

武胜男, 陈新军, 刘祝楠. 基于 GAM 的西北太平洋日本鲭资源丰度预测模型建立[J]. 海洋学报, 2019, 41(8): 36–42, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.08.004

Wu Shengnan, Chen Xinjun, Liu Zhu'nan. Establishment of forecasting model of the abundance index for chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the northwest Pacific Ocean based on GAM[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(8): 36–42, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.08.004

基于 GAM 的西北太平洋日本鲭资源丰度 预测模型建立

武胜男^{1,2}, 陈新军^{1,2,3,4,5*}, 刘祝楠¹

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 4. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 5. 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306)

摘要: 日本鲭 (*Scomber japonicus*) 是西北太平洋重要的鱼类资源之一, 科学预测日本鲭的资源丰度有利于其资源的合理开发和利用。本研究依据日本渔业机构提供的 1987–2012 年日本鲭太平洋群体的资源量数据, 结合产卵场和渔场的海洋环境数据以及气候因子, 使用广义加性模型对影响日本鲭太平洋群体的海洋环境和气候因子进行分析, 筛选出有显著影响的因子并建立该群体的资源量预测模型。结果表明, 与该群体资源量有显著关系的影响因子有: 北极涛动指数、太平洋年代际振荡指数、渔场海表面高度、渔场海表面盐度和渔场海表面温度。基于赤池信息准则筛选出的 4 个资源量预测模型分析表明, 包含北极涛动指数、渔场海表面高度和渔场海表面温度的模型有较好的预测效果, 该模型的验证结果也通过了 t 检验 ($P < 0.05$), 可用于日本鲭太平洋群体资源量的预测。

关键词: 日本鲭; 太平洋群体; 环境因子; 气候因子; GAM 模型

中图分类号: S931.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)08-0036-07

1 引言

日本鲭 (*Scomber japonicus*) 属于暖水性中上层鱼类, 属于鲈形目, 鲭科, 鲈属^[1], 广泛分布于西北太平洋沿岸海域, 我国沿岸、朝鲜及日本海域^[2]。中日学者对日本鲭的群体划分存在很多争议, 日本学者将其分为对马暖流群体和太平洋群体^[2], 目前我国进行商业性开发的对象是对马暖流群体^[3], 也有部分学者将东海、黄海的日本鲭划分为东海西部群体^[4]。目前国内外学者对其渔业生物学^[5]、海洋环境和气候与资源丰度的关系^[6-11]和资源评估^[12]等方面进行了广泛的研究。相关研究表明, 海表面水温 (Sea Surface Tem-

perature, SST)^[6]、海表面高度 (Sea Surface Height, SSH)^[7]、海表面盐度 (Sea Surface Salinity, SSS)^[8]、海流^[9]以及气候相关指标^[10-11]等均对日本鲭的资源丰度产生一定的影响。

广义加性模型 (Generalized Addictive Models, GAM) 是多元线性回归的扩展, 是广义线性模型 (Generalized Linear Models, GLM) 的非参数化修改模式, 其优点是能直接处理响应变量与多个解释变量的非线性关系^[13]。GAM 模型灵活性强, 更注重探测数据间的复杂关系, 目前已经应用到许多学科领域中^[14-15], 在渔业领域中应用广泛。因此, 本研究利用日本水产厅提供的日本鲭太平洋群体资源评估报告

收稿日期: 2018-06-04; 修订日期: 2018-07-17。

基金项目: 海洋局公益性行业专项 (20155014); 上海市科技创新计划 (15DZ1202200)。

作者简介: 武胜男 (1994—), 女, 山东省青岛市人, 主要从事渔业资源研究。E-mail: 374723906@qq.com

* 通信作者: 陈新军 (1967—), 教授, 研究方向为渔业资源。E-mail: xjchen@shou.edu.cn

的资源量数据、美国 NOAA 气候预报中心提供的气候数据以及亚洲—太平洋数据研究中心提供的产卵场和渔场的海洋环境数据, 对该群体的影响因子与资源量之间的关系进行 GAM 分析, 找出关键影响因子, 建立资源丰度预测模型, 筛选出最优模型为日本鲭太平洋群体资源的合理利用提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 数据来源

