

文章编号: 1674 - 5566(2011)02 - 0275 - 09

印度洋中国大眼金枪鱼延绳钓渔业 CPUE 标准化

戴小杰^{1,2,3}, 马超¹, 田思泉^{1,2,3}

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 大洋生物资源开发和利用上海市高校实验室, 上海 201306; 3. 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)

摘要: 使用广义线性模型 (GLM) 和广义可加模型 (GAM) 对印度洋中国大眼金枪鱼渔业的单位捕捞努力量渔获量 (CPUE) 进行标准化。在 CPUE 标准化模型中, 考虑了空间 (经度与纬度)、时间 (年与月) 和环境 (包括各深度温度、各深度盐度和海平面高度) 等变量。结果表明, 标准化 CPUE 和名义 CPUE 在时空分布上呈相似的趋势。年 CPUE 随时间呈现下降的趋势, 高 CPUE 经常出现在 42°E ~ 60°E、85°E ~ 90°E、15°S ~ 5°S 和 10°N ~ 15°N 的区域内。GLM 和 GAM 分析都显示出经度是影响 CPUE 最重要的变量, 可分别解释 17.3% 和 23.81% 的变异; 纬度、经度和纬度的交互效应、年份、381 m 水层温度、317 m 水层温度对 CPUE 的影响也是明显的。此研究中 GLM 模型比 GAM 模型更合适。

研究亮点: 使用了当前国际上流行的 CPUE 标准化方法 GLM 和 GAM 模型对我国在印度洋的大眼金枪鱼渔业的商业性数据进行了分析, 研究了大眼金枪鱼 CPUE 与时空因子、海洋环境因子的关系, 同时也较为系统地介绍了使用统计模型进行 CPUE 标准化的具体过程, 对其他类似研究具有借鉴作用。

关键词: CPUE 标准化; GAM; GLM; 印度洋; 大眼金枪鱼

中图分类号: S 932.4

文献标识码: A

大眼金枪鱼 (*Thunnus obesus*) 广泛分布三大洋热带及亚热带水域^[1-2], 是我国延绳钓渔船在印度洋的主要捕捞对象, 2003 - 2007 年产量一直在 7 000 t 以上, 2008 年产量为 4 964 t。国内外有很多学者对印度洋大眼金枪鱼空间分布、资源丰度与海洋环境的关系方面进行了研究^[3-6], 而在资源状况方面研究较少。2004 年, 印度洋金枪鱼管理委员会热带金枪鱼工作组指出大眼金枪鱼资源处于过度捕捞水平^[7]。单位捕捞努力量渔获量 (Catch Per Unit Effort, CPUE) 大小常被作为资源丰度的相对指数来反映资源丰度的变化^[8]。然而商业性渔业的 CPUE 通常受到不同的作业方式、渔业管理策略、渔船渔具以及各种环境因素的影响, 导致名义 CPUE 被直接用来反映渔业资源状况时会出现偏差^[9-10]。广义线性模型 (Generalized Linear Model, GLM) 和广义可加模型 (Generalized Additive Model, GAM) 是进行

CPUE 标准化时最为常用的两种统计学方法^[11-12]。本文根据 1995 - 2007 年我国印度洋延绳钓的生产数据统计, 结合卫星遥感的海洋环境数据, 利用 GLM 和 GAM 模型对大眼金枪鱼 CPUE 进行标准化, 以科学评价印度洋大眼金枪鱼资源状况, 为印度洋金枪鱼渔业可持续开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 渔业数据

大眼金枪鱼渔业数据来自中国远洋渔业分会上海海洋大学金枪鱼技术组, 渔业数据包括作业日期、地点 (经度, 纬度)、放钩数和渔获尾数。数据统计的空间分辨率为 5° × 5°, 时间分辨率为月。每个统计方格名义 CPUE 计算公式:

$$CPUE_{(i,j)} = \frac{N_{fish(i,j)} * 1000}{N_{hook(i,j)}} \quad (1)$$

收稿日期: 2010-03-17 修回日期: 2010-11-23

基金项目: 农业部三大洋金枪鱼观察员项目 (08 - 54); 上海市重点捕捞学科建设项目 (S30702)

作者简介: 戴小杰 (1966 -), 男, 博士, 教授, 主要从事渔业资源生物学和渔业资源评估方面的研究。E-mail: xjdai @ shou. edu. cn

式中: $CPUE_{(i,j)}$ 、 $N_{fish(i,j)}$ 、 $N_{hook(i,j)}$ 分别为经度 i 、纬度 j 处的月平均 CPUE、渔获尾数、下钩数。

1.1.2 环境数据

温度、盐度和海平面高度被认为是影响大眼金枪鱼分布的重要因子^[13],因此被选为 CPUE 标准化的影响因子。这些环境数据来自 <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/CARTON-GIESE/>。相关研究表明^[14],从海表面到 400 m 水层都是大眼金枪鱼的活动范围(由于海洋深层环境数据获取非常不易,上述网站提供的深度数据有限),本文选择 5 个具有代表性深度的温度和盐度数据:表层、112 m、197 m、317 m 和 381 m。

1.2 方法

本文选取 GLM 和 GAM 模型^[15]来进行 CPUE 标准化。在 CPUE 标准化模型中,CPUE 为响应变量,并假设其误差服从对数正态分布,解释变量包括:环境因子(不同水深的温度和盐度,海平面高度)、空间因子(经度与纬度)和时间因子(年与月)。由于 CPUE 数据中有 0 值的存在,对其进行对数转化时给所有 CPUE 值增加一个常量(总平均值的 10%),这种方法被广泛用在 CPUE 标准化中^[10,16]。

