

基于广义可加模型研究时间和环境因子对 南极半岛北部南极磷虾渔场的影响

朱国平^{1,2,3*}

- (1. 上海海洋大学国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 210306;
2. 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;
3. 上海海洋大学农业部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306)

摘要: 基于南极海洋生物资源养护委员会(CCAMLR)统计公报(Statistical Bulletin, Volume 23)提供的数据, 利用广义可加模型(generalized additive model, GAM), 实验对 1998—2009 年南极半岛北部(CCAMLR 48.1、48.2 和 48.3 小区)内的南极磷虾渔场时空分布及其与环境因子(表温和叶绿素 a 浓度)之间的关系进行了研究。结果表明, 模型对 3 个小区的单位捕捞努力量渔获量(catch per unit fishing effort, CPUE)总偏差解释率分别为 51.11%、69.25% 和 65.82%, 其中各小区贡献最大的因子均为月份。1998—2009 年期间, 3 个小区内各年平均 CPUE 保持相对稳定。48.1 小区各年间平均 CPUE 值变化最小, 而 48.3 小区则较 48.2 小区大。3 个小区之间及 48.2 小区和 48.3 小区内年均 CPUE 差异不明显, 而 48.1 小区内平均 CPUE 则存在显著性年份差异。从 CPUE 月均变化可以看出, 3 个小区均呈单峰分布, 48.1~48.3 小区的峰值分别出现在 4 月、5 月和 6 月。3 个小区之间平均 CPUE 月变化不显著, 但各区内平均 CPUE 则存在显著的月变化。48.1~48.3 小区南极磷虾渔场的适宜表温范围分别为 $-3\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-2\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但 CPUE 主要分别集中在表温 $-2\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右以及 $0.8\sim 2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内。48.1 小区(53%)、48.2 小区(39%)和 48.3 小区(51%)3 个小区较大比例的 CPUE 值处于叶绿素 a 浓度为 $0\sim 0.2\text{ mg/m}^3$ 的范围内。

关键词: 南极磷虾; 广义可加模型; 单位捕捞努力量渔获量; 南极半岛北部

中图分类号: S 931.41

文献标志码: A

南极磷虾(*Euphausia superba* Dana)是地球上资源量最大的单种海洋生物之一^[1], 也是目前世界上资源量较大的甲壳类浮游动物^[2-3]。作为南大洋生态系统中海洋哺乳动物繁殖过程中一个非常关键的捕食对象^[4-5], 南极磷虾是南大洋生态系统中的关键种, 其资源的时空分布及变动在多个水平上对生态系统产生影响, 因此, 预测南极磷虾资源对海洋环境所做出的反应将有利于南大洋海洋生态系统的监测, 同时也可用于南极磷虾渔业的管理^[6]。

来自于商业性渔业活动中的数据可提供资源生物量变化方面的有效信息^[3]。一些模型也使用单位捕捞努力量渔获量(catch per unit fishing effort, CPUE)数据作为输入量, 从而为管理南极磷虾资源提供依据^[7-8]。同时, CPUE 数据对于理解南大洋生态系统的特殊过程非常重要, 该数据与其他信息一起可帮助解决与生态系统监测与管理相关的大量问题^[9]。在渔业研究中, 通常假设 CPUE 与资源量成正比以反映资源丰度, 从而将其作为资源丰度相对指数之一^[10], 但应该注意到 CPUE 与环

收稿日期: 2011-08-27 修回日期: 2011-12-29

资助项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AA092302); 上海市重点学科建设项目(S30702); 上海海洋大学“海鸥计划”项目(B-5003-11-0023)

