不同环境模态下空间分辨率对北太平洋柔鱼 CPUE 标准化的影响

魏广恩[1], 陈新军[1, 2, 3, 4, 5]

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266071; 3. 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; 4. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 5. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室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: 单位捕捞努力量渔获量(catch per unit effort, CPUE)常被假设与渔业资源量成正比而被应用于渔业资源评估与管理中, 不同的环境模态下, 所选取的空间分辨率对 CPUE 的标准化会产生影响, 从而影响对该渔业资源丰度的评价。本研究运用广义加性模型(generalized additive model, GAM), 对中国在北太平洋鱿钓渔业数据进行 CPUE 标准化。根据北太平洋环境的差异, 以 160°E 为界将其划分为不同的环境模态。分别对两种模态下 3 种空间尺度(0.25°×0.25°、0.5°×0.5°、1°×1°)的名义 CPUE 进行标准化, 得到各自的最适 GAM 模型。比较不同环境模态下, 各因素对 CPUE 标准化产生的影响; 相同环境模态下, 不同空间尺度对 CPUE 标准化产生的影响。结果表明: 不同环境模态下, 对 CPUE 标准化产生影响的变量差异较大: 160°E 以西海域分别为年、纬度、SST 以及交互项年与纬度、月与纬度; 160°E 以东海域分别为纬度、年与纬度的交互项、月与纬度的交互项。同一环境模态下, 不同的空间尺度最适 GAM 模型对 CPUE 标准化结果不同, 根据均方误差选取 0.5°×0.5°和 0.25°×0.25°分别为 160°E 东、西海域 CPUE 标准化的最适空间尺度。因此, 在对北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)商业性渔获数据进行标准化时, 需要考虑因不同的环境模态以及不同的空间尺度而导致的 CPUE 标准化所出现的差异。

关键词: 北太平洋; 柔鱼(*Ommastrephes bartramii*); 广义加性模型; CPUE 标准化; 空间分辨率

中图分类号: S937 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-3096(2021)04-0147-12

DOI: 10.11759/hykx20190722003

为确保渔业资源的可持续利用, 需要对渔业资源进行合理的资源评估, 从而为实施科学管理提供决策。由于通过科学调查所获得渔业数据相对较缺乏, 商业性的渔业数据成为渔业资源评估数据的主要来源[1]。渔业上, 单位捕捞努力量渔获量(catch per unit effort, CPUE)常被假设与资源量成正比[2], 并广泛应用于渔业资源评估和管理[2-4]。已有研究表明[1, 4-5], CPUE 与资源量之间的正比关系常受到众多因素的影响, 影响因素主要有捕捞能力(渔船吨位和马力, 渔具, 助渔设备等)、时间、空间要素(年、月、经度、纬度)和环境条件(海表面温度、叶绿素浓度、海流、溶解氧等)。为能有效利用 CPUE 数据, 需对其进行标准化, 以排除相关影响, 重新构建 CPUE 与资源量之间的正比关系, 使之真实反映渔业资源的变化, 而未排除影响因素的 CPUE 称为名义 CPUE[6]。目前很多统计方法被用于 CPUE 的标准化, 包括广义线性模型[3]、广义加性模型[7]、回归树方法[8]以及基于栖息地[9-10]和神经网络[11]的 CPUE 标准化。以往的 CPUE 标准化研究的重点主要集中在模型的选择: 包括模型变量[3]、模型误差结构[12]和统计模型的类型[11]的选择, 而忽略鱼类的生活习性以及渔业的作业模式对渔业数据的影响。

北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)渔业在不同海域的作业模式和分布特点存在差异, 这主要

收稿日期: 2019-07-22; 修回日期: 2019-12-10

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD0901404); 国家自然科学基金面上项目(NSFC41876141); 上海市科技创新行动计划(10DZ1207500) [Foundation: National Key Research and Development Plan, No. 2019YFD0901404; National Natural Science Foundation of China, No. NSFC41876141; Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan, No.10DZ1207500]

作者简介: 魏广恩(1991—), 男, 安徽淮南人, 研究生, 主要从事渔业资源研究, E-mail: wge1991@163.com; 陈新军(1967—), 通信作者, E-mail: xjchen@ shou.edu.cn

是由柔鱼自身的生活习性和捕捞行为引起。柔鱼是一种具有生态机会主义的大洋性种类，广泛分布在北太平洋海域，极易受环境的影响[13]。西北太平洋海域因黑潮暖流和亲潮寒流的交汇以及黑潮势力的强弱、路径变化，使得该海域的环境与东部和中部太平洋海域差异较大，也因此造成西北太平洋和中东太平洋柔鱼的种群分布和洄游模式存在差异[14-15]。而西北太平洋海域，因柔鱼种群资源丰度和集群性较高，渔船通过现代科技寻找渔场并相互联系，使得作业渔船趋于集中，从而造成局部海域渔船数量占总作业渔船数量的 50%~80%，该现象主要出现在西北太平洋海域。中东部海域，柔鱼分布海域较广，相对分散，很难形成较大渔场，作业渔船不易形成大规模聚集现象[15]，导致不同海域的作业模式出现差异。因此，本研究利用广义加性模型，结合太平洋海域的海洋环境和柔鱼在不同海域的分布、洄游以及作业渔船的分布特点，以 160°E 为分界线，将北太平洋分为东、西模态，分别研究不同环境模态下，不同的空间尺度对 CPUE 标准化的影响，找出 160°E 从东、西海域 CPUE 标准化的最适空间尺度。

1 材料和方法

1.1 数据来源

1.1.1 渔业数据

渔业数据来源于中国远洋渔业分会上海海洋大学鱿钓技术组建立的北太平洋柔鱼生产数据库，时间跨度为 2004 年—2015 年，空间范围为 36°N~46°N、140°E~180°E。数据字段包括日期、经度、纬度、产量、作业次数。

1.1.2 环境数据

环境数据包括海表面温度(sea surface temperature, SST)和叶绿素浓度(chlorophyll-a, *chl-a*)，数据来源于 NOAA(http://pifsc-oceanwatch.irc.noaa.gov/erddap/griddap/index.html)，时间跨度为 2004 年—2015 年，时间尺度为月，空间范围为 36°N~46°N、140°E~180°E。海表面温度和叶绿素浓度的空间尺度分别包括 0.25°×0.25°、0.5°×0.5°和 1°×1° 3 种。

1.2 方法

1.2.1 CPUE 计算

CPUE 定义为每艘船每天的捕捞产量，则第 i 年、j 月、k 经度、l 纬度的平均 CPUE 为:

$$CPUE_{i,j,k,l}=\frac{\sum Catch_{i,j,k,l}}{\sum E_{i,j,k,l}}, \tag{1}$$

式中，$\sum Catch_{i,j,k,l}$ 为第 i 年、j 月内，k 经度、l 纬度总产量，$\sum E_{i,j,k,l}$ 为对应的总作业次数。按照此方法分别计算 0.25°×0.25°、0.5°×0.5°和 1°×1° 3 种空间尺度下的平均 CPUE。将上述 3 种空间尺度下的 CPUE 根据经、纬度和时间的一致性与环境数据进行匹配。

1.2.2 统计模型

GAM 模型是一种非参数化的多元线性分析回归模型，是 GLM 模型的延伸。相对于传统的回归模型，GAM 模型在分析资源丰度与环境的空间关系上提供更多的信息，可以用来表示响应变量和解释变量的非线性关系，即 CPUE 与其他变量之间的非线性关系。函数关系为:

$$g\left(\mu_i\right)=\alpha+\sum_{i=1} f_i\left(x_i\right)+\varepsilon_i, \tag{2}$$