1.2.1 GLM 模型

GLM 模型假设响应变量预测值和解释变量的线性组合有关^[16-17],本文使用的 GLM 模型的一般表达式为

$$\ln(\text{CPUE}_{\text{BET}} + c) = \text{Year} + \text{Month} + \text{Lon} + \text{Lat} + \text{SST} + \text{Tem}_{112} + \text{Tem}_{197} + \text{Tem}_{317} + \text{Tem}_{381} + \text{SSS} + \text{Sal}_{112} + \text{Sal}_{197} + \text{Sal}_{317} + \text{Sal}_{381} + \text{Slh} + \text{Inter} + \text{error} \quad (2)$$

式中:Ln 取自然对数; c 为常数,取总平均数的 10%;error 为 $N(0, \sigma^2)$;Year 为年效应;Month 为月效应;Lon 为经度效应;Lat 为纬度效应;Tem 为温度效应;Sal 为盐度效应(Tem 和 Sal 后面的数字表示深度,SST 表示海表温度,SSS 表示海表盐度);Slh 为海平面高度作用;Inter 为交互效应。由于时空因子和环境变量之间关系非常复杂(如自相关等),一般使用 GLM 模型进行 CPUE 标准化时忽略它们之间的交互效应^[10],因此模型中的交互效应仅限为年和月、年和经度、年和纬度、月和经度、月和纬度。模型变量选择基于因子的显

著性 ($P < 0.05$) 和赤池信息准则值 (Akaike information criterion, AIC)。

1.2.2 GAM 模型

GAM 模型是 GLM 模型的非参数延伸形式,通过使用一个连接函数来建立响应变量的期望与各解释变量之间的关系^[18]。本文使用的 GAM 模型的一般表达式为

$$\ln(\text{CPUE}_{\text{BET}} + c) = s(\text{Year}) + s(\text{Month}) + s(\text{Lon}) + s(\text{Lat}) + s(\text{SST}) + s(\text{Tem}_{112}) + s(\text{Tem}_{197}) + s(\text{Tem}_{317}) + s(\text{Tem}_{381}) + s(\text{SSS}) + s(\text{Sal}_{112}) + s(\text{Sal}_{197}) + s(\text{Sal}_{317}) + s(\text{Sal}_{381}) + s(\text{Slh}) + \varepsilon \quad (3)$$

式中: c 为常数,取总平均数的 10%; s 为样条平滑 (spline smoother),其它同 GLM 表达式。模型变量选择基于因子的显著性 ($P < 0.05$) 和 AIC 值。

GLM 和 GAM 的运算通过统计软件 S-plus 8.0 来实现。

2 结果

2.1 模型选择

根据 S-plus 软件的逐步功能 (Step-wise) 对 GLM 和 GAM 进行运算。GLM 分析显示 Month, Tem₁₁₂, Sal₁₉₇ 和 Slh 的 P 值均大于 0.05,因此这些变量首先在 GLM 模型中被排除,其他变量根据模型的 AIC 值进行选择(表 1),得出最佳的 GLM 模型为

$$\ln(\text{CPUE}_{\text{BET}} + c) = \text{Year} + \text{Lon} + \text{Lat} + \text{SST} + \text{Tem}_{197} + \text{Tem}_{317} + \text{Tem}_{381} + \text{SSS} + \text{Sal}_{112} + \text{Sal}_{317} + \text{Sal}_{381} + \text{Year} * \text{Lon} + \text{Year} * \text{Lat} + \text{Lon} * \text{Lat} + \text{error} \quad (4)$$

GAM 分析显示所有变量的 P 值均小于 0.05,根据模型的 AIC 值进行选择(表 2),得出最佳的 GAM 模型为

$$\ln(\text{CPUE}_{\text{BET}} + c) = s(\text{Year}) + s(\text{Month}) + s(\text{Lon}) + s(\text{Lat}) + s(\text{SST}) + s(\text{Tem}_{112}) + s(\text{Tem}_{197}) + s(\text{Tem}_{317}) + s(\text{Tem}_{381}) + s(\text{SSS}) + s(\text{Sal}_{112}) + s(\text{Sal}_{197}) + s(\text{Sal}_{317}) + s(\text{Sal}_{381}) + s(\text{Slh}) + \varepsilon \quad (5)$$

根据 GLM 模型和 GAM 模型的 Q-Q 曲线分布(图 1a、图 1b)可以看出,图中斜率接近与 1,说明拟合程度较好。

表 1 逐步 GLM 分析中各模型的 AIC 值

Tab.1 The AIC of the step-wise GLMs

模型	AIC 值
$\text{LnCPUE} \sim \text{Year}$	10 262.75
$\text{LnCPUE} \sim \text{Year} + \text{Lon}$	9 218.41
$\text{LnCPUE} \sim \text{Year} + \text{Lon} + \text{Lat}$	8 932.167
$\text{LnCPUE} \sim \text{Year} + \text{Lon} + \text{Lat} + \text{SST}$	8 918.469
$\text{LnCPUE} \sim \text{Year} + \text{Lon} + \text{Lat} + \text{SST} + \text{Tem}_{197}$	8 904.547
$\text{LnCPUE} \sim \text{Year} + \text{Lon} + \text{Lat} + \text{SST} + \text{Tem}_{197} + \text{Tem}_{317}$	8 820.244
$\text{LnCPUE} \sim \text{Year} + \text{Lon} + \text{Lat} + \text{SST} + \text{Tem}_{197} + \text{Tem}_{317} + \text{Tem}_{381}$	8 683.89
$\text{LnCPUE} \sim \text{Year} + \text{Lon} + \text{Lat} + \text{SST} + \text{Tem}_{197} + \text{Tem}_{317} + \text{Tem}_{381} + \text{SSS}$	8 665.05
$\text{LnCPUE} \sim \text{Year} + \text{Lon} + \text{Lat} + \text{SST} + \text{Tem}_{197} + \text{Tem}_{317} + \text{Tem}_{381} + \text{SSS} + \text{Sal}_{112}$	8 660.32
$\text{LnCPUE} \sim \text{Year} + \text{Lon} + \text{Lat} + \text{SST} + \text{Tem}_{197} + \text{Tem}_{317} + \text{Tem}_{381} + \text{SSS} + \text{Sal}_{112} + \text{Sal}_{317}$	8 658.179
$\text{LnCPUE} \sim \text{Year} + \text{Lon} + \text{Lat} + \text{SST} + \text{Tem}_{197} + \text{Tem}_{317} + \text{Tem}_{381} + \text{SSS} + \text{Sal}_{112} + \text{Sal}_{317} + \text{Sal}_{381}$	8 630.213
$\text{LnCPUE} \sim \text{Year} + \text{Lon} + \text{Lat} + \text{SST} + \text{Tem}_{197} + \text{Tem}_{317} + \text{Tem}_{381} + \text{SSS} + \text{Sal}_{112} + \text{Sal}_{317} + \text{Sal}_{381} + \text{Year} * \text{Lon}$	8 584.009
$\text{LnCPUE} \sim \text{Year} + \text{Lon} + \text{Lat} + \text{SST} + \text{Tem}_{197} + \text{Tem}_{317} + \text{Tem}_{381} + \text{SSS} + \text{Sal}_{112} + \text{Sal}_{317} + \text{Sal}_{381} + \text{Year} * \text{Lon} + \text{Year} * \text{Lat}$	8 580.367
$\text{LnCPUE} \sim \text{Year} + \text{Lon} + \text{Lat} + \text{SST} + \text{Tem}_{197} + \text{Tem}_{317} + \text{Tem}_{381} + \text{SSS} + \text{Sal}_{112} + \text{Sal}_{317} + \text{Sal}_{381} + \text{Year} * \text{Lon} + \text{Year} * \text{Lat} + \text{Lon} * \text{Lat}$	8 367.686