通讯作者: 朱国平, E-mail: gpzhu@shou.edu.cn

境因子之间的关系具有非线性特征^[11]。在探究渔业资源丰度与环境之间的时空关系方面,与传统回归方法相比,广义可加模型(generalized additive model, GAM)被认为是一个信息更为丰富的工具,能更加深入地探讨渔业资源与环境变量间的关系^[12],近些年来在渔业上得到了广泛的应用^[13]。针对南极磷虾渔业, Siegel 等^[3]利用前苏联和德国南极磷虾渔业 CPUE 数据(产量/拖曳时间)分析了国际南极海洋生物资源养护委员会(CCAMLR)48.1、48.2 和 48.3 小区内南极磷虾渔业时间变化情况。Fedoulov 等^[14]从渔业角度分析了南乔治亚岛周围水域 CPUE 与海水温度之间的关系,并认为水温与 CPUE 之间有着直接且重要的时空联系。Kawaguchi 等^[15]基于商业性渔捞日志数据计算 CPUE,以此作为南极磷虾丰度指标,并利用线性混合模型(linear mixed model, LMM)对所获得的 CPUE 值进行了标准化,但其并未考虑到环境因素(如水温、叶绿素 a 浓度等)对南极磷虾资源分布及状况所造成的潜在影响。尽管诸多学者利用 CPUE 数据对南极磷虾渔业及资源状况进行了分析,但这些研究人员均未考虑到环境因子及时空效应对 CPUE 的影响。为此,本研究利用 GAM 对南极磷虾渔业 CPUE 数据进行标准化,并分析 48.1、48.2 和 48.3 小区内南极磷虾渔场的时间变化及海洋环境因子对其所产生的影响,从而为进一步开发南极磷虾资源提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

商业性生产数据来源于 CCAMLR 的统计公报,时间序列为 1998—2009 年,区域为 CCAMLR 48.1 小区、48.2 小区和 48.3 小区。该数据主要统计了所有在 CCAMLR 辖区内的南极磷虾生产数据,数据字段包括产量(t)、捕捞时间(h)、年份、月份和作业类型等。作业类型包括网板拖网(OT)、网板桁拖网(OTB)、中层网板拖网(OTM)和中层桁拖网(TMB)等,考虑到所有作业类型均属于拖网网具,故假设各船捕捞努力量基本上等效,则单位捕捞努力量渔获量(CPUE)(t/h)采取以下计算公式:

$$CPUE = \frac{C}{E}$$

式中, C 表示产量(t); E 表示捕捞努力量(h)。

海洋环境数据(包括海水表温和叶绿素 a 浓度)

来源于哥伦比亚大学气象数据库(<http://irid.lldo.columbia.edu/SOURCES/.CARTONGIESE/.SODA/>),时间为 1998—2009 年,时间分辨率为月;空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。考虑到渔业数据仅以 48.1 小区、48.2 小区和 48.3 小区为单位,故通过接口定义语言(interface definition language, IDL)将环境数据平均匹配到 3 个小区中。

1.2 分析方法

GAM 为广义线性模型的非参数化扩展,其优点是能直接处理响应变量与多个解释变量之间的非线性关系^[16]。本研究中,首先以 CPUE 为非独立变量,表温、叶绿素 a 浓度、年份和月份作为解释变量建立 GAM 模型,分析 3 个小区内南极磷虾 CPUE 与时间变量及各海洋环境因子之间的关系(GAM 模型中各自变量之间的关系彼此独立,因此可以得出各单因子与 CPUE 的关系)。

GAM 模型的表达方式:

$$\ln(CPUE + mean) = s(Y) + s(M) + s(SST) + s(Chl.a) + \varepsilon$$

式中, $mean$ 为 CPUE 的平均值,为了防止零值出现,采用 CPUE 加上平均值,再进行对数化处理; s 为自然立方样条平滑(natural cube spline smoother); SST 为海水表温($^\circ\text{C}$); $Chl.a$ 为叶绿素 a 浓度(mg/m^3); Y 表示年份; M 表示月份; ε 为误差项。模型的误差分布估计为高斯分布^[17]。

利用 AIC 信息准则(akaike information criterion)检验逐步加入因子后模型的拟合程度,其值越小,表明模型的拟合效果越佳^[18]。利用 F 检验评估各因子的显著性。GAM 模型的运算通过 S-PLUS 6.2 软件实现。利用 Kruskal-Wallis 检验(H 检验)分析 3 个或 3 个以上样本之间是否存在显著性差异($P < 0.05$)^[19]。

2 结果

2.1 模型效果

模型中逐步加入影响因子后各指标的详细变化情况见表 1,表中的每一行显示了拟合过程和解释变量加入后的相关信息。由表 1 可知,3 个小区模型显示出类似的结果,即该模型对 CPUE 总偏差解释率均高出 50%,分别为 51.11%、69.25% 和 65.82%,其中贡献最大的因子均为月份,贡献率分别 15.65%、50.28% 和 58.79%;其次为年份,其贡献率分别为 15.65%、11.03% 和 8.36%;其它因子对模型的贡献均不足 5%。

表 1 各海区海洋环境因子与南极磷虾 CPUE 的 GAM 检验
Tab.1 Test of GAM for modeling CPUE of Antarctic krill fishery and the corresponding model factors