式中，g 为链接函数，$\mu_i = E(Y_i)$，x_i 为第 i 个响应变量的解释变量，Y_i 为第 i 个响应变量，f_i 为平滑函数，α 为适合函数中的截距，ε 为残差。本研究假设 CPUE 服从对数正态分布，因此，GAM 模型表示为:

$$\begin{aligned}Ln(CPUE_{i,j,k,l}+\mathrm{c})=&\ s(year_i)+s(month_j)+s(lon_k)+\\&s(lat_l)+s(SST)+s(chl\text{-}a)+\\&(Interactions),\end{aligned} \tag{3}$$

式中，CPUE 为每艘船每天的捕捞产量，c 为常数项，$year_i$ 为年，$month_j$ 为月，lon_k 为经度，lat_l 为纬度，*SST* 为海表面温度(℃)，*chl-a* 为叶绿素浓度(mg/m^3)，*Interactions* 表示时间和空间解释变量的交互效应，*s* 为样条平滑(spline smoother)。GAM 模型中，将时间(年、月)、空间(经度、纬度)、环境(*SST*、*chl-a*)因素作为解释变量，其中年、月、经度、纬度为分类离散变量，其他变量为连续变量。CPUE 加上常数 c(取 1)，再作对数变换后，作为响应变量，以解决 CPUE 为零的情况[16-17]。

模型因子的选择根据因子的显著性水平(*P*)，分别选择不同环境模态各空间尺度下 GAM 模型的解释变量，依次加入 GAM 模型中，得到包含不同个数解释变量的 GAM 模型。根据赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)，选取 AIC 值最小的为该模态空间尺度下的最适模型[18]。AIC 值得计算方法见式:

$$AIC=-2\ln l\left(p_1,\cdots,p_m,\sigma^2\right)+2m, \tag{4}$$

式中，m 为方程中参数的个数。分别用上述 3 种空间

尺度下的 CPUE 数据输入 GAM 模型进行 CPUE 标准化，模型的计算通过 R 语言统计软件来实现。

1.2.3 标准化 CPUE 的比较

对上述不同环境模态 3 种空间尺度下的 6 种模型，分别计算同一环境模态各空间尺度的最适 GAM 模型的均方误差(mean squared error, MSE)，作为判断该环境模态下最适空间尺度的标准。

$$\mathrm{MSE}=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left(y_k-\hat{y}_k\right)^2, \tag{5}$$

式中，y_k 为 CPUE 的实际值，$\hat{y}_k$ 为 CPUE 的预报值。比较不同环境模态下，模型对 CPUE 标准化的差异；相同环境模态下，空间尺度的不同对 CPUE 标准化造成的影响。

2 结果

2.1 3 种空间尺度下作业渔场的空间分布

从图 1 可以看出，3 种空间尺度下，作业渔场的分布模式存在差异：160°E 以西海域，作业渔场覆盖范围均匀、密集，160°E 以东海域相对分散。随着空间尺度变大，作业渔场覆盖海域明显变大，160°E 以东海域更为显著。空间尺度的改变，对应的小渔区的 CPUE 的值也会改变，相应的依据经、纬度和时间的一致性进行匹配的环境数据也会改变，从而对 CPUE 的标准化造成影响。

2.2 响应变量 Ln(CPUE+1)的统计分布检验

K-S 检验可以看出，Ln(CPUE+1)趋向于服从正态分布(表 1 和图 2-a_1、a_3、b_1、b_3、c_1、c_3)，Ln (CPUE+1)的数据点在正态 q-q 中，都基本形成一条直线(图 2-a_2、a_4、b_2、b_4、c_2、c_4)，说明 Ln (CPUE+1)服从正态分布。结果表明，本研究关于 Ln (CPUE+1)服从正态分布的假设是合理的。

2.3 解释变量的显著性检验

以 $P\leqslant 0.01$ 来确认解释变量是否具有显著性，t 检验的结果表明 160°E 东、西海域，显著性变量差异较大。

160°E 以西海域：空间尺度为 0.25°×0.25°时，除月为不显著变量，对 CPUE 影响不显著($P>0.01$)，其余均为显著性变量，对 CPUE 的影响为极显著($P\leqslant 0.01$)。空间尺度为 0.5°×0.5°时，月、经度、年*经度为不显著变量。空间尺度为 1°×1°时，月、经度、年*经度、月*经度为不显著变量(表 2)。

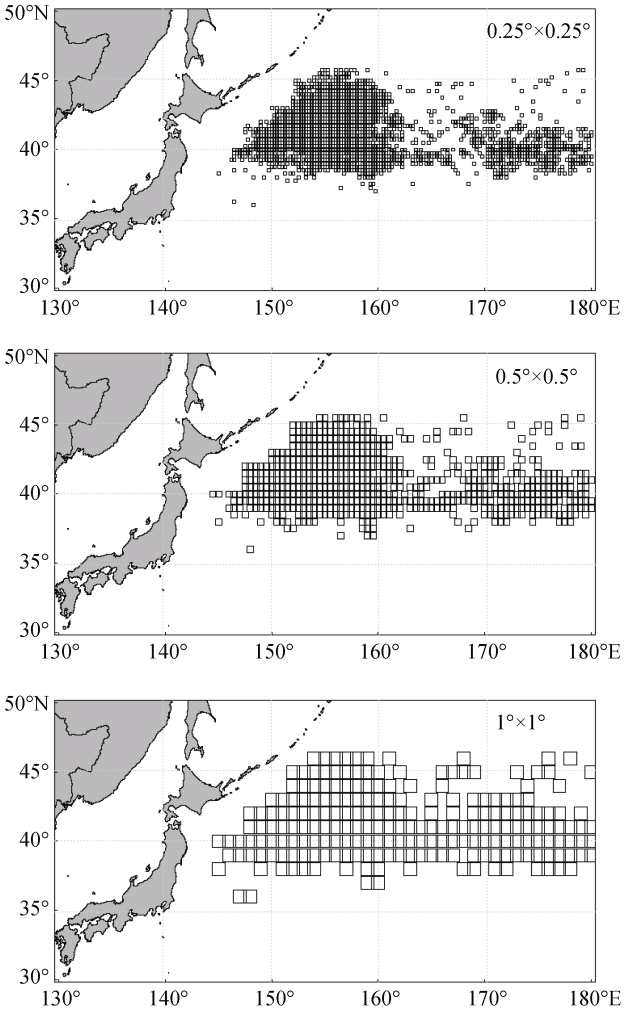

图 1 2004—2015 年北太平洋柔鱼作业渔场分布

Fig. 1 The distribution of fishing grounds for *O.batramii* in the North Pacific Ocean during 2004-2015

表 1 Ln(CPUE+1)的统计分布

Tab. 1 Statistical distribution of ln(CPUE+1)

	a_1	a_3	b_1	b_3	c_1	c_3
μ	1.00	0.67	0.99	0.63	0.97	0.66
σ	0.49	0.39	0.48	0.37	0.48	0.37

注：a、b、c 分别为 0.25°×0.25°、0.5°×0.5°、1°×1° 3 种空间尺度，1 和 3 分别为 160°E 以西海域和 160°E 以东海域

160°E 以东海域：空间尺度为 0.25°×0.25°时，纬度、年*纬度，月*纬度为显著性变量，对 CPUE 的影响为极显著($P\leqslant 0.01$)，其余均为不显著变量，对 CPUE 影响不显著($P>0.01$)。空间尺度为 0.5°×0.5°时，仅月、纬度、年*纬度、月*纬度为显著变量。空间尺度为 1°×1°时，仅纬度、SST、年*纬度为显著变量(表 2)。