表 2 逐步 GAM 分析中各模型的 AIC 值

Tab.2 The AIC of step-wise GAMs

模型	AIC 值
$\text{LnCPUE} = s(\text{Year})$	10 124.79
$\text{LnCPUE} = s(\text{Year}) + s(\text{Month})$	10 015.1
$\text{LnCPUE} = s(\text{Year}) + s(\text{Month}) + s(\text{Lon})$	8 242.233
$\text{LnCPUE} = s(\text{Year}) + s(\text{Month}) + s(\text{Lon}) + s(\text{Lat})$	7 935.367
$\text{LnCPUE} = s(\text{Year}) + s(\text{Month}) + s(\text{Lon}) + s(\text{Lat}) + s(\text{SST})$	7 825.516
$\text{LnCPUE} = s(\text{Year}) + s(\text{Month}) + s(\text{Lon}) + s(\text{Lat}) + s(\text{SST}) + s(\text{Tem}_{112})$	7 704.627
$\text{LnCPUE} = s(\text{Year}) + s(\text{Month}) + s(\text{Lon}) + s(\text{Lat}) + s(\text{SST}) + s(\text{Tem}_{112}) + s(\text{Tem}_{197})$	7 596.845
$\text{LnCPUE} = s(\text{Year}) + s(\text{Month}) + s(\text{Lon}) + s(\text{Lat}) + s(\text{SST}) + s(\text{Tem}_{112}) + s(\text{Tem}_{197}) + s(\text{Tem}_{317})$	7 392.216
$\text{LnCPUE} = s(\text{Year}) + s(\text{Month}) + s(\text{Lon}) + s(\text{Lat}) + s(\text{SST}) + s(\text{Tem}_{112}) + s(\text{Tem}_{197}) + s(\text{Tem}_{317}) + s(\text{Tem}_{381})$	7 339.149
$\text{LnCPUE} = s(\text{Year}) + s(\text{Month}) + s(\text{Lon}) + s(\text{Lat}) + s(\text{SST}) + s(\text{Tem}_{112}) + s(\text{Tem}_{197}) + s(\text{Tem}_{317}) + s(\text{Tem}_{381}) + s(\text{SSS})$	7 299.76
$\text{LnCPUE} = s(\text{Year}) + s(\text{Month}) + s(\text{Lon}) + s(\text{Lat}) + s(\text{SST}) + s(\text{Tem}_{112}) + s(\text{Tem}_{197}) + s(\text{Tem}_{317}) + s(\text{Tem}_{381}) + s(\text{SSS}) + s(\text{Sal}_{112})$	7 241.099
$\text{LnCPUE} = s(\text{Year}) + s(\text{Month}) + s(\text{Lon}) + s(\text{Lat}) + s(\text{SST}) + s(\text{Tem}_{112}) + s(\text{Tem}_{197}) + s(\text{Tem}_{317}) + s(\text{Tem}_{381}) + s(\text{SSS}) + s(\text{Sal}_{112}) + s(\text{Sal}_{197})$	7 198.607
$\text{LnCPUE} = s(\text{Year}) + s(\text{Month}) + s(\text{Lon}) + s(\text{Lat}) + s(\text{SST}) + s(\text{Tem}_{112}) + s(\text{Tem}_{197}) + s(\text{Tem}_{317}) + s(\text{Tem}_{381}) + s(\text{SSS}) + s(\text{Sal}_{112}) + s(\text{Sal}_{197}) + s(\text{Sal}_{317})$	7 100.437
$\text{LnCPUE} = s(\text{Year}) + s(\text{Month}) + s(\text{Lon}) + s(\text{Lat}) + s(\text{SST}) + s(\text{Tem}_{112}) + s(\text{Tem}_{197}) + s(\text{Tem}_{317}) + s(\text{Tem}_{381}) + s(\text{SSS}) + s(\text{Sal}_{112}) + s(\text{Sal}_{197}) + s(\text{Sal}_{317}) + s(\text{Sal}_{381})$	7 061.01
$\text{LnCPUE} = s(\text{Year}) + s(\text{Month}) + s(\text{Lon}) + s(\text{Lat}) + s(\text{SST}) + s(\text{Tem}_{112}) + s(\text{Tem}_{197}) + s(\text{Tem}_{317}) + s(\text{Tem}_{381}) + s(\text{SSS}) + s(\text{Sal}_{112}) + s(\text{Sal}_{197}) + s(\text{Sal}_{317}) + s(\text{Sal}_{381}) + s(\text{Slh})$	7 031.194