模型因子 model factors	分区 sub-area	残差偏差 residual deviance	偏差变化量 deviance variation	累积解释偏差/% accumulation of deviance explained	AIC	F 检验 Pr (F)
初始模型 initial model	48.1	5.79				
	48.2	6.36				
	48.3	12.20				
年份 year	48.1	4.88	0.91	15.65	14.65	0.000
	48.2	5.65	0.70	11.03	16.96	0.000
	48.3	11.18	1.02	8.36	33.54	0.000
月份 month	48.1	3.26	1.62	43.68	9.78	0.000
	48.2	2.46	3.20	61.31	7.38	0.000
	48.3	5.03	6.15	58.79	15.08	0.000
表温/ °C SST	48.1	3.02	0.24	47.82	9.06	0.000
	48.2	2.25	0.21	64.66	6.74	0.000
	48.3	4.54	0.49	62.79	13.62	0.000
叶绿素 a 浓度 (mg/m ³) Chl.a	48.1	2.83	0.19	51.11	8.49	0.000
	48.2	1.95	0.29	69.25	5.86	0.000
	48.3	4.17	0.37	65.82	12.51	0.000

F 检验表明, 所有影响因子均与 CPUE 呈极显著相关关系($P < 0.001$), 其随着影响因子的逐步加入, 模型的 AIC 值继续变小, 表明模型的拟合程度有所提高, 因此模型最终保留了所有影响因子(表 1)。

2.2 CPUE 时间变化

1998—2009 年期间, 3 个小区内标准化后的各年平均 CPUE 保持相对稳定, 均维持在 0.9~1.2 t/h 之间(图 1)。相对来讲, 48.1 小区各年间平均 CPUE 值变化较小($CV=0.0834$), 而 48.3 小区($CV=0.1366$)则较 48.2 小区大($CV=0.0957$)。H 检验表明, 3 个小区之间平均 CPUE 年变化不存在显著性差异($\chi^2=1.898, df=2, P=0.387 > 0.05$), 48.2 区($\chi^2=11.639, df=11, P=0.391 > 0.05$)和 48.3 区($\chi^2=9.208, df=11,$

$P=0.603 > 0.05$)内平均 CPUE 年变化也不存在显著性差异, 但 48.1 小区内平均 CPUE 年变化则存在显著性差异($\chi^2=24.581, df=11, P=0.0105 < 0.05$)。

从 CPUE 月均变化可以看出, 3 个小区均呈单峰分布, 48.1~48.3 小区的峰值出现分别出现在 4 月(CPUE=1.24 t/h)、5 月(CPUE=1.26 t/h)和 6 月(CPUE=1.47 t/h), 相对来讲 48.3 小区的变化较大($CV=0.3187$)(图 2)。H 检验表明, 3 个小区之间平均 CPUE 月变化不存在显著性差异($\chi^2=0.227, df=2, P=0.893 > 0.05$), 但 48.1 小区($\chi^2=58.498, df=11, P < 0.001$)、48.2 小区($\chi^2=49.854, df=10, P < 0.001$)和 48.3 小区($\chi^2=60.800, df=10, P < 0.001$)内平均 CPUE 月变化均存在显著性差异。

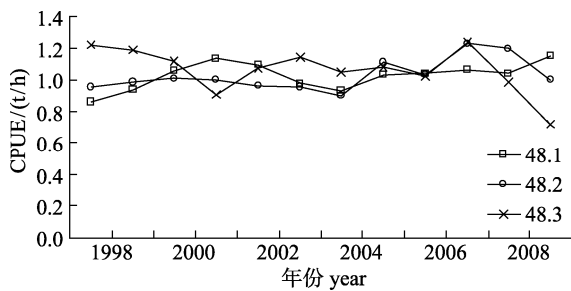


图 1 48.1 至 48.3 小区南极磷虾渔业标准 CPUE 年变化
Fig. 1 Annual variation on standardized CPUE for Antarctic krill fishery in the subareas 48.1 to 48.3