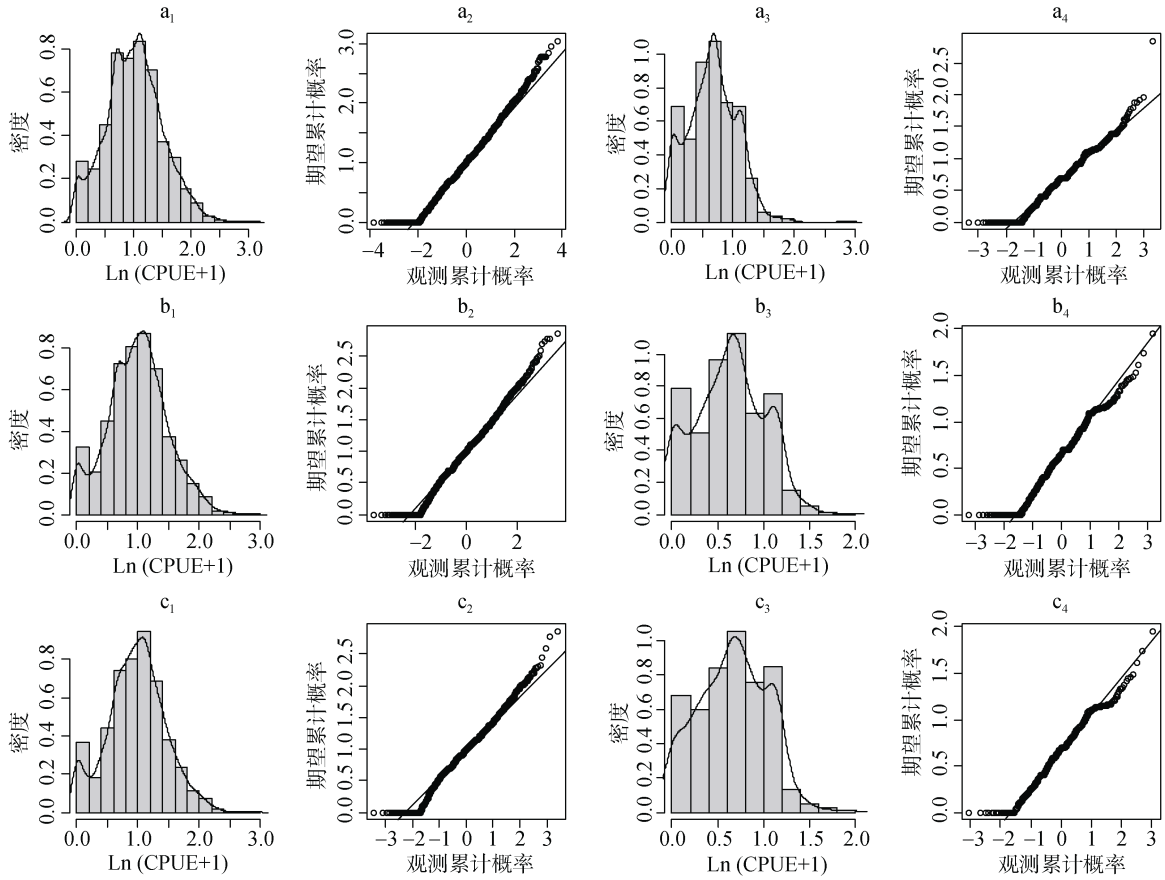

图 2　2004 年—2015 年北太平洋柔鱼 Ln(CPUE+1)的频次分布及其检验

Fig. 2　The Ln(CPUE+1) distributions for *O.batramii* in the North Pacific Ocean from 2004 to 2015 and its distribution tests

1 和 3 为 Ln(CPUE+1)的频次分布; 2 和 4 为 Ln(CPUE+1)的正态 q-q 图; a、b、c 分别为 0.25°×0.25°、0.5°×0.5°、1°×1° 3 种空间尺度; 1 和 2 为 160°E 以西海域, 3 和 4 为 160°E 以东海域; 密度、期望累计概率和观测累计概率均为无量纲数

a, b, c are 0.25°×0.25°, 0.5°×0.5°, 1°×1° 1 and 3 frequency distribution of Ln(CPUE + 1); 2 and 4 normal q–q plot of Ln(CPUE + 1); three kinds of space scales, respectively. 1 and 2 are the waters west of 160°E, 3 and 4 are the waters east of 160°E; Density, expected cumulative probability and observed cumulative probability are dimensionless numbers

表 2　解释变量显著性检验

Tab. 2　The significance test of explained variables

海域	解释变量	0.25°×0.25°		0.5°×0.5°		1°×1°	
		t 值	*P* 值	*t* 值	*P* 值	*t* 值	*P* 值
160°E 以西海域	无效	–5.764 0	0.000 0	–3.933 0	0.000 1	–3.380 0	0.000 7
	年	5.710 0	**<0.001**	3.903 0	**<0.001**	3.368 0	**<0.001**
	月	2.386 0	0.017 1	0.894 0	0.371 6	–0.169 0	0.865 5
	经度	4.387 0	**<0.001**	2.282 0	0.022 6	1.465 0	0.143 1
	纬度	3.168 0	**<0.01**	3.571 0	**<0.001**	3.950 0	**<0.001**
	海表面温度	9.279 0	**<0.001**	7.187 0	**<0.001**	5.796 0	**<0.001**
	叶绿素浓度	–3.449 0	**<0.001**	–3.680 0	**<0.001**	–2.955 0	**<0.01**
	年*纬度	–3.000 0	**<0.01**	–3.466 0	**<0.001**	–3.884 0	**<0.001**
	月*纬度	–11.236 0	**<0.001**	–6.816 0	**<0.001**	–3.694 0	**<0.001**
	年*经度	–4.425 0	**<0.001**	–2.308 0	0.021 0	–1.488 0	0.136 9
	月*经度	4.278 0	**<0.001**	3.083 0	**<0.01**	2.401 0	0.016 4

续表

海域	解释变量	0.25°×0.25°		0.5°×0.5°		1°×1°	
		t 值	*P* 值	*t* 值	*P* 值	*t* 值	*P* 值
160°E 以东海域	无效	2.140 0	0.032 6	2.074 0	0.038 5	1.930 0	0.054 3
	年	–2.122 0	0.034 0	–2.044 0	0.041 4	–1.914 0	0.056 3
	月	–1.379 0	0.168 3	–2.820 0	**<0.01**	–1.648 0	0.100 1
	经度	1.429 0	0.153 2	0.173 0	0.862 9	0.099 0	0.921 6
	纬度	–3.735 0	**<0.001**	–2.814 0	**<0.01**	–2.764 0	**<0.01**
	海表面温度	1.385 0	0.166 4	1.890 0	0.059 2	3.592 0	**<0.001**
	叶绿素浓度	–1.791 0	0.073 6	–1.120 0	0.263 2	–0.188 0	0.851 2
	年*纬度	3.696 0	**<0.001**	2.777 0	**<0.01**	2.742 0	**<0.01**
	月*纬度	3.205 0	**<0.01**	3.291 0	**<0.01**	1.931 0	0.054 2
	年*经度	–1.424 0	0.154 9	–0.187 0	0.851 8	–0.106 0	0.915 7
	月*经度	–0.936 0	0.349 7	1.061 0	0.289 0	0.627 0	0.530 9

注：加粗字体为显著性解释变量，“*”．交互项。

2.4 GAM 模型分析及最优模型选择

将上述在不同环境模态下各空间尺度对 CPUE 的影响为极显著(P≤0.01)的解释变量或交互项逐一加入到 GAM 模型中，比较同一环境模态下相同空间的尺度各模型的 AIC 值(表 3)。确定不同环境模态下各空间尺度的最优 GAM 模型。