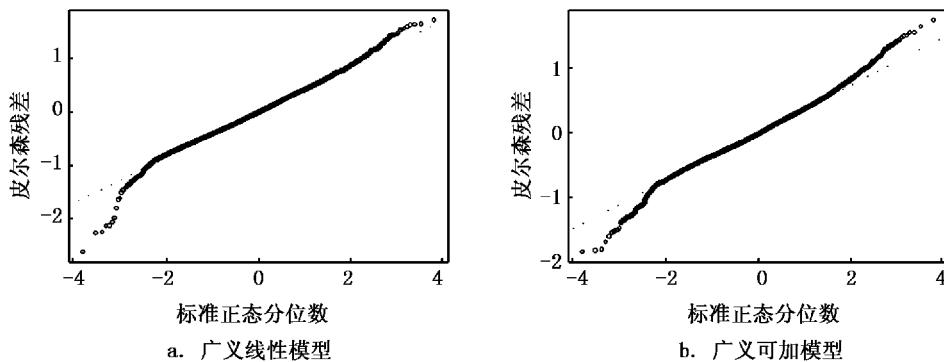


图 1 广义线性模型和广义可加模型的 Q-Q 曲线

Fig.1 Quantile-quantile plots of GLM and GAM

2.2 标准化 CPUE 的比较

名义 CPUE 和标准化的 CPUE 的比较图显示认为,最高 CPUE 值在 2003 年(图 2a),最低值出现在 2007 年。2002 到 2007 年期间,CPUE 呈下降趋势。GLM 与 GAM 模型标准化 CPUE 值比较接近,除 2002 年外,标准化后的 CPUE 低于名义 CPUE。对于月 CPUE 值(图 2b),除去 3 月、8 月和 10 月以外,名义 CPUE 值都高于标准化 CPUE

值;而且 GLM 和 GAM 模型标准化 CPUE 值也非常接近,最高值出现在 1 月和 12 月,最低值出现在 8 月。在经度上,较高的 CPUE 出现在 $42^{\circ}\text{E} \sim 60^{\circ}\text{E}$ 和 $85^{\circ}\text{E} \sim 90^{\circ}\text{E}$ (图 2c)。在纬度上,较高的 CPUE 出现在 $15^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{S}$ 和 $10^{\circ}\text{N} \sim 15^{\circ}\text{N}$ (图 2d)。除了个别区域范围内,名义 CPUE 值大都比标准化 CPUE 值略高一些(图 2c-d)。

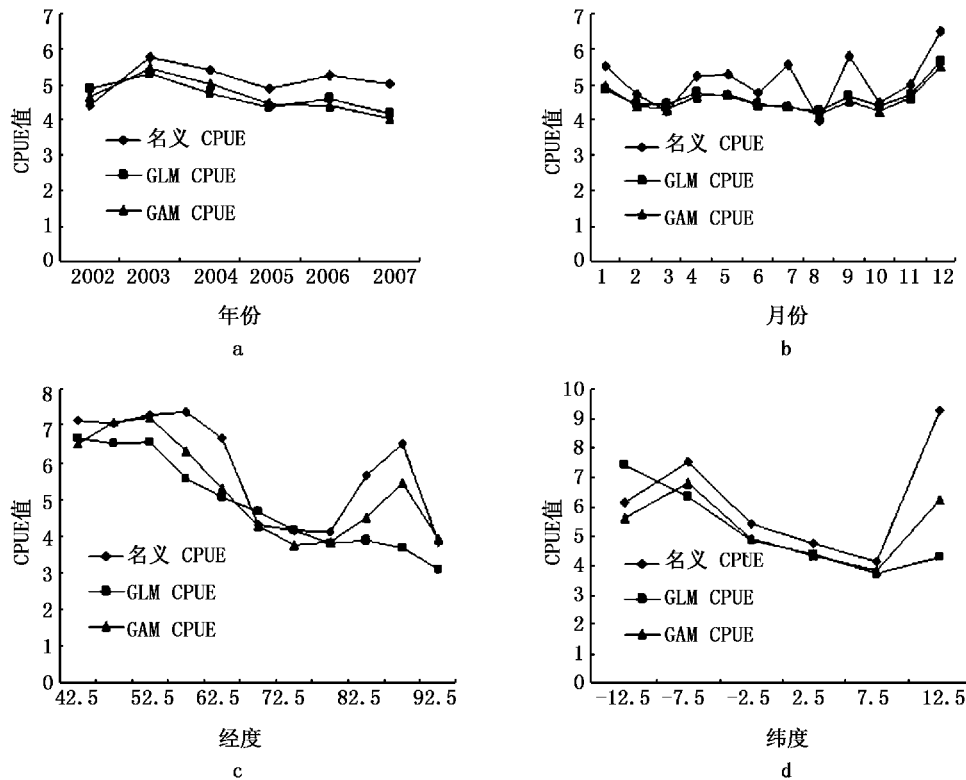


图 2 标准化 CPUE 和名义 CPUE 在不同空间和时间范围内的比较

Fig. 2 Comparing standardized CPUE and nominal CPUE in different spatio-temporal scales

a. 标准化 CPUE 和名义 CPUE 的年度变化; b. 标准化 CPUE 和名义 CPUE 的月份变化; c. 标准化 CPUE 和名义 CPUE 的经度变化; d. 标准化 CPUE 和名义 CPUE 的纬度变化。

2.3 CPUE 与各因子的关系

利用 GLM 模型可求得各因子对 CPUE 产生影响的程度大小(表 3),从表 3 可看出,经度效应为最大,可以解释 17.33% 的变异;纬度、经度和纬度的交互效应、年份、381 m 水层温度和 317 m 水层温度对 CPUE 的影响也是很明显的,可分别解释 4.35%、2.98%、2.53%、2.00%、1.26% 的变异。