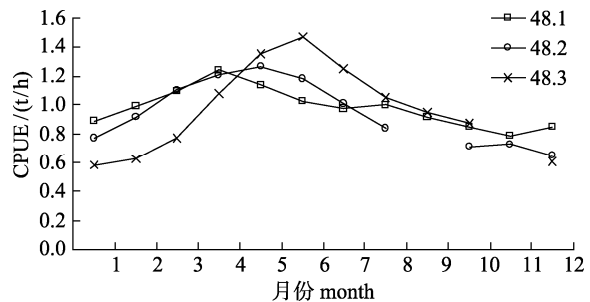


图 2 48.1 至 48.3 小区南极磷虾渔业标准 CPUE 月变化
Fig. 2 Monthly variation on standardized CPUE for Antarctic krill fishery in the subareas 48.1 to 48.3

2.3 各因子与南极磷虾资源丰度的关系

时间因子对 CPUE 的影响 模拟结果表明, 48.1 小区内, 1998 年后, CPUE 开始增加, 至 2001 年达到一个峰值, 此后又开始下降至 2004 年最低。2004 年之后, CPUE 逐步增加; 48.2 小区内, 1998—2003 年期间, CPUE 变化不大, 此后 CPUE 开始增加至 2007 年达到峰值; 48.3 小区内, 1998 年, CPUE 缓慢下降至 2001 年后保持相对稳定状态, 至 2007 年后, CPUE 开始下降(图 3-a)。

从整体上看, 三个区的各月份的 CPUE 变化有一个相似点, 即均有一个峰值, 但各区的变化趋势各不相同。48.1 小区, 自 1 月份开始, CPUE 开始增加至 4 月份达到峰值后, CPUE 开始逐步下降至 12 月份; 48.2 小区, CPUE 的变化趋势与 48.1 小区

相似, 但 48.2 小区的波动更为剧烈; 48.3 小区, CPUE 自 1 月份迅速增加至 7 月份达到峰值后又迅速下降至 12 月份(图 3-b)。

环境因子对 CPUE 的影响 48.1 小区南极磷虾渔场的适宜表温范围为 $-3\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但 CPUE 主要集中在表温 $-2\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (75.6%)范围内; 48.2 小区, 渔场适应表温范围为 $-2\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但 CPUE 多集中在表温为 $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (40.3%)和 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近; 48.3 小区, 渔场适应表温范围为 $0\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但 CPUE 主要集中在表温 $0.8\sim 2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (53.7%)范围内(图 4-a)。

从整体上看, 48.1 小区(52.8%)、48.2 小区(38.8%)和 48.3 小区(50.7%) 3 个区较大比例的 CPUE 值处于叶绿素 a 浓度为 $0\sim 0.2\text{ mg/m}^3$ 的范围内(图 4-b)。