(1) 资源丰度的指标为资源量, 单位为 kt, 来源于日本渔业机构提供的 2015 年日本鲭太平洋群体年度资源评估报告 (<http://abchan.fra.go.jp/digests27/index.html>), 生产捕捞范围主要为日本太平洋南部沿岸至千岛列岛海域^[2](图 1), 数据时间包括了 1987—2012 年, 时间分辨率为年。

(2) 环境数据包括产卵场和渔场的 SST、SSS、SSH、黑潮潮差和亲潮春季的平均面积。产卵场的时间范围为每年 1—6 月, 数据范围覆盖 27°~35°N, 130°~140°E; 渔场的时间范围为每年的 7—12 月, 数据范围覆盖 35°~45°N, 140°~160°E(图 1)^[16], 空间分辨率均为 1°×1°, 其中 SST、SSS 和 SSH 数据来源于亚洲—太平洋数据研究中心 (<http://apdrc.soest.hawaii.edu/data/data.php>), 黑潮潮差和亲潮春季平均面积数据来源于日本气象厅 (<http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/>), 数据时间包括了 1987—2012 年的 12 个月, 时间分辨率为月。

(3) 气候数据包括北极涛动指数(the Arctic Oscillation Index, AOI)、太平洋年代际振荡指数(Pacific Decadal Oscillation Index, PDOI)、厄尔尼诺指数(El Niño Index, NI)以及南方涛动指数(Southern Oscillation Index, SOI), 其中, SOI 用海表面压力异常值来表

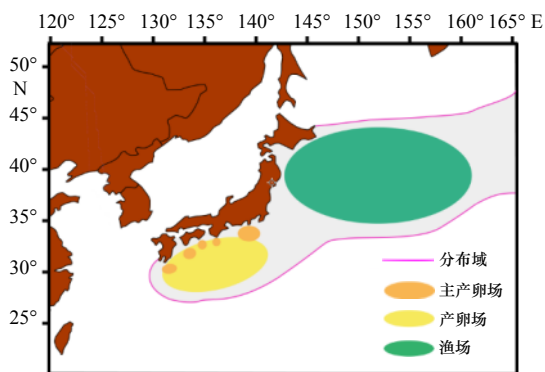


图 1 日本鲭太平洋群体分布区域图

Fig. 1 Distribution of the Pacific-cohort of chub mackerel (*Scomber japonicus*)

示, AOI 来源于美国 NOAA 气候预报中心网站 (<http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/>); PDOI 的高低表征太平洋年代际振荡的变化情况^[17], 来源于美国华盛顿大学数据库 (<http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>); NI 用 El Niño 3.4 区的海表温度距平值 (Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA) 来表示, NI 的高低表征厄尔尼诺现象的有无^[18], 数据来源于美国 NOAA 气候预报中心网站 (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml), 数据时间包括了 1987—2012 年的 12 个月, 时间分辨率为月。

2.2 研究方法

(1) 数据预处理。将获得的产卵场和渔场的 SST、SSS 和 SSH 按月进行平均, 得到各月产卵场和渔场 SST、SSS 和 SSH 的平均值。

(2) 关键影响因子的选择。本研究中, 利用 R 3.5.0 软件^[19]以 1987—1999 年的资源量作为非独立变量, AOI、NI、PDOI、SOI、黑潮潮差、亲潮春季平均面积以及产卵场和渔场的 SST、SSS 和 SSH 作为解释变量建立 GAM 模型, 分析日本鲭太平洋群体资源量与各环境因子和气候因子间的关系, 筛选出对资源量具有显著影响的因子, 作为关键影响因子。

GAM 模型表达式为^[20]

$$\text{Biomass} = s(\text{factor}) + \varepsilon, \quad (1)$$

式中, Biomass 表示日本鲭太平洋群体的年资源量, 单位为 kt; s 表示平滑函数; factor 表示各影响因子; ε 表示误差项。

(3) 关键影响因子之间的相关性分析。筛选出对资源量具有显著影响的因子两两进行回归分析, 判断因子间是否存在共线性, 当两因子显著相关时, 即两因子间存在共线性, 建模时只选择其中一个因子, 排除了因子间的相互作用对模型的影响。

(4) 预测模型的建立和有效性分析。利用 R 3.5.0 软件^[19]将 1987—1999 年筛选出有显著影响的因子分别组合, 建立不同的 GAM 资源量预测模型, 组合过程中具有共线性的两因子不同时存在于同一模型中, 计算方法如下:

$$\ln(\text{Biomass}) = s(\text{factor } 1) + s(\text{factor } 2) + \dots + s(\text{factor } n) + \varepsilon (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (2)$$