表 3 GAM 模型的 R^2 和 AIC 值
Tab. 3 R^2 and AIC values of the GAM model

海域	解释变量	0.25°×0.25°		0.5°×0.5°		1°×1°	
		R^2	AIC	R^2	AIC	R^2	AIC
160°E 以西海域	年	0.125 1	10 124.63	0.097 6	4 508.71	0.085 6	2 009.81
	经度	0.158 0	9 825.13	NA	NA	NA	NA
	纬度	0.213 8	9 284.62	0.170 0	4 223.13	0.172 0	1 859.33
	海表面温度	0.252 5	8 888.69	0.227 8	3 971.37	0.236 7	1 729.37
	叶绿素浓度	0.253 2	8 885.22	0.231 6	3 961.47	0.239 5	1 724.20
	年*经度	0.267 0	8 738.96	NA	NA	NA	NA
	年*纬度	0.318 4	8 179.04	0.237 1	3 934.57	0.256 9	1 692.37
	月*经度	0.334 6	8 012.20	0.267 1	3 821.09	NA	NA
	月*纬度	0.349 8	7 854.23	0.274 8	3 794.14	0.274 1	1 666.89
160°E 以东海域	月	NA	NA	0.166 7	496.89	NA	NA
	纬度	0.212 354	841.669 2	0.208 4	464.65	0.172 0	290.13
	海表面温度	NA	NA	NA	NA	0.217 8	270.73
	年*纬度	0.298 066	714.466	0.310 1	371.90	0.263 9	249.27
	月*纬度	0.348 573	649.032 2	0.349 0	345.77	NA	NA

选取 AIC 值最小，R^2 最大的模型为该环境模态下对应空间尺度的最适模型，则各空间尺度最适模型的选择如表 4 所示。各模型对 CPUE 总偏差的解释：160°E 以西海域各空间尺度分别为 35.9%、28.7%、28.7%；160°E 以东海域各空间尺度分别为 36.4%、37.6%、28.5%(表 4)。

表 4　160°E 东、西海域不同空间尺度的最适 GAM 模型

Tab. 4　Selection of the goodness-of-fit statistics for the GAM model for waters west and east of 160°E under different space scales

海域	空间尺度	最适 GAM 模型	解释偏差/%
160°E 以西海域	0.25°×0.25°	$\mathrm{Ln}(CPUE_{i,j,k,l}+1) = s(year_i) + s(lon_k) + s(lat_l) + s(SST) + s(chl\text{-}a) + s(year_i, lon_k) + s(year_i, lat_l) + s(month_j, lon_k) + s(month_j, lat_l)$	35.9
	0.5°×0.5°	$\mathrm{Ln}(CPUE_{i,j,k,l}+1) = s(year_i) + s(lat_l) + s(SST) + s(chl\text{-}a) + s(year_i, lat_l) + s(month_j, lat_l) + s(month_j, lon_k)$	28.7
	1°×1°	$\mathrm{Ln}(CPUE_{i,j,k,l}+1) = s(year_i) + s(lat_l) + s(SST) + s(chl\text{-}a) + s(year_i, lat_l) + s(month_j, lat_l)$	28.7
160°E 以东海域	0.25°×0.25°	$\mathrm{Ln}(CPUE_{i,j,k,l}+1) = s(lat_l) + s(year_i, lat_l) + s(month_j, lat_l)$	36.4
	0.5°×0.5°	$\mathrm{Ln}(CPUE_{i,j,k,l}+1) = s(month_j) + s(lat_l) + s(year_i, lat_l) + s(month_j, lat_l)$	37.6
	1°×1°	$\mathrm{Ln}(CPUE_{i,j,k,l}+1) = s(lat_l) + s(SST) + s(year_i, lat_l)$	28.5

不同环境模态下各空间尺度最适 GAM 模型的残差拟合图如图 3 所示，6 种模型的残差和拟合值之间没有明显的关系，表明上述 6 种最适 GAM 模型均可较好地拟合数据。

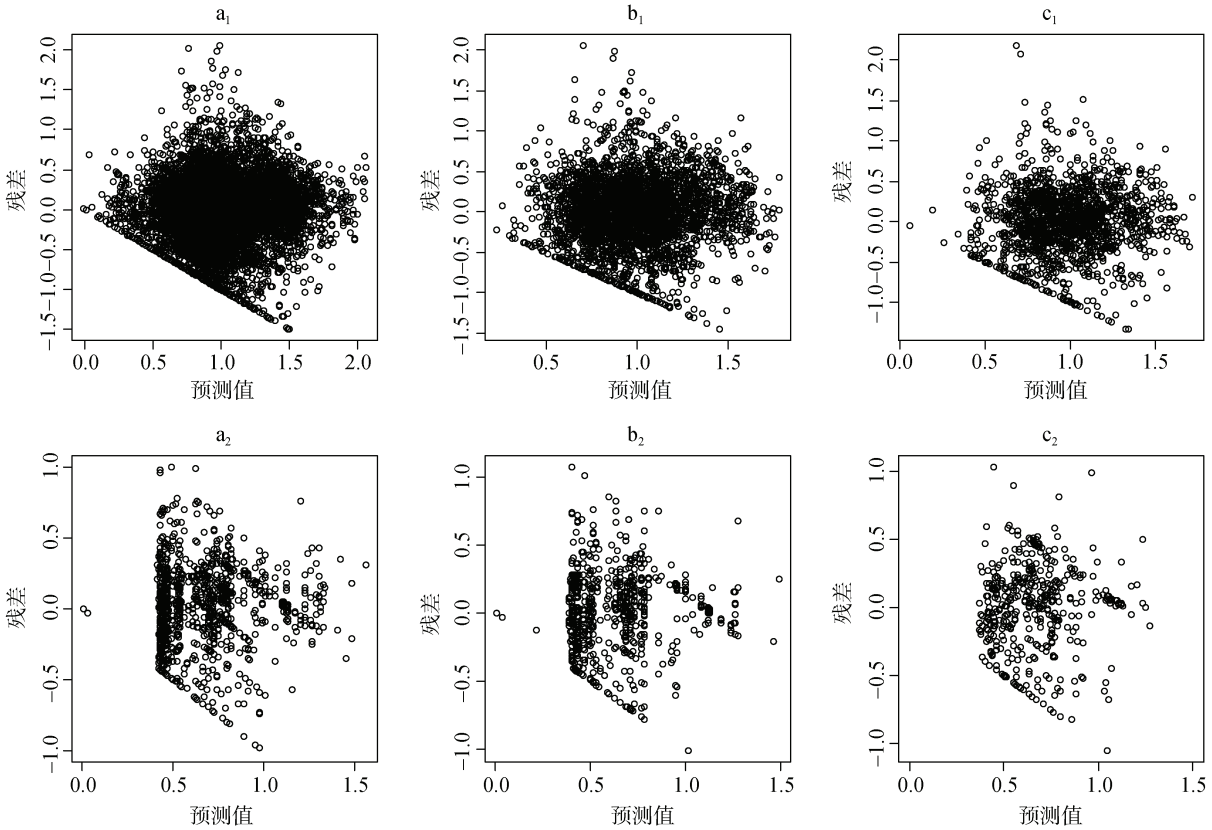

图 3　最适 GAM 模型残差图

Fig. 3　Residual figure of the goodness-of-fit statistics for the GAMs model

a、b、c 分别为 0.25°×0.25°、0.5°×0.5°、1°×1° 3 种空间尺度，1 和 2 分别为 160°E 以西海域和 160°E 以东海域

a, b, c are 0.25°×0.25°, 0.5°×0.5°, 1°×1° three kinds of space scales, respectively. 1 and 2 are the waters of west and east 160°E, respectively