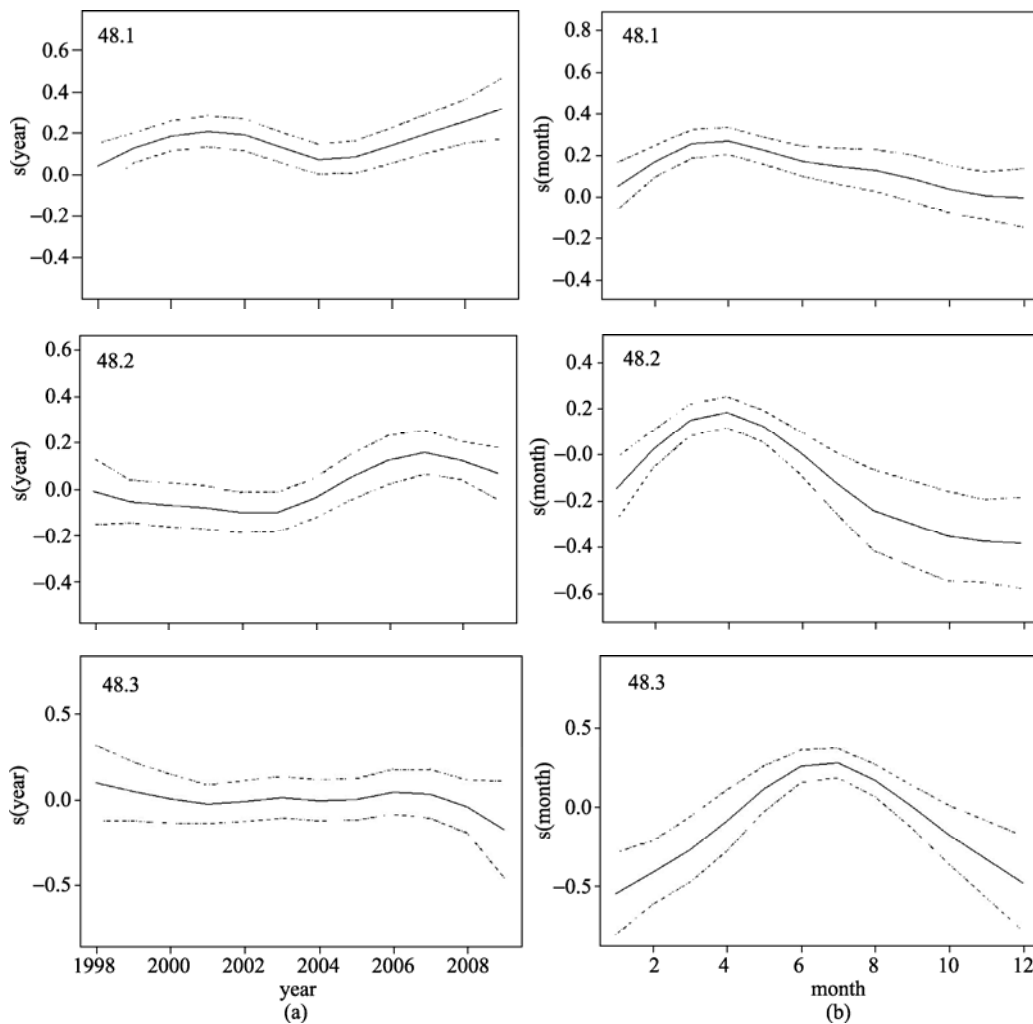


图 3 各区年份(a)及月份(b)对南极磷虾 CPUE 影响的 GAM 分析图
 Fig. 3 Impacts of year (a) and month (b) on CPUE of Antarctic krill fishery in subarea 48.1, 48.2 and 48.3 based on the generalized additive model