式中, 采用自然对数转换方法对 Biomass 进行转化。

赤池信息准则 (Akaike's Information Criterion, AIC), 是由 Akaike^[21] 提出的, 即当从一组模型中选出一个最佳模型时, AIC 值越小, 则模型拟合的越好^[22], AIC 值的计算如下式^[22]:

$$AIC = 2k - 2\ln(L), \quad (3)$$

式中, k 表示模型独立参数个数; L 表示模型的极大似然函数。

排除有显著影响的因子之间存在共线性的情况, 再依据 AIC 准则, AIC 值由小到大依次筛选出 4 个预测模型, 作为日本鲭太平洋群体资源量预测的最优模型。通过模型的有效性分析进一步检验因子的重要性, 模型的有效性分析包括模型的显著性和调整后的相关系数。

(5) 模型的验证和 t 检验。根据已筛选出的 4 个模型对 2000—2012 年日本鲭太平洋群体的资源量进行预测和验证, 分析不同环境和气候条件下日本鲭太平洋群体资源量的变化, 据此推断海洋环境和气候变化对日本鲭资源量产生的潜在影响。

3 结果

3.1 关键影响因子的选择

利用 GAM 模型检验各气候和环境因子与日本鲭太平洋群体年资源量的显著性(表 1), 从而获得统计学上有意义的影响因子。由表 1 可见, AOI、PDOI、渔场 SSH(SSH2)、渔场 SSS(SSS2) 和渔场 SST(SST2) 与资源量在 $P < 0.05$ 水平上均显著相关。其中, PDOI、SSS2 和 SST2 的 P 值均小于 0.01, 即 PDOI、SSS2 和 SST2 与资源量呈极显著相关关系。

表 1 1987—1999 年各环境因子和气候因子与日本鲭资源量的 GAM 检验

Tab. 1 Test of GAM between the environmental or climatic factors and the biomass during 1987—1999

影响因子	P 值	R^2
AOI	0.05*	0.24
NI	0.18	0.24
PDOI	2.64×10^{-5} *	0.76
SOI	0.15	0.27
产卵场SSH(SSH1)/cm	0.30	0.17
渔场SSH(SSH2)/cm	0.03*	0.68
产卵场SSS(SSS1)	0.09	0.16
渔场SSS(SSS2)	3.00×10^{-3} *	0.96
产卵场SST(SST1)/°C	0.10	0.16
渔场SST(SST2)/°C	1.00×10^{-3} *	0.86
黑潮潮差/m	0.60	0.06
亲潮春季平均面积/m ²	0.28	0.20

注: *表示在显著性水平 $\alpha=0.05$ (双侧)上显著相关。

因此, 本研究中的 AOI、PDOI、SSH2、SSS2 和 SST2 对日本鲭太平洋群体资源量均有显著影响, 可作为关键影响因子用于预测模型的建立。

3.2 关键影响因子之间的相关性分析

对已筛选出的关键影响因子两两进行回归分析(表 2), 结果表明, PDOI 分别与 SSH2 和 SST2 在 $P < 0.05$ 水平上呈极显著相关关系, 即 PDOI 和 SSH2、PDOI 和 SST2 存在共线性, 建模时排除因子间的相互作用对模型的影响, 两组共线性因子不同时存在于同一模型中。

表 2 1987—1999 年各关键影响因子之间的回归分析

Tab. 2 Regression analysis of significant factors during 1987—1999

影响因子	P 值	R^2
AOI, PDOI	0.07	0.28
AOI, SSH2	0.49	0.04
AOI, SST2	0.14	0.19
AOI, SSS2	0.42	0.06
PDOI, SSH2	4.37×10^{-3} *	0.54
PDOI, SST2	7.37×10^{-4} *	0.66
PSO, SSS2	0.73	0.01
SSH2, SST2	0.06	0.28
SSH2, SSS2	0.49	0.04
SST2, SSS2	0.93	7.08×10^{-4}