2.5　解释变量对 CPUE 的影响

不同环境模态下各空间尺度最适模型中的解释变量，对总偏差的解释如图 4 所示。结果表明：不同环境模态下，同一空间尺度，解释变量对 CPUE 的影响差异较大，相同环境模态下，不同空间尺度，解释变量对 CPUE 的影响差异较小。

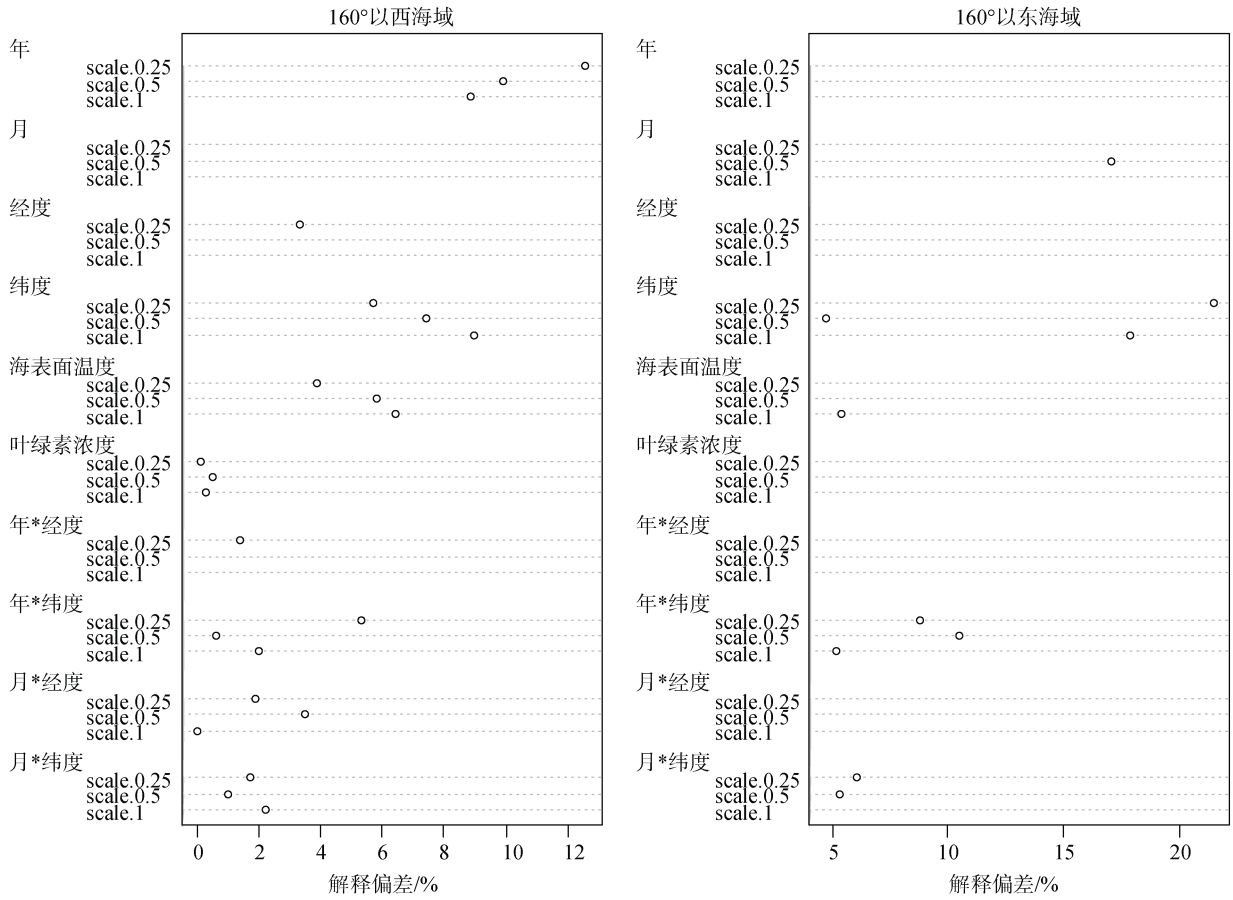

图 4　最优 GAM 模型中各解释变量对模型的解释偏差

Fig. 4　Explained deviation of each explained variable in the goodness-of-fit statistics for the GAMs model

160°E 以西海域, 各空间尺度下, 变量对 CPUE 的影响较大的主要是年、纬度、海表面温度, 叶绿素浓度对 CPUE 的影响均为最弱。0.25°×0.25°空间尺度下, 变量对 CPUE 的影响强弱依次是年(12.6%)、纬度(5.7%)、年和纬度交互项(5.3%)、SST(3.9%)、经度(3.3%), 其余变量影响较弱; 0.5°×0.5°空间尺度下, 变量对 CPUE 的影响强弱依次是年(9.89%)、纬度(7.41%)、SST(5.8%)、月和经度交互项(3.5%), 其余变量影响较弱; 1°×1°空间尺度下, 变量对 CPUE 的影响强弱依次是纬度(8.96%)、年(8.84%)、SST(6.4%), 其余变量影响较弱。

160°E 以东海域, 各空间尺度下, 变量对 CPUE 的影响较大的主要是纬度、月、年和纬度的交互项。0.25°×0.25°空间尺度下, 变量对 CPUE 的影响强弱依次是纬度(21.5%)、年和纬度交互项(8.8%)、月和纬度的交互项(6.1%); 0.5°×0.5°空间尺度下, 变量对 CPUE 的影响强弱依次是月(17.1%)、年和纬度的交互项(10.5%)、月和纬度的交互项(5.3%), 纬度(4.7%); 1°×1°空间尺度下, 变量对 CPUE 的影响强弱依次是纬度(17.9%)、SST(5.4%)、年和纬度的交互项(5.2%)。

2.6　标准化 CPUE 的比较

根据最适模型选择的结果, 运用该模型分别计算不同环境模态下各空间尺度的标准化 CPUE。计算各最适模型的均方误差, 结果表明: 160°E 以西海域, 3 种空间尺度下, 0.25°×0.25°对应的最适 GAM 模型的均方误差最小; 160°E 以东海域, 0.5°×0.5°对应的最适 GAM 模型的均方误差最小(表 5)。可分别将对应的空间尺度作为该环境模态下 CPUE 标准化的最适尺度。

表 5　最适 GAM 模型的均方误差

Tab. 5　Mean squared error of the goodness-of-fit statistics for the GAM model

空间尺度	均方误差		
	0.25°×0.25°	0.5°×0.5°	1°×1°
160°E 以西海域	1.9286	2.0671	2.2119
160°E 以东海域	0.6663	0.3665	0.4568

名义 CPUE 以及各模型对应的标准化 CPUE 如图 5 所示。从图 5 可以看出，不同的环境模态(160°E 东、西海域)，名义 CPUE 之间存在差异，表明北太平洋中东部海域和西部海域柔鱼资源丰度不同，且西部海域的柔鱼资源丰度明显优于中东部海域。不同空间尺度下的名义 CPUE 存在差异(图 5)。6 种模型得出的年标准化 CPUE 均低于名义 CPUE(160°E 以西海域 2006 年、2009 年、2014 年除外; 160°E 以东海域 2009 年、2010 年、2012 年和 2014 年除外)，且年际变动较小，表明各模型标准化在一定程度上排除了时间、空间和其他海洋环境因素对 CPUE 的影响。