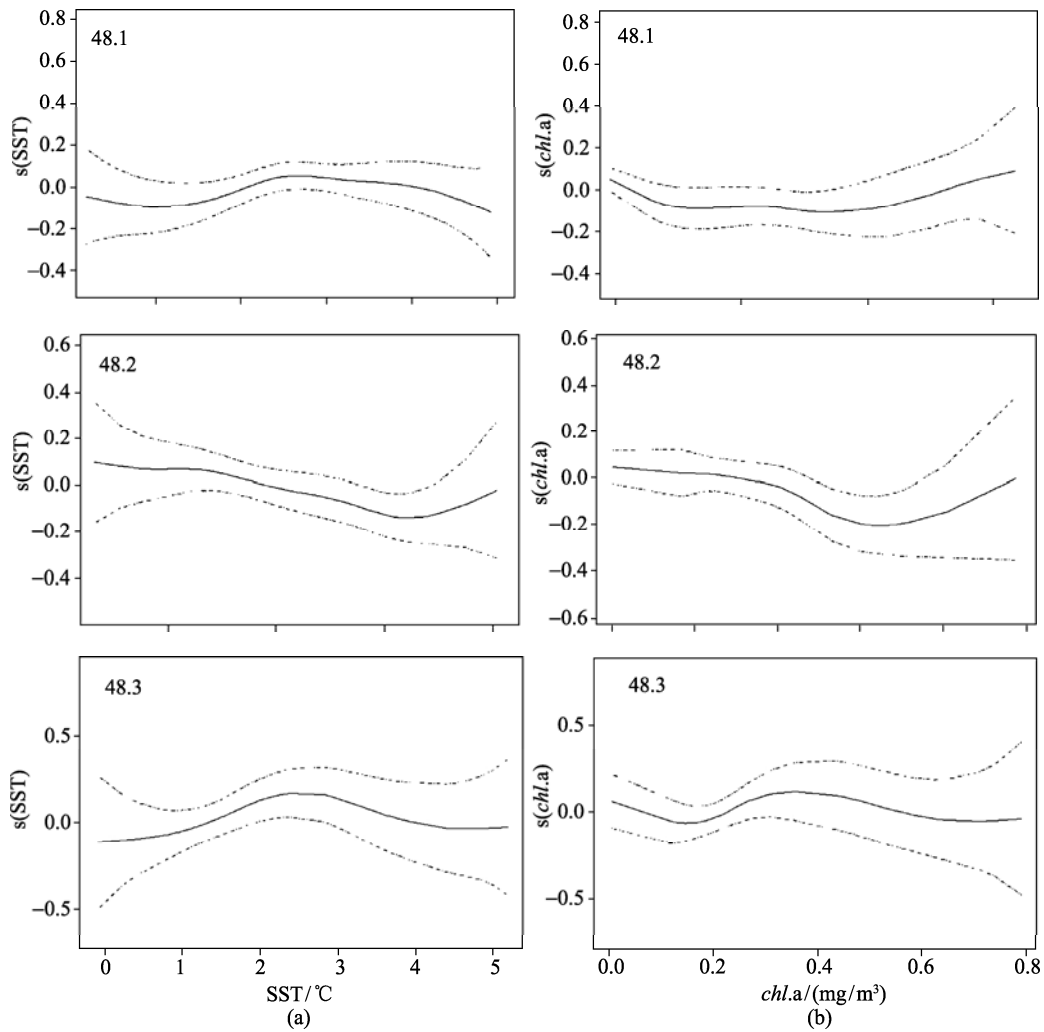


图 4 各区海水表层温(a)及叶绿素 a 浓度(b)对南极磷虾 CPUE 影响的 GAM 分析图

Fig. 4 Impacts of SST (a) and chlorophyll-a concentration (b) on CPUE of Antarctic krill fishery in subarea 48.1, 48.2 and 48.3 based on the generalized additive model

3 讨论

3.1 南极磷虾渔业 CPUE

多年来, CPUE 指数是否可以作为南极磷虾丰度指标一直是个悬而未决的问题。实践证明, 渔船对南极磷虾的可获得性并不一定与当地的南极磷虾密度成比例。一方面, 当地南极磷虾密度可简单地表示为某一特定区域内存在的南极磷虾平均数量(即 g/m^2)。另一方面, 南极磷虾可获得性不仅受到当地南极磷虾密度影响, 而且还受到船长依集群类型(块状大小、厚度和密度等)做出的决定影响。例如, 如果当地密度相同, 集群紧密不同, 则考虑到产品质量问题, 因虾群紧密而致拖曳时间短, 渔业可能偏向于捕捞集群紧密的虾群。尽管商业性渔业数据, 尤其是 CPUE 数据可作为分析南极磷虾丰度相对变化的全面而长期的数据序列^[20],

但受许多因素影响的 CPUE 指数的高度变化并不总能适于此目的^[3]。有时候, 渔民可能会在一个较小的海区内长时间地拖曳, 从而持续维持渔业的延续。当南极磷虾散布在一个较大的海区内时, 拖曳时间延长, 致使平均 CPUE 值减小, 但当南极磷虾分布相对集中, 且捕捞也仅在较小区内开展, 则这样的捕捞策略将会导致相反的效应。这种情形显示, 当该小区内南极磷虾生物量(丰度)事实上显著下降, 甚至一些捕食者也在力争发现足够的南极磷虾以维持后代的生存, 则尽管商业性捕捞作业仍发现当地的南极磷虾集群, 且通过改变捕捞策略维持渔业的延续, 这也反映出磷虾的可获得性较低。若使用商业性 CPUE 数据作为生物量指数或作为监视南极磷虾丰度变化的一个参数, 而渔获仅在较小区域内获得, 则结果将会存在一定的

疑问。此时,评估 CPUE 数据时,还需要考虑拖曳时间和捕获率等方面的因素,否则标准化后的 CPUE 值可能会错误地认为年变化或区域间相对保持稳定^[6]。20 世纪 80 年代末期,一些学者尝试利用模拟模型解决该问题,这些研究指出,将搜寻时间纳入到丰度指数分析当中非常重要,目的是改善其灵敏度^[7-8]。总的来讲,考虑到南极磷虾渔业船队作业策略的本质特征,CPUE 数据的利用非常有限^[15]。受加工能力限制的捕捞作业以及由此所获得的渔获量通常也受此因素制约。况且,由于南极磷虾以块状分布为特征,解释 CPUE 数据的方法也存在疑问。不过,若与南极磷虾丰度波动评估相结合,CPUE 指数可用于预测渔业的发展趋势并纳入到磷虾资源评估模型中^[21]。许多学者也曾利用 CPUE 指数分析南极磷虾渔业^[3, 7-9, 20, 22],但他们的使用仍存在疑问^[23]。