注: *表示在显著性水平 $\alpha=0.05$ (双侧)上显著相关。

3.3 模型的建立和有效性分析

考虑到多因子的不同组合方式(模型因子数 ≥ 2), 并排除有显著影响的因子之间存在共线性的情况, 利用 1987—1999 年的日本鲭太平洋群体资源量数据和关键影响因子数据分别建立不同的 GAM 模型, 再依据 AIC 准则, AIC 值由小到大依次筛选出 4 个预测模型(表 3), 即

模型 1: $\ln(\text{Biomass}) = s(\text{AOI}) + s(\text{SSH2}) + s(\text{SST2}) + \varepsilon;$

模型 2: $\ln(\text{Biomass}) = s(\text{AOI}) + s(\text{SSH2}) + s(\text{SSS2}) + s(\text{SST2}) + \varepsilon;$

模型 3: $\ln(\text{Biomass}) = s(\text{SSH2}) + s(\text{SSS2}) + s(\text{SST2}) + \varepsilon;$

模型 4: $\ln(\text{Biomass}) = s(\text{AOI}) + s(\text{PDOI}) + \varepsilon.$

模型的有效性分析表明(表 2), 4 个模型在 $P < 0.05$ 水平上均达到显著性, 调整后复决定系数(调整 R^2)均大于 90%, 其中模型 1 的调整 R^2 达到了 100%。从模型有效性分析的不同指标来看, 即考虑到 AIC 准

表 3 1987—1999 年基于环境因子和气候因子的资源量预测模型

Tab. 3 Forecasting models of biomass based on environmental and climatic factors during 1987–1999

模型	AIC	P值 ($P<0.05$)	调整后的 R^2
模型1	-90.892 55	2.80×10^{-5} *	1.000
模型2	-79.380 89	4.41×10^{-3} *	0.999
模型3	-47.796 14	6.22×10^{-9} *	0.995
模型4	-24.670 12	9.97×10^{-8} *	0.970

注: *表示在显著性水平 $\alpha=0.05$ (双侧)上显著相关。

则、各模型的显著性以及调整后复决定系数(调整 R^2), 模型 1 的精度最高, 拟合效果最好。

3.4 模型的验证

根据已筛选出的 4 个模型对 2000–2012 年日本鲭太平洋群体的资源量进行预测(图 2), 并对该群体的预测值和真实值之间进行了 t 检验(表 4)。由 t 检验结果得知, 模型 1 和模型 2、在 $P<0.05$ 水平上均达到显著性, 表明这 2 个模型拟合的结果较好。因此结合 AIC 准则, 并从模型的验证结果来看, 模型 1 具有最小的 AIC 值, 其预测结果也通过了 t 检验, 可作为最适的日本鲭太平洋群体资源量预测模型。

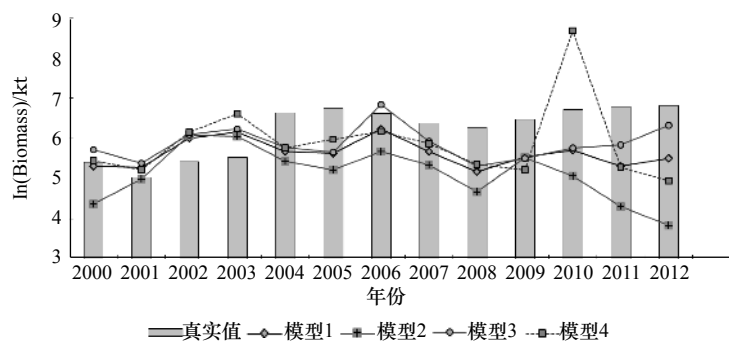


图 2 2000—2012 年日本鲭太平洋群体资源量以及 4 种预测模型结果

Fig. 2 The actual $\ln(\text{Biomass})$ and the results of biomass forecasting models for the Pacific-cohort of chub mackerel (*Scomber japonicus*) during 2000–2012

表 4 2000—2012 年资源量的预测值和真实值之间的 t 检验Tab. 4 t test between the predicted $\ln(\text{Biomass})$ and the actual $\ln(\text{Biomass})$ during 2000–2012

模型	t 值	自由度	P值 ($P<0.05$)
模型1	2.97	18.33	8.08×10^{-3} *
模型2	4.27	23.88	2.66×10^{-4} *
模型3	1.63	20.90	0.12
模型4	1.01	20.73	0.33