对于 GAM 模型,从表 4 可看出,经度效应为最大,可以解释 23.81% 的变异,年份、381 m 水层温度、317 m 水层温度和 112 m 水层盐度对 CPUE 的影响也是明显的,可分别解释 6.66%、2.94%、

2.73%、2.50% 的变异。

GAM 模型可以分析 CPUE 与各影响因子的非线性关系,其分析结果显示,从 2002 年到 2004 年,CPUE 有小幅增加,从 2004 年到 2007 年,CPUE 呈现下降趋势(图 3a)。全年作业时间较平均,且各月对 CPUE 影响的变化不大(图 3b)。空间分布(经度和纬度)对 CPUE 的影响表明(图 3c-d),作业区域主要集中在 $42.5^{\circ}\text{E} \sim 92.5^{\circ}\text{E}$ 和 $7.5^{\circ}\text{S} \sim 7.5^{\circ}\text{N}$ 区域。经度方面, $57.5^{\circ}\text{E} \sim 72.5^{\circ}\text{E}$ 海域对 CPUE 的影响呈缓慢下降趋势, $72.5^{\circ}\text{E} \sim 87.5^{\circ}\text{E}$ 海域对 CPUE 的影响呈缓慢上升趋势(图 3c)。纬度方面,在 $7.5^{\circ}\text{S} \sim 2.5^{\circ}\text{S}$ 海

域,随着纬度减少,对 CPUE 的影响呈上升趋势;在 2.5°N ~ 7.5°N 海域,随着纬度增加,其对 CPUE 的影响呈明显的上升趋势(图 3d)。

表 3 GLM 模型偏差分析

Tab.3 Analysis of deviance for GLM

因子	离差平方和	方差贡献率
Year	33.798	2.53%
Longitude	231.899	17.33%
Latitude	58.269	4.35%
SST	3.108	0.23%
Tem ₁₉₇	3.145	0.23%
Tem ₃₁₇	16.931	1.26%
Tem ₃₈₁	26.729	2.00%
SSS	3.982	0.30%
Sal ₁₁₂	1.284	0.10%
Sal ₃₁₇	0.789	0.06%
Sal ₃₈₁	5.698	0.43%
Year * Longitude	9.117	0.68%
Year * Latitude	1.063	0.08%
Longitude * Latitude	39.853	2.98%

表 4 GAM 模型偏差分析

Tab.4 Analysis of deviance for GAM

因子	离差平方和	方差贡献率
Year	74.5075	6.66%
Month	15.3658	1.37%
Longitude	266.2663	23.81%
Latitude	7.2201	0.65%
SST	6.2108	0.56%
Tem ₁₁₂	19.5703	1.75%
Tem ₁₉₇	16.8169	1.50%
Tem ₃₁₇	30.5082	2.73%
Tem ₃₈₁	32.8522	2.94%
SSS	6.164	0.55%
Sal ₁₁₂	28.0056	2.50%
Sal ₁₉₇	12.995	1.16%
Sal ₃₁₇	27.3397	2.44%
Sal ₃₈₁	15.0733	1.35%
Slh	11.1729	1.00%

从各深度温度和盐度对 CPUE 的影响可知(图 3e-o),作业主要集中在海表面温度为 24°C ~ 28°C(图 3e)、海表面盐度为 34.9 ~ 35.3 的海域(图 3j);317 m 水层温度对 CPUE 的影响呈明显的上升趋势(图 3h),海平面高度对 CPUE 的影响不大(图 3o)。