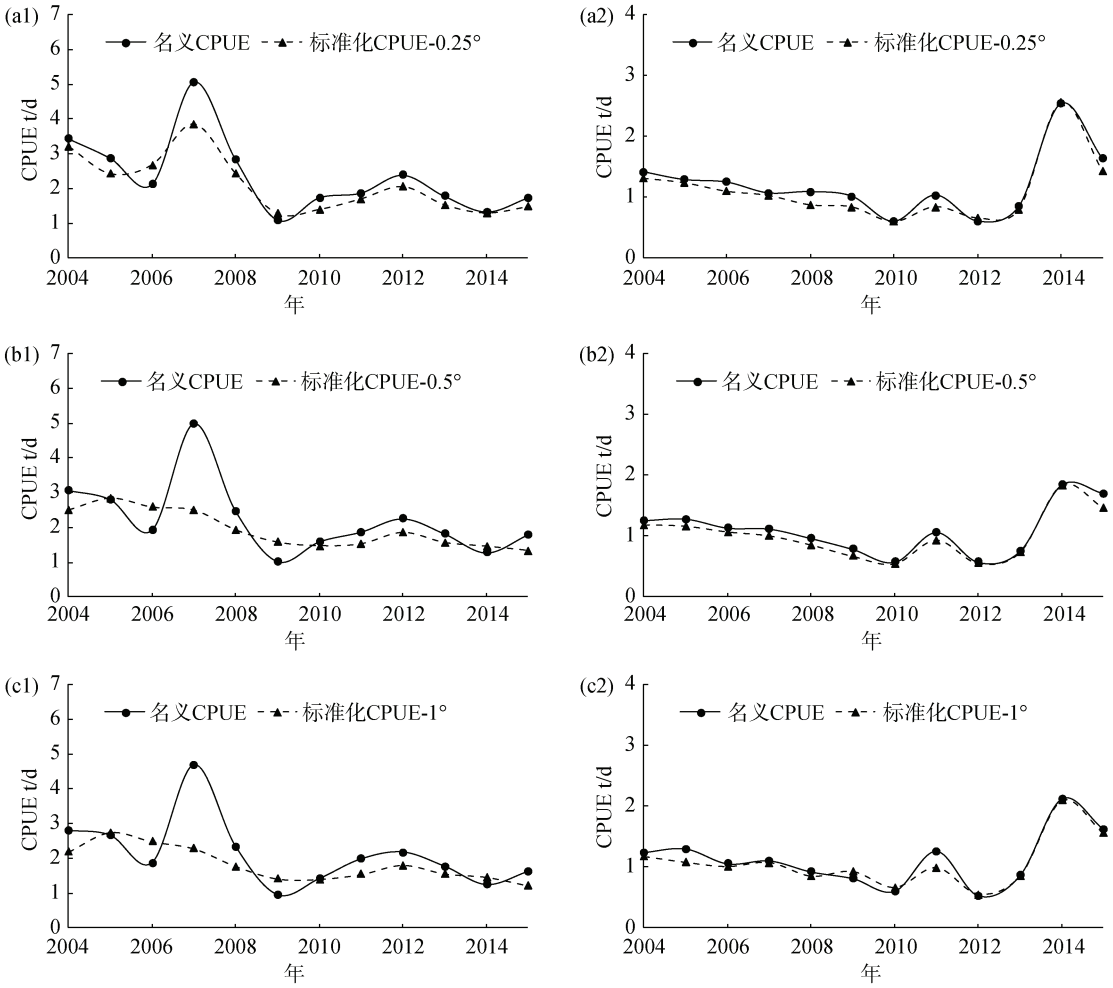

图 5　最优 GAM 模型年标准化 CPUE

Fig. 5　Annual standardized CPUEs derived from the goodness- of-fit statistics for the GAMs model

a、b、c 分别为 0.25°×0.25°、0.5°×0.5°、1°×1° 3 种空间尺度; 1 和 2 分别为 160°E 以西海域和 160°E 以东海域

a, b, c are 0.25°×0.25°, 0.5°×0.5°, 1°×1° three kinds of space scales, respectively, 1 and 2 are the waters west and east of 160°E, respectively

160°E 以西海域, 2004 年—2009 年名义 CPUE 波动较大，各标准化 CPUE 相对平稳, 2010 年—2015 年各模型的标准化 CPUE 的波动趋势和名义 CPUE 的基本一致。0.25°空间尺度下的标准化 CPUE 的波动趋势和名义 CPUE 更吻合，而 0.5°和 1°空间尺度下的标准化 CPUE 与名义 CPUE 在 2004 年—2009 年的波动趋势存在差异，在 2010 年—2015 年基本一致。最低名义年标准化 CPUE 出现在 2009 年，最高出现在 2007 年，与 0.25°空间尺度下年标准化 CPUE 一致，而 0.5°和 1°空间尺度下最低和最高年标准化 CPUE，均出现在 2015 年和 2005 年。

160°E 以东海域的名义 CPUE 和各模型的标准化 CPUE 的波动趋势基本一致。最低名义年 CPUE 出现在 2010 年，最高出现在 2014 年，与 0.25°和 0.5°空间尺度下年标准化 CPUE 一致，而 1°空间尺度下最低和最高年标准化 CPUE，分别出现在 2012 年和 2014 年。

3 讨论

北太平洋海域柔鱼资源及其时空分布，因受到环境因素的影响及其自身的洄游特性，造成了资源分布在时间和空间上的变动[19]。捕捞量的年间变化主要受到柔鱼资源量和渔船的空间分布的影响，以及环境变动的影响[20-21]。而北太平洋中东部和西部海域的环境存在明显差异[14]，同样会造成柔鱼资源的空间分布模式不同。随着渔业技术的现代化发展，鱿钓渔船的马力、探鱼和诱鱼设备以及船队之间的通讯技术有着明显的提升，作业渔船会根据渔场的分布而出现响应性聚集，渔船的作业海域会随着鱼群的分布出现变动。因此，本研究中对北太平洋不同环境模态 160°E 从东、西海域的 CPUE 标准化进行研究。影响 CPUE 标准化的因素很多，本研究以 GAM 模型对北太平洋柔鱼渔业 CPUE 进行标准化时，只考虑了时间、空间、环境因子以及时间和空间的交互项，而忽略部分其他因子。其一是数据的可获取性，其二是本研究主要目的在于分析不同的环境模态及空间尺度对 CPUE 标准化的影响。

研究中，通过解释变量的显著性作为筛选条件，根据 AIC 值选取不同环境模态和不同空间尺度下的最适 GAM，得到各自的最适模型，最适模型的构建彼此间存在差异。各解释变量对模型的解释偏差研究结果表明：不同的环境模态下，对 CPUE 标准化产生影响的解释变量差异较大。160°E 以西海域，年、纬度、SST 以及交互项年与纬度、月与纬度在影响西北太平洋柔鱼渔业 CPUE 标准化方面起着重要作用；变量年随着空间尺度的增大，对 CPUE 的影响逐渐减小。变量纬度和 SST 对 CPUE 的影响随着空间尺度的增加而逐渐变大，这与西北太平洋柔鱼的洄游特点一致。西北太平洋柔鱼从产卵场向北洄游至索饵场，后向南洄游至产卵场。整个过程遵循柔鱼的洄游模式，在环境因素的作用下，柔鱼资源补充量进入渔场的时间和纬度都会受到影响，形成资源量及其分布的年间差异。随着空间尺度的增大，渔区所包括的海域面积增加，各渔区所包含的环境信息增多。相同海域，用于匹配名义 CPUE 的环境指标因空间尺度的不同而出现差异。以 SST 为例，在不同的空间尺度下，相同海域用于匹配名义 CPUE 的 SST 存在差异，且随着空间尺度的增大，用于表征各渔区 SST 间的差异增大，相邻渔区的 SST 差异也随之增大(图 6)。从标准化的结果，各解释变量对模型的解释偏差可以看出：SST 对 CPUE 标准化的影响随着空间尺度的增大而增大。渔区面积的增大，海域内所包含的柔鱼群落增加，柔鱼整体在纬度上洄游分布变动更加明显。故变量纬度对 CPUE 的影响随着空间尺度的增大而逐渐增大。160°E 以东海域，不同的空间尺度下，影响柔鱼渔业 CPUE 标准化的变量存在差异。主要是纬度、年与纬度的交互项、月与纬度的交互项对 CPUE 标准化产生重要影响。0.5°空间尺度下的变量月和 1°空间尺度下的变量 SST 会对 CPUE 标准化产生影响，但很难体现出规律性。其一，作业渔场分布分散，作业海域覆盖范围小，未作业海域柔鱼分布信息缺失。其二，分布在该海域的柔鱼较为复杂，包括冬春生群和秋生群，彼此间产卵、索饵和繁殖洄游特性不同，难以统一其变化规律。但不同的空间尺度下纬度都对 CPUE 的标准化产生重要影响。