注: *表示在显著性水平 $\alpha=0.05$ (双侧)上显著相关。

4 讨论与分析

本研究利用产卵场和渔场的环境因子和气候因子作为指标, 基于 GAM 模型对日本鲭太平洋群体的资源量进行了预测。GAM 模型结果表明, 包含 AOI、SSH2 和 SST2 的模型 1 有着较好的预测效果。模型的有效性分析和验证结果表明, 模型 3 和模型 4 在 $P<0.05$ 水平上均达到显著性, 但模型 3 在 2005—2007 年间和模型 4 在 2009—2011 年间的预测结果与真实值之间还是存在着较大差异, 不能准确地反映出

当年资源量的变化趋势, 这可能是由于捕捞压力的不确定性导致的。李纲等^[12]研究表明, 捕捞努力和捕捞压力对鱼类资源产生重要的影响, 日本中央水产研究所^[2]分析了日本鲭太平洋群体的资源量变动情况。1987 年以后由于捕捞压力的增大以及补充量的减少, 资源快速衰退, 2000 年以后由于捕捞压力降低, 补充量增加, 资源量得到了恢复。因此, 由于捕捞压力的不确定性, 预测模型的预测值可能会与真实值有一定的差异, 今后可以结合当年的捕捞压力进行进一步的研究。

因子间的相互作用可能会对模型产生影响, 例如 SSS 受到 SST 的影响会发生变化^[23], 亲潮、黑潮的冷暖水团也会对日本鲭产卵场和渔场的水温产生影响^[24–25]等, 本研究为了排除这种相互作用, 对关键影响因子两两进行了回归分析, 避免了具有共线性关系的因子叠加作用于模型。此外, 以 P 值为关键影响因子对资源量影响程度的指标, 影响程度由大到小依次为 PDOI、SST2、SSS2、SSH2 和 AOI(表 1)。根据 AIC 准则和 t 检验结果, 模型 1 和模型 2 有着最小的 AIC 值并且通过了 t 检验, 有着较好的预测效果。分析发现, 模型 1 和模型 2 均包含 SSH2 和 SST2, 表明

这两个因子对模型的优劣程度影响较大。通过预测模型比较得到的因子的重要性与 GAM 检验的结果存在着差异,本研究认为影响因子和资源量之间的 GAM 检验结果可能更为可信,它得到的是单因子与资源量的关联程度,各因子的显著性可以反映其对总资源量的影响程度(表 1),而模型则反映了因子之间的综合影响。

环境因子的选择上,由 GAM 检验结果可知(表 1):渔场平均 SSS 和 SST 的显著性(P 值)均低于 0.01 ($P < 0.05$),对资源量的影响最大。SST 是影响日本鲭资源量变动的关键因子^[12, 26],王从军等^[27]利用 GAM 模型验证了 SST 是对黄海日本鲭资源丰度指数影响最大的环境因子;Yatsu 等^[28]研究发现 SST 对日本鲭资源补充量产生一定影响,进而影响总资源量;蒋玫和王云龙^[23]采用逐步回归法,发现水温和盐度是日本鲭仔鱼分布的主要影响因子。这些都表明,SSS 和 SST 对日本鲭的资源丰度产生重要影响。李纲和陈新军^[7]发现日本鲭的中心渔场出现在 SSH 极大值和极小值交汇的、并靠近极大值一侧的海域,即冷水团和暖水团交汇且靠近暖水团一侧海域,这表明 SSH 也是日本鲭资源丰度的重要影响因子,与本研究的结果相一致。此外,有研究发现^[29-30],黑潮、亲潮的变动对日本鲭资源密切相关,然而本研究中选取的黑潮潮差和亲潮春季的平均面积没有具体的经纬度范围,可能与日本鲭太平洋群体产卵场和渔场范围不能达到完全匹配,弱化了黑潮和亲潮对该群体资源量的影响,因此今后的研究应加强这方面的工作。

参考文献:

- [1] 李建生,胡芬,严利平,等. 东海中部日本鲭(*Scomber japonicus*)产卵群体繁殖力特征[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(6): 10-15.
Li Jiansheng, Hu Fen, Yan Liping, et al. The fecundity of chub mackerel (*Scomber japonicus*) spawning stocks in the central East China Sea[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2014, 35(6): 10-15.
- [2] 由上龍嗣,渡邊千夏子,上村泰洋,等. 平成27(2015)年度マサバ太平洋系群の資源評価[R]. 日本,东京:中央水産研究所,2015.
Yokami R, Watanabe C, Uemura Y, et al. Stock assessment of the Pacific cohort of chub mackerel (*Scomber japonicus*) in 2015[R]. Japan, city: National Research Institute of Fisheries Science, 2015.
- [3] 由上龍嗣. 日本周辺のサバ資源について[J]. 日本水産学会誌, 2017, 83(5): 836.
Yokami R. Stock status of mackerel around Japan[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 2017, 83(5): 836.
- [4] 大内明,浜崎清一. 日本海西部・東シナ海におけるマサバの系統群[J]. 西水研研報, 1979(53): 125-152.
Ouchi M, Hamasaki K. The cohort of chub mackerel in western the Sea of Japan and the East China Sea[J]. *Seikai National Fisheries Research Institute*, 1979(53): 125-152.
- [5] 武胜男,陈新军. 西北太平洋日本鲭渔业生物学和渔业海洋学研究进展[J]. 广东海洋大学学报, 2018, 38(2): 91-100.
Wu Shengnan, Chen Xinjun. Review on fishery biology and fishery oceanography of chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the Northwest Pacific Ocean[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2018, 38(2): 91-100.
- [6] 清水昭男. 魚類の生殖周期と水温等環境条件との関係[J]. 水産総合研究センター研究報告, 別冊, 2006, 4: 1-12.
Shizumi A. Environmental regulations of reproductive cycles in teleost[J]. *Bulletin of Fisheries Research Agency, Spatial Journal*, 2006, 4: 1-12.
- [7] 李纲,陈新军. 夏季东海渔场鲈鱼产量与海洋环境因子的关系[J]. 海洋学研究, 2009, 27(1): 1-8.
Li Gang, Chen Xinjun. Study on the relationship between catch of mackerel and environmental factors in the East China Sea in

气候因子的选择上,有研究表明^[28],PDOI 与 SOI 相关的变量以及北极涛动现象均对日本鲭的补充量和生产力及其资源丰度产生重要影响;Carantín-Soriano 等^[31]研究发现,厄尔尼诺事件对秘鲁沿海日本鲭的分布和生殖行为产生影响。本研究中,根据 GAM 检验结果发现太平洋年代际振荡和北极涛动比厄尔尼诺和南方涛动现象更为重要,这可能是由于前两者属于年代际的变化,与厄尔尼诺和南方涛动现象相比持续时间更长,因此可能对日本鲭太平洋群体各年龄的总资源量造成影响。

本研究表明, GAM 模型灵活性强,每一个加性项使用单个光滑函数来估计,能够更好地解释自变量和因变量之间的非单调、非线性关系^[20]。这对于渔业资源的研究很有意义,因为很多因子对资源量的影响往往是复杂的、非线性的, GAM 模型非参数拟合就能较好的解决这个问题。但 GAM 模型每个解释变量的关系均采用非参数拟合会产生计算量大、过度拟合等现象^[20],因此在今后的研究中,还需要对模型进一步检验和筛选,据此推断出海洋环境和气候变化对日本鲭资源量产生的潜在影响。

综上所述,气候因子和渔场的环境因子共同对日本鲭太平洋群体的资源量产生了影响。在今后的研究分析中,还应结合其他环境因子和气候指标以及考虑到捕捞压力的影响,提高资源量数据的准确性和数据间的空间匹配度,建立多种模型比较分析,为更精确地预报日本鲭资源量提供理论依据。