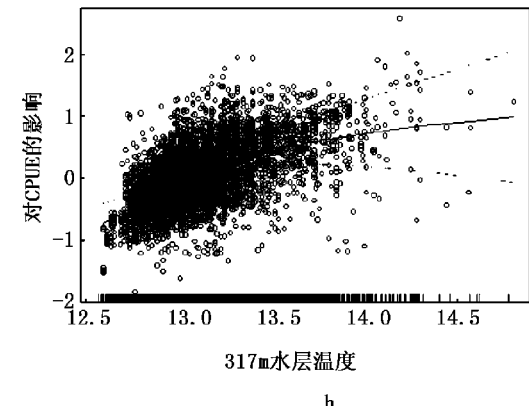
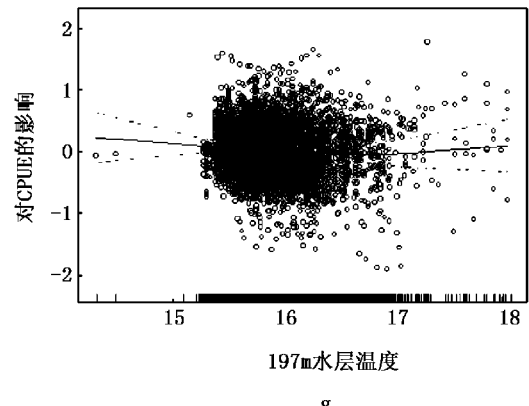
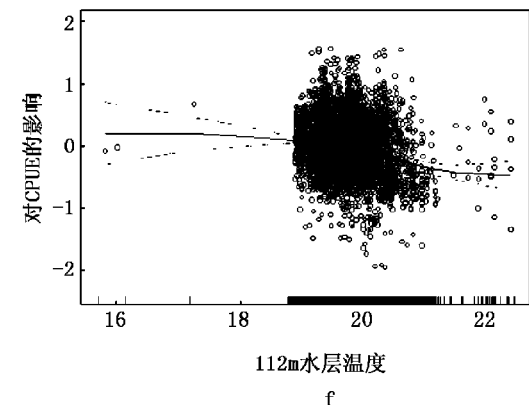
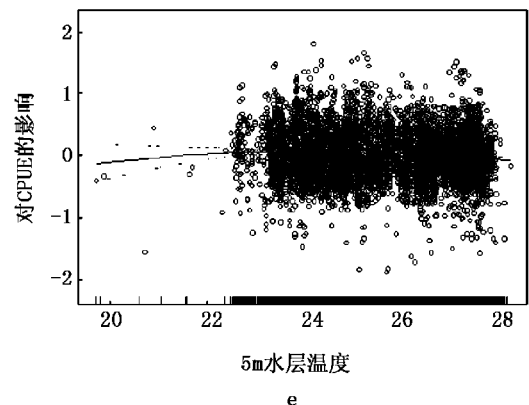
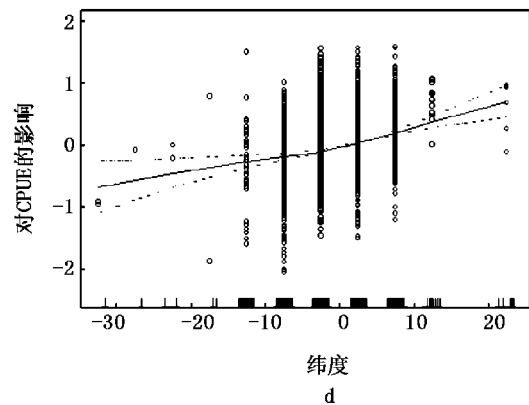
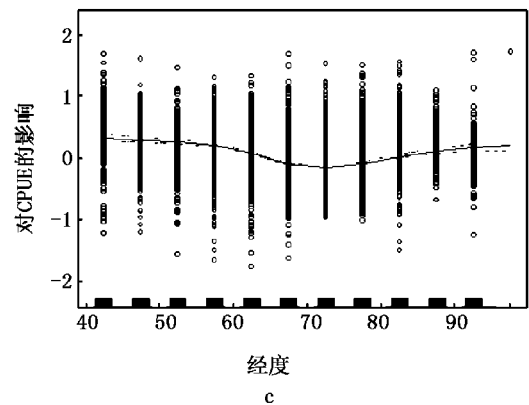
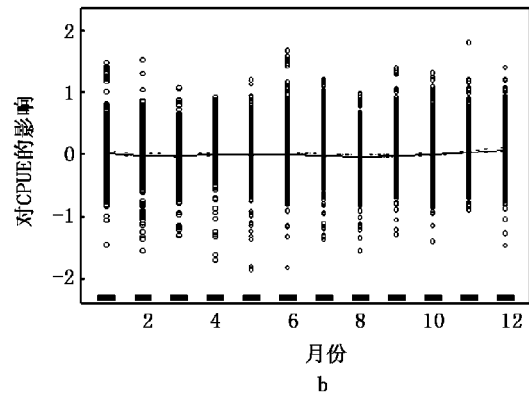
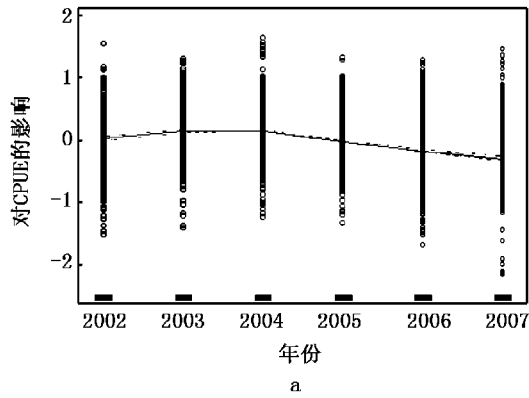
3 讨论

3.1 影响 CPUE 的因子分析

标准化 CPUE 和名义 CPUE 都显示金枪鱼资源在空间上存在着差异,较高的 CPUE 出现在 42.5°E ~ 57.5°E 和 82.5°E ~ 92.5°E, 2.5°N ~ 7.5°N。从 10°S 到 10°N, CPUE 呈现增加的趋势, GLM 模型显示出 CPUE 和纬度之间有清晰的线性关系。同时,经度和纬度的交互效应对 CPUE 的影响也比较明显。CPUE 的空间变化可能与金枪鱼的分布有关,大眼金枪鱼是高度洄游性种类,在印度洋,分布在南赤道海流及其以北水域,非洲东岸和马达加斯加岛,常见于印度-澳大利亚群岛海域^[5]。另外由于渔船空间分布的集中程度导致渔业数据的不平衡性也是 CPUE 值产生空间差异的原因。

GLM 和 GAM 分析都显示出, CPUE 有更多的年际变化。其中,2003 年 CPUE 值最高,2007 年 CPUE 值最低, CPUE 总体上呈下降趋势,这可能与资源量下降有关。2004 年,印度洋金枪鱼管理委员会(IOTC)和热带金枪鱼工作组(Working Party on Tropical Tunas, WPTT)指出大眼金枪鱼处于过度捕捞水平。WPTT 还对 2003 - 2013 年的大眼金枪鱼资源量进行了预测,结果表明如果大眼金枪鱼资源不能进行有效及时的管理,资源将处于不可持续利用的状态^[7]。

GLM 模型分析中可以发现,对 CPUE 影响比较大的几个环境变量是 Tem₃₁₇ 和 Tem₃₈₁,这和大眼金枪鱼的生活环境有关。国内外许多研究认为^[19-21],大眼金枪鱼为深水金枪鱼类,活动较频繁的水温段为 12.0 ~ 15.9 °C。从图(3h,3i)可以得出,317 m 和 381 m 水层温度范围大约在 11.6 ~ 13.5 °C。MASALLIKO 等^[4]分析印度洋大眼金枪鱼的垂直分布与水层、水温范围的关系,得出在 12 ~ 13 °C 处 CPUE 最高;宋利明^[22]研究大西洋中部大眼金枪鱼垂直分布与温度、盐度的关系,也得出大眼金枪鱼最适水温为 12 ~ 12.99 °C。本文中 317 m 和 381 m 水层温度与这些结论比较接近,因此 317 m 和 381 m 水层温度对大眼金枪鱼的渔获率影响较大。而盐度几乎对大眼金枪鱼的分布没有影响。海平面高度对 CPUE 的影响也不大,可能是由于数据统计的空间尺度(5° × 5°)太大,每个统计方格内海平面高度平均值差异比较小,从而导致不显著关系的产生。