CPUE 标准化的结果表明：不同环境模态下，各空间尺度的最适 GAM 模型对 CPUE 标准化的结果通常小于名义 CPUE，且年间波动变小，说明 6 种模型均可以在一定程度上排除时间、空间和其他海洋环境对 CPUE 标准化的影响。因不同环境模态下空间尺度的不同，输入模型的名义 CPUE 不同，即输入模型的样本数不同。由于 AIC 值的比较需要模型具有相同的样本量，因此将均方误差作为不同环境模态下最适空间尺度的筛选条件。结果表明：160°E 以西海域，最适空间尺度为 0.25°×0.25°；160°E 以东海域，最适空间尺度为 0.5°×0.5°。不同空间尺度的选择可以解决柔鱼作业渔船集中而导致 CPUE 标准化不准确的问题。由于寻找渔场的高效、灯光诱鱼效果明显和渔船之间的沟通便利，以及柔鱼自身具有集群的特性，渔船的聚集往往可以获得更好地渔获量。因此西北太平洋柔鱼的作业集中在较小的海域内[22-23]，名义 CPUE 适宜空间尺度的选取，可以在一定程度上降低渔船聚集对 CPUE 标准化的影响。160°E 从东、西海域空间尺度的选取与实际情况较为符合，160°E 以西海域，柔鱼资源丰度明显优于 160°E 以东海域，柔鱼资源相对集中，空间尺度越小，对于降低渔船聚集对 CPUE 标准化的影响效果越显著。160°E 以东海域柔鱼资源分布分散，很难形成大的渔场，渔船分布海域较为分散。渔船聚集效应影响较低，适宜空间尺度的选取对 CPUE 标准化影响较弱。故 160°E 从东、西海域，最适空间尺度分别为 0.5°×0.5° 和 0.25°×0.25°的结果适用于实际情况。

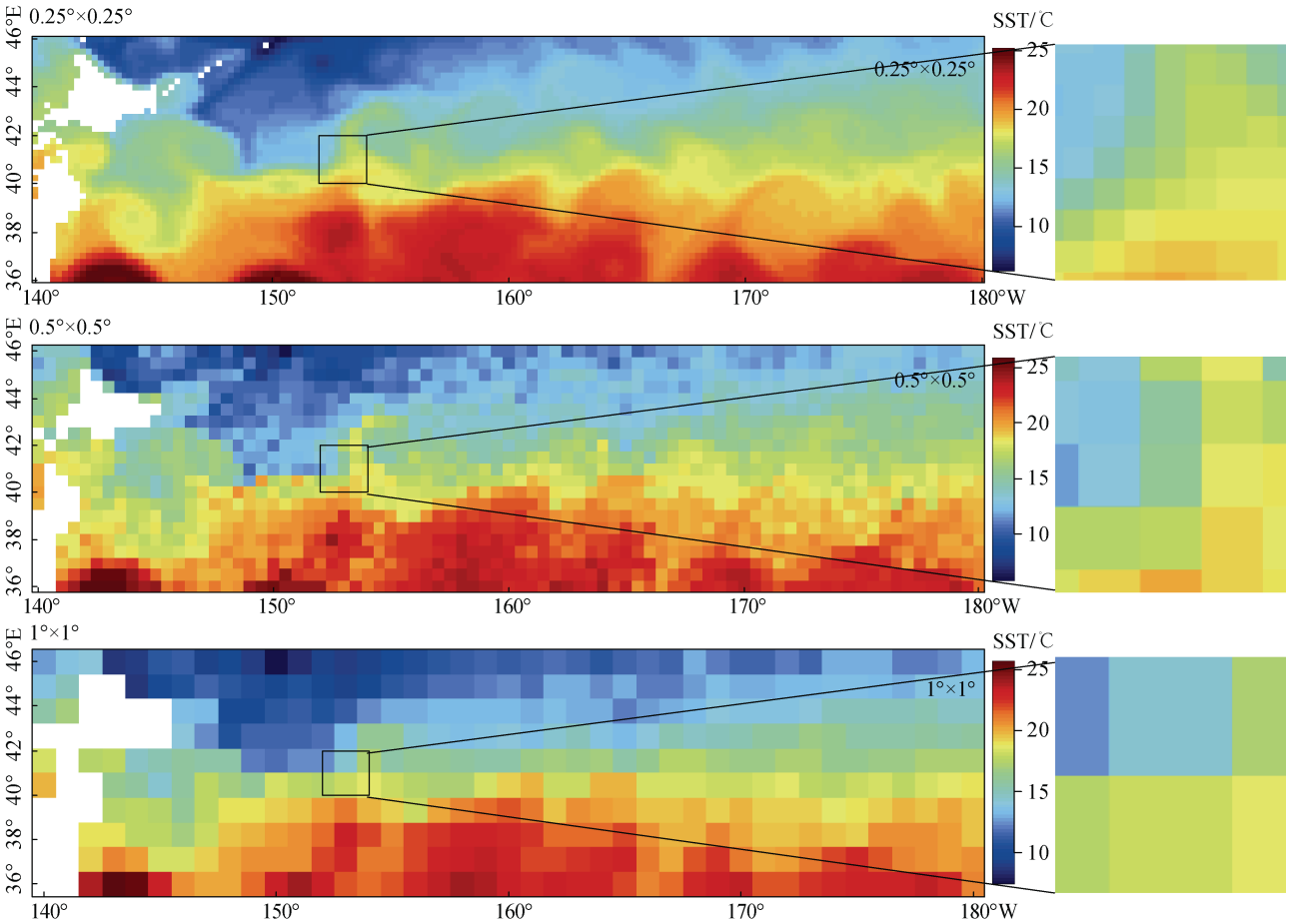

图 6　不同空间尺度下北太平洋 SST 的分布情况

Fig. 6　Distribution of SST in the north Pacific Ocean at different spatial scales

本研究中使用 GAM 模型对 CPUE 进行标准化，能够较好地解释北太平洋海域不同的环境模态下对 CPUE 产生影响的解释变量之间的异同，以及与 CPUE 之间的关系。同时，它也可以表达出相同环境模态，不同空间尺度对 CPUE 标准化影响。但是，商业性渔获数据受制于众多因素的影响，且缺乏一定的对比性，使得 CPUE 标准化模型的可靠性降低，需要科学调查数据来验证本研究的结果是否可靠。不同空间尺度下最适 GAM 模型对 CPUE 标准化结果存在差异，故不同空间尺度 CPUE 的选取，模型得到的结果可能会影响人们对渔业资源状况的误判，从而影响后续资源评估过程中资源开发管理和保护的决策制定。因此在对数据进行 CPUE 标准化时，需要考虑空间尺度对 CPUE 标准化的影响，以及该渔业所属环境差异的影响。

参考文献:

[1] 官文江，陈新军，高峰，等. GLM 模型和回归树模型在 CPUE 标准化中的比较分析[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(1): 123-130.
GUAN Wenjiang, CHEN Xinjun, GAO Feng, et al. Comparisons of regression tree and GLM performance in CPUE standardization[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(1): 123-130.

