形成机制的初步分析[J]. 水产学报, 2006, 30(5): 669-675.

[22] 陈新军, 叶旭昌. 印度洋西北部海域鳶乌贼渔场与海洋环境因子关系的初步分析[J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(1): 55-60.

[23] YATSU A. The biology of *Sthenoteuthis oualaniensis* and exploitation of the new squid resources[J]. Bull Far Sea Fish, 1997, 101: 6-9.

[24] SIRIRAKSOPHON S, NAKAMURA Y, PRADIT S, et al. Ecological aspects of oceanic squid, *Sthenoteuthis oualaniensis* (Lesson) in the South China Sea, area III: Western Philippines[C] // Proceedings of the SEAFDEC Seminar on Fishery Resources in the South China Sea, Area III: Western Philippines. Bangkok: Southeast Asian Fisheries Development Center, 2000: 3-5.