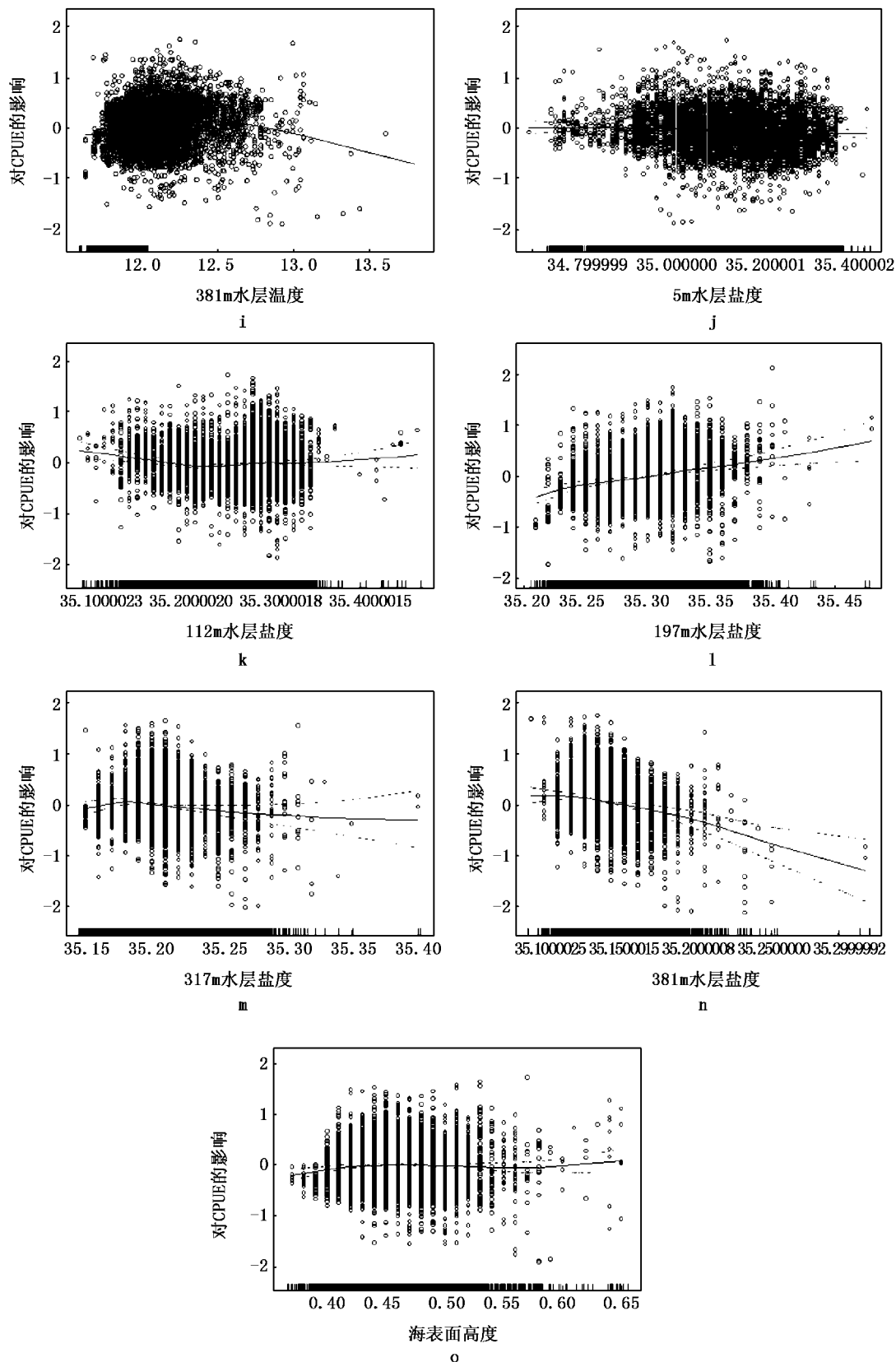


图3 广义可加模型中各种因素对 CPUE 的影响

Fig.3 Impacts of different factors on CPUE in GAM

a. 年份; b. 月份; c. 经度; d. 纬度; e. 5 m 水层温度; f. 112 m 水层温度; g. 197 m 水层温度; h. 317 m 水层温度; i. 381 m 水层温度; j. 5 m 水层盐度; k. 112 m 水层盐度; l. 197 m 水层盐度; m. 317 m 水层盐度; n. 381 m 水层盐度; o. 海表面高度。

由于无法得到每艘延绳钓渔船的具体资料,所以不可能完全弄清楚渔船和渔具对 CPUE 的影响。但大多数中国延绳钓渔船的马力、每次作业的投钩数和作业时间大致相同,并且在本文中,以 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 作为统计方格来对作业渔船的总投钩数和渔获尾数进行统计,CPUE 代表的是渔获率,即每千钩上钩的大眼金枪鱼数量,已基本包含捕捞努力量的因素。因此本文在 CPUE 标准化过程中忽略了渔船和渔具的效应。

3.2 模型的选择

名义 CPUE 会受到除了资源以外,还受到其他很多因素的影响,标准化的 CPUE 比名义 CPUE 更能准确地反映资源的丰度变化情况。本文利用 GLM 和 GAM 两种方法对大眼金枪鱼商业性 CPUE 正进行标准化,两种方法分析的结果都是一致的,因而反映了本文标准化的 CPUE 可以确切地反映了大眼金枪鱼资源丰度情况。

利用 GLM 模型可得到影响 CPUE 的主要因子及其贡献度,并可考虑多因子的交互效应。其研究结果基本与 GAM 模型相同。本文的 CPUE 标准化中,时空交互效应不明显,所以可以同时运用两个模型进行分析。但 GLM 模型更为合适,因为其同时包含了影响 CPUE 变化的时空因子和环境因子。