[2] QUINN T J, DERISO R B. Quantitative fish dynamic[M]. New York: Oxford University Press, 1999.

[3] 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.

[4] HARLEY S J, MYERS R A, DUNN A. Is catch-per-unit-effort proportional to abundance?[J]. Can J Fish Aquat Sci, 2001, 58: 1760-1772.

[5] YE Y, DENNIS D. How reliable are the abundance indices derived from commercial catch–effort standardization?[J]. Can J Fish Aquat Sci, 2009, 66: 1169-1178.

[6] MAUNDER M N, PUNT A E. Standardizing catch and

effort data: a review of recent approaches[J]. Fish Res, 2004, 70: 141-159.

[7] 田思泉, 陈新军. 不同名义 CPUE 计算法对 CPUE 标准化的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(2): 240-245.
TIAN Siquan, CHEN Xinjun. Impacts of different calculating methods for nominal CPUE on CPUE standardization[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2010, 19(2): 240-245.

[8] WATTERS G, DERISO R B. Catch per unit of effort of bigeye tuna: A new analysis with regression trees and simulated annealing[J]. Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin, 2000, 21(8): 527-571.

[9] HINTON M G, NAKANO H. Standardizing catch and effort statistics using physiological, ecological, or behavioral constraints and environmental data, with an application to blue marlin (*Makaira nigricans*) catch and effort data from Japanese longline fisheries in the Pacific[J]. Inter- Am Trop Tuna Comm Bull, 1996, 21: 171-200.

[10] MAUNDER M N, HINTON M G, BIGELOW K A. Developing indices of abundance using habitat data in a statistical framework[J]. Bull Mar Sci, 2006, 79(3): 545-559.

[11] DANIEL G, MICHEL D L. Analysis of non-linear relationships between catch per unit. effort and abundance in a purse-seine fishery simulated with artificial neural hetworks[J]. Ices Journal of Marine Science, 2004, 61(5): 812-820

[12] 官文江, 田思泉, 王学昉, 等. CPUE 标准化方法与模型选择的回顾与展望[J]. 中国水产科学, 2014, 21(4): 852-862.
GUAN Wenjiang, TIAN Siquan, WANG Xuefang, et.al. A review of methods and model selection for standardizing CPUE[J]. Journal of Fishery Science of China, 2014, 21(4): 852-862.

[13] RODHOUSE P G. Managing and forecasting squid fisheries invariable environments[J]. Fisheries Research, 2001, 54(1): 3-8.

[14] CAIRISTIONA I H, RODHOUSE P G. Life cycles, oceanography and variability: Ommastrephid squid in variable oceanographic environments[J]. Fisheries Research, 2001, 54: 133-143.

[15] CHEN C S, CHIU T S. Variations of life history parameters in two geographical groups of the neon flying squid, *Ommastrephes bartramii*, from the North Pacific[J]. Fisheries Research, 2003, 63: 349-366.

[16] CAMPBELL R A. CPUE standardization and the construction of indices of stock abundance in a spatially varying fishery using general linear models[J]. Fisheries Resarch, 2004, 70: 209-227.

[17] 陆化杰, 陈新军, 曹杰等. 中国大陆阿根廷滑柔鱼鱿钓渔业 CPUE 标准化[J]. 水产学报, 2013, 37(6): 951-960.
LU Huajie, CHEN Xinjun, CAO Jie, et al. CPUE standardization of Illex argentinus for Chinese mainland squid- jigging fishery in the southwest Atlantic Ocean[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(6): 951-969.

[18] AKAIKE H. A new look at the statistical model identification[J]. Automatic Control IEEE Transactions, 1974, 19(6): 716 -723.

[19] CAO J, CHEN X J, CHEN Y. Influence of surface oceanographic variability on abundance of the western winter-spring cohort of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in the NW Pacific Ocean[J]. Mar Ecol Prog Ser, 2009, 381: 119-127.

[20] 陈新军, 田思泉. 西北太平洋柔鱼资源丰度时空分布的 GAM 模型分析[J]. 集美大学学报: 自然科学版, 2006, 11(4): 295-300.
CHEN Xinjun, TIAN Siquan. Temp-spatial distribution on abundance index of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in the Northwestern Pacific using generalized additive models[J]. Journal of Jimei University(Nature Science), 2006, 11(4): 295-300.

[21] 陈新军, 田思泉. 西北太平洋海域柔鱼的产量分布及其作业与创渔场与表温的关系研究[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(1): 101-107.
CHEN Xinjun, TIAN Siquan. Study on the catch distribution and relationship between fishing ground and surface temperature for *Ommastrephes bartrami* in the Northwestern Pacific Ocean[J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(1): 101-107.

[22] 陈新军, 田思泉. 西北太平洋海域柔鱼渔场分析探讨[J]. 渔业现代化, 2001, 28(3): 3-6.
CHEN Xinjun, TIAN Siquan. Analysis and discussion on fishing ground of *Ommastrephes bartrami* in Northwestern Pacific[J]. Fishery Modernization, 2001, 28(3): 3-6.

[23] 魏广恩. 北太平洋柔鱼渔场的时空分析与资源丰度的预测[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
WEI Guang'en. Spatial and temporal analysis of *Ommastrephes bartrami* fishing ground and its resource abundance prediction in the North Pacific Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.

Impacts of spatial resolution under different environment modes on CPUE standardization in the North Pacific Ocean

WEI Guang-en[1], CHEN Xin-jun[1, 2, 3, 4, 5]

(1. College of Marine Sciences of Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 3. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai Ocean University, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 4. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 5. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

Received: Jul. 22, 2019
Key words: North Pacific; *Ommastrephes bartramii*; generalized additive model; CPUE standardization; spatial resolution

Abstract: CPUE (Catch Per Unit Effort) is usually assumed to be proportional to fishery resources and is applied to fishery stock assessment and management. The selected spatial resolution can affect standardized CPUE under different environment modes and the evaluation of resource abundance. In this study, we use the Generalized Additive Model (GAM) to standardize CPUE in the fishery data collected by the Chinese squid-jigging fleets in the North Pacific Ocean. The North Pacific Ocean is divided into different environmental modes by 160°E. The nominal CPUE of three spatial scales (0.25°×0.25°, 0.5°×0.5°, and 1°×1°) under two modes were standardized to obtain the optimal GAM models. The effects of various factors on CPUE standardization under different environment modes and the impact of different spatial scales on CPUE standardization under the same environment mode were compared. The results show that under different environment modes, the variables that have an important impact on CPUE standardization are different. The waters west of 160°E is the year, latitude, and SST and the interactive term year and latitude, month, and latitude; the waters east of 160°E is the latitude, and the interaction term year and latitude, month, and latitude. Under the same environment mode, different spatial scales are optimal for GAM models with different CPUE standardization results. According to the mean square error, 0.5°×0.5°and 0.25°×0.25° were selected as optimal spatial scales for CPUE standardization in the waters east and west of 160°E, respectively. Therefore, it is necessary to consider the differences in CPUE standardization caused by different environment modes and different spatial scales when standardizing the commercial catch data of the North Pacific Ocean.

(本文编辑: 谭雪静)