- summer[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2009, 27(1): 1–8.
- [8] 佐野蘊. 北海道西岸のマサバ卵の分布と、それよりみた産卵場の環境の考察[J]. 水産庁北海道区水産研究所研究報告, 1956(14): 35–56.
- Sano U. Distribution of eggs of chub mackerel in the west coast of Hokkaido, based on the environment of spawning grounds[J]. Bulletin of the Hokkaido National Fisheries Research Institute, Fisheries Agency, 1956(14): 35–56.
- [9] 宇佐美修造. マサバ太平洋系群の漁獲量変動と環境条件[J]. 水産海洋研究会報, 1981(39): 32–36.
- Usami S. The catch variation and environment conditions of the Pacific cohort of chub mackerel[J]. Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography, 1981(39): 32–36.
- [10] 田永軍, 赤嶺達郎, 須田真木. 北西太平洋におけるサンマ資源の長期変動特性と気候変化[J]. 水産海洋研究, 2002, 66(1): 16–25.
- Tian Yongjun, Akamine T, Suda M. Long-term variability in the abundance of Pacific saury in the northwestern Pacific Ocean and climate changes during the last century[J]. Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography, 2002, 66(1): 16–25.
- [11] Yasuda T, Yukami R, Ohshimo S. Fishing ground hotspots reveal long-term variation in chub mackerel *Scomber japonicus* habitat in the East China Sea[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2014, 501: 239–250.
- [12] 李纲, 郑晓琼, 朱国平, 等. 基于水温因子的东、黄海鲈鱼剩余产量模型建立[J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(1): 108–113.
- Li Gang, Zheng Xiaoqiong, Zhu Guoping, et al. Establishment of surplus production model for chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the East China Sea and Yellow Sea based on the sea surface temperature[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011, 20(1): 108–113.
- [13] Guisan A, Edwards T C Jr, Hastie T. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2/3): 89–100.
- [14] Berg D. Bankruptcy prediction by generalized additive models[J]. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 2007, 23(2): 129–143.
- [15] 贺祥, 林振山. 基于GAM模型分析影响因素交互作用对PM_{2.5}浓度变化的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(1): 22–32.
- He Xiang, Lin Zhenshan. Interactive effects of the influencing factors on the changes of PM_{2.5} concentration based on GAM model[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(1): 22–32.
- [16] 目黒清美, 梨田一也, 三谷卓美, 等. マサバとゴマサバの分布と回遊—成魚[J]. 月刊海洋, 2012, 382: 256–260.
- Meguro K, Nashida K, Mitani T, et al. Distribution and migration of *Scomber japonicus* and *Scomber australasicus*[J]. *Kaiyo Monthly*, 2012, 382: 256–260.
- [17] 余为, 陈新军. 西北太平洋柔鱼栖息地环境因子分析及其对资源丰度的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5032–5039.
- Yu Wei, Chen Xinjun. Analysis of environmental conditions and their influence on the abundance of neon flying squid in the northwest Pacific Ocean[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15): 5032–5039.
- [18] 曹杰. 西北太平洋柔鱼资源评估与管理[D]. 上海: 上海海洋大学, 2010.
- Cao Jie. Stock assessment and risk analysis of management strategies for neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the northwest Pacific Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2010.
- [19] 李德伟, 张龙, 王洋, 等. 基于GAM的阿根廷滑柔鱼CPUE与环境因子关系分析[J]. *渔业现代化*, 2015, 42(4): 56–61.
- Li Dewei, Zhang Long, Wang Yang, et al. Study on the relationship between *Illex argentinus* CPUE and environmental factors based on GAM[J]. *Fishery Modernization*, 2015, 42(4): 56–61.
- [20] 李丽霞, 郝艳晖, 周舒冬, 等. 广义加性模型及其应用[J]. *中国卫生统计*, 2007, 24(3): 243–244.
- Li Lixia, Gao Yanhui, Zhou Shudong, et al. Generalized additive models and its application[J]. *Chinese Journal of Health Statistics*, 2007, 24(3): 243–244.
- [21] Akaike H. Factor analysis and AIC[M]//Parzen E, Tanabe K, Kitagawa G. Selected Papers of Hirotugu Akaike. New York, NY: Springer, 1987: 371–386.
- [22] 刘璋温. 赤池信息量准则AIC及其意义[J]. 数学的实践与认识, 1980(3): 64–72.
- Liu Zhangwen. Akaike's information criterion and its significance[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 1980(3): 64–72.
- [23] 蒋玫, 王云龙. 东海夏季日本鲭(*Scomber japonicus*)和鳀鱼(*Engraulis japonicus*)鱼卵仔鱼分布特征[J]. *海洋与湖沼*, 2007, 38(4): 351–355.
- Jiang Mei, Wang Yunlong. Summer distributions of eggs and larvae of *Scomber japonicus* and *Engraulis japonicus* in the East China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, 38(4): 351–355.
- [24] 宇佐美修造. 関東近海のマサバ資源[J]. 水産海洋研究会報, 1970(17): 119–129.
- Usami S. Chub mackerel in coastal waters of Kanto[J]. Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography, 1970(17): 119–129.
- [25] 深代邦明, 平本紀久雄. 三陸-伊豆諸島海域におけるマサバ太平洋系群の漁場形成と漁場環境[J]. 千葉県水産試験場研究報告, 1990(48): 19–36.
- Fukashiro K, Hiramoto K. The formation and environment of fishing ground in the Sanriku and Izu islands area[J]. Bulletin of Chiba prefectural Fisheries Research Center, 1990(48): 19–36.
- [26] 岡部久, 岩田静夫, 渡邊精一. 伊豆諸島海域におけるマサバの漁場間移動と海況変動および成熟の関わり[J]. 水産海洋研究, 2009, 73(1): 1–7.
- Okabe H, Iwata S, Watanabe S. Implication of effects of fluctuations in oceanographic condition and maturation process on migration of