GAM 模型的优点在于能够直接处理响应变量和多重解释变量的非线性关系,可以将某些变量的作用放大,还可以单独考虑时空因素和环境因素。不足之处是,缺少 GLM 模型中因子交互效应,如年与月的交互效应、年份与经度的交互效应等。

参考文献:

- [1] 王宇. 世界金枪鱼渔业资源开发利用研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2000: 1-15.
- [2] 刘群, 任一平, 王艳君, 等. 大眼金枪鱼的资源现状[J]. 海洋湖沼通报, 2003, 95(2): 74-78.
- [3] 赵荣兴, 缪圣赐. 印度洋大眼金枪鱼 *Thunnus obesus* (Lowe) 的渔业生产和资源状况概述[J]. 现代渔业信息, 2006, 21(6): 10-14.
- [4] MASALLIKO M, EIJI H, SHOICHI T. Optimum water temperature for bigeye tuna in the Indian Ocean as seen from tuna longline catches[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1996, 65(5): 761-764.
- [5] LEE P F, CHEN I C, TZENG W N. Spatial and Temporal Distribution Patterns of Bigeye Tuna (*Thunnus obesus*) in the Indian Ocean[J]. Zoological Studies, 2005, 44(2): 260-270.
- [6] 冯波. 印度洋大眼金枪鱼延绳钓钩获率与环境因素的初步研究[D]. 上海: 上海水产大学, 2003.
- [7] IOTC. Report of the Eighth Session of the Scientific Committee [R]. Victoria: IOTC, 2005.
- [8] COOKE J G, BEDDINGTON J R. The relationship between catch rates and abundance in fisheries[J]. Math Appl Med Biol, 1984(1): 291-405.
- [9] SHELTON J H, RANSOM A M, ALISTAIR D. Is catch-per-unit effort proportional to abundance[J]. Fish Aquat Sci, 2001, 58(9): 1760-1772.
- [10] MAUHDER M N, PUNT A E. Standardizing catch and effort data: a review of recent approaches[J]. Fish Res, 2004, 70(2): 141-159.
- [11] BIGELOW K A, BOGGS C H, HE X. Environmental effects on swordfish and blue shark catch rates in the US North Pacific longline fishery[J]. Fish Oceanogr, 1999, 8(3): 178-198.
- [12] HINTON M G, MAUNDER M N. Methods for standardizing CPUE and how to select among them[C]. ICCAT SCRS/2003/034: 169-177.
- [13] 冯波, 许柳雄, 田思泉. 印度洋大眼金枪鱼延绳钓适宜渔获环境的初步研究[J]. 海洋渔业, 2004, 26(3): 161-166.
- [14] ERWAN J, PASCAL B, LAURENT D. Simultaneous observations of tuna movements and their prey by sonic tracking and acoustic surveys[J]. Hydrobiologia, 1998, 371/372: 61-69.
- [15] GUIBAN A, EDWARDS J T C, HASTIE T. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene[J]. Ecol Mod, 2002, 157(2-3): 89-100.
- [16] 冯波, 陈新军, 许柳雄. 利用广义线性模型分析印度洋黄鳍枪鱼延绳钓渔获率[J]. 中国水产科学, 2009, 16(2): 282-288.
- [17] NEKDER J A, WEDDERBURN R W M. Generalised linear models[J]. Statist Soc, 1972, 135(3): 370-384.
- [18] HASTIE T, TIBSHIRANI R. Generalized Additive Models[J]. Statistical Science, 1986, 1(3): 297-316.
- [19] 李军, 李志凌, 叶振江. 大眼金枪鱼渔业现状和生物学研究进展[J]. 齐鲁渔业, 2005, 22(12): 35-39.
- [20] HOLLAND K N, BRILL R W, CHANG R K C. Horizontal and vertical movements of yellowfin and bigeye tuna associated with fish aggregating devices[J]. Fishery Bulletin, 1990, 88(3): 492-507.
- [21] 姜浪波, 许柳雄, 黄金玲. 印度洋大眼金枪鱼垂直分布与水温的关系[J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(3): 332-336.
- [22] 宋利明, 许柳雄, 陈新军. 大西洋中部大眼金枪鱼垂直分布与温度、盐度的关系[J]. 中国水产科学, 2004, 11(6): 561-566.

CPUE standardization of Chinese longline fishery for targeting bigeye tuna, *Thunnus obesus* in the Indian Ocean

DAI Xiao-jie^{1,2,3}, MA Chao¹, TIAN Si-quan^{1,2,3}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Shanghai Education Commission for Oceanic Fisheries Resources Exploitation, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Generalized Linear Models (GLM) and Generalized Additive Models (GAM) were used to standardize catch per unit fishing effort (CPUE) of Chinese bigeye tuna (*Thunnus obesus*) fishery in the Indian Ocean. In CPUE standardization, nominal CPUE was treated as the dependent variable and three groups of affected variables were considered: spatial variables (longitude and latitude), temporal variables (year and month) and environmental variables (temperature at various depths, salinity at various depths and Sea Level Height). The results indicated that the standardized and nominal CPUEs were similar and showed the same trends in spatio-temporal distribution. The CPUE increased with year and high CPUE usually occurred in 42°E – 60°E, 85°E – 90°E, 15°S – 5°S and 10°N – 15°N. Both the results of GLM and GAM showed that the longitude was the most important variable affecting CPUE, which could explain 17.3% and 23.81% of the deviance, respectively. The effects of latitude, the interaction terms of longitude and latitude, year, temperature at 317 m depth and temperature at 381 m depth on CPUE were also apparent. GLM tended to be more appropriate than GAM in the analysis of CPUE standardization in this study.

Key words: CPUE standardization; GAM; GLM; bigeye tuna; Indian Ocean