- common mackerel (*Scomber japonicus*) in the fishing grounds around Izu Islands[J]. *Fisheries Oceanography*, 2009, 73(1): 1–7.
- [27] 王从军, 邹莉瑾, 李纲, 等. 1999—2011年东、黄海鲈资源丰度年间变化分析[J]. *水产学报*, 2014, 38(1): 56–64.
Wang Congjun, Zou Lijin, Li Gang, et al. Analysis of the inter-annual variation of chub mackerel abundance in the East China Sea and Yellow Sea during 1999–2011[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, 38(1): 56–64.
- [28] Yatsu A, Watanabe T, Ishida M, et al. Environmental effects on recruitment and productivity of Japanese sardine *Sardinops melanostictus* and chub mackerel *Scomber japonicus* with recommendations for management[J]. *Fisheries Oceanography*, 2005, 14(4): 263–278.
- [29] 曾萬年, 平野敏行. 相模湾におけるサバ類の生活実態と環境との関係[J]. *水産海洋研究会報*, 1979(34): 14–21.
Zeng Wannian, Hirano T. Fishery of mackerels with reference to oceanographic conditions in the coastal waters of Sagami Bay[J]. *Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography*, 1979(34): 14–21.
- [30] 小川嘉彦, 平井光行, 安田一郎. 親潮第1貫入の変動とその水産生物への影響[J]. *東北区水産研究所研究報告*, 1987(49): 1–15.
Ogawa Y, Hirai M, Yasuda I. Fluctuations of the first oyashio intrusion and its influences on coastal fishery-resource[J]. *Bulletin of Tohoku National Fisheries Research Institute*, 1987(49): 1–15.
- [31] Caramantin-Soriano H, Vega-Perez L A, Ñiquen M. The influence of the 1992–1993 El Niño on the reproductive biology of *Scomber japonicus peruanus* (Jordán & Hubb, 1925)[J]. *Brazilian Journal of Oceanography*, 2009, 57(4): 263–272.

Establishment of forecasting model of the abundance index for chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the northwest Pacific Ocean based on GAM

Wu Shengnan^{1,2}, Chen Xinjun^{1,2,3,4,5}, Liu Zhu'nan¹

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China; 3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 5. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

Abstract: Chub mackerel (*Scomber japonicus*) is one of the important fishery resources in the northwest Pacific Ocean. Building a scientific forecast model of abundance index to this species is beneficial for its exploitation and utilization. In this study, based on the biomass data of the Pacific-cohort of *Scomber japonicus* during 1987–2012 obtained from Japan Fisheries Institution, as well as the marine environmental data and climatic data of spawning ground and fishing ground, we analyzed the relationship between the environmental and climatic factors and the biomass of this cohort. The significant factors were selected and the forecast models were established by using the generalized additive models (GAM). The result shows the significant factors affecting the biomass of this cohort conclude the Arctic Oscillation index (AOI), Pacific Decadal Oscillation index (PDOI) and sea surface height (SSH2), sea surface salinity (SSS2) and sea surface temperature (SST2) both in the fishing ground. Result based on Akaike's Information Criterion (AIC) suggests that the model 1 which included AOI, SSH2 and SST2 has the optimal model impacts. The model 1 passes the significant test ($P < 0.05$) and the t test ($P < 0.05$) is also passed based the validation result of model 1. Therefore, we suggest that this model can be used to forecast the abundance of the Pacific-cohort of *Scomber japonicus*.

Key words: chub mackerel (*Scomber japonicus*); the Pacific-cohort; environmental factors; climatic factors; GAM models