尽管如此,截止目前为止,CPUE 仍作为一项重要的指标用以分析南极磷虾渔业的资源状况及分布等。Siegel 等^[3]表示,1975—1988 年期间,48.1、48.2 和 48.3 小区内 CPUE 值年变化存在较大的波动,但其所使用的数据仅为前苏联和德国的南极磷虾渔业数据,该数据并不能代表整个南极磷虾渔业船队的状况,而其也认为数据中 CPUE 的一些高值仅能代表单艘渔船短期内(如,1 个月)的情况,并不能代表整个渔季及渔业船队的整体情况。另外,Siegel 等^[3]仅分析了名义 CPUE 的年变化和月变化。应该知道,名义 CPUE 因受许多因素(如船队因素、时空效应及环境因素等)的影响,并不能真正地代表资源丰度的变化,而标准化后的 CPUE 则有效地剔除了可能存在的干扰,因此在一定程度上可以认为标准化后的 CPUE 更适宜代表资源丰度的实际变化。Kawaguchi 等^[15]基于商业性渔捞日志数据计算 CPUE,以此作为南极磷虾丰度指标,并利用 LMM 模型对所获得的 CPUE 值进行了标准化,但其并未考虑到环境因素(如水温、叶绿素 a 浓度等)对南极磷虾资源分布及状况所造成的潜在影响,这也导致本研究无法与之比较。

3.2 环境因子与南极磷虾资源之间的关系

Priddle 等^[24]讨论了影响南极磷虾渔业 CPUE 的可能机制,并认为捕获率变动与 SST 有关。夏季渔期开始时的 SST 状况可用于预测整年的磷虾捕捞情况,而这种通过海况信息预测南极磷虾产量

的可靠性仅通过比较一些年的预测产量予以证实^[25]。Vanyushin^[26]也认为夏季渔期初期的 SST 信息可用于预测整年的南极磷虾产量。朱国平等^[27]通过我国渔船 2009—2010 年度在南极海域进行调查期间获得的数据得出,48.2 小区南奥克尼群岛水域的平均名义 CPUE 在表温范围 0.5~1.0 °C 及 1.0~1.5 °C 时较高的结论,而本研究中 CPUE 最高(1.197 t/h)时出现-1.0~-0.5 °C,其次为 0.5~1.0 °C,两者有一定的差异。Fedoulov 等^[14]分析了 48.3 小区南乔治亚岛水域南极磷虾渔业 CPUE 与海水表温之间的关系,并表示较低的渔获率与下一年春季夏季较高的水温之间存在相关性。

南极磷虾是一种喜冷水环境的浮游生物,其对海洋温度极为敏感,因此南极磷虾资源与 SST 之间存在着密切的关系^[28]。考虑到磷虾分布范围最暖与最冷栖息地的温差约为 7°C,因此 1~2°C 的水温变化对磷虾生理功能、分布及行为会产生显著的影响。尽管磷虾响应水温变化可能会在许多层面上体现出来,但其最终会通过生长和产量等予以反映。因此,磷虾不可能忍受水温的较大波动,高出其主要栖息地水温范围(-0.5~1°C)以外^[29]。同时,由于南极磷虾新陈代谢需求及肌体组织无法维持响应这样的水温变化,尽管磷虾短期内能够耐受水温出现一定的波动^[30],但在长期角度上不可能忍受 3.8°C 以上的水温^[31]。

另外,南极磷虾主要分布于沿岸叶绿素 a 浓度较高的水域^[32-33]。浮游植物长期稳定的积累可提供南极磷虾成功繁殖及仔虾生存所需要的食物来源^[33]。从空间上来看,在其栖息水域范围内,夏季南极磷虾资源密度与叶绿素 a 浓度呈现正相关关系,因此,夏季食物来源成为影响西南大西洋南极磷虾高密度的关键因素^[34]。但并非叶绿素 a 浓度越高的水域,南极磷虾的丰度就越高,Lipski^[35]曾表示,叶绿素 a 浓度最高的时候,南极磷虾丰度却非常低。Atkinson 等^[36]也表示,南极磷虾并不会栖息在高营养盐低叶绿素 a 浓度水域,主要栖息于食物浓度适中的水域(叶绿素 a 浓度为 0.5~1.0 mg/m³)。尽管许多学者研究了南极磷虾与叶绿素 a 浓度及其分布之间的关系,但叶绿素 a 浓度及其丰度对南极磷虾渔业的影响如何并未得到较好的研究,本研究分析了叶绿素 a 浓度与南极磷虾渔业 CPUE 之间的关系,并得出了一些初步的结论。此外,其他

学者对南极磷虾渔业 CPUE 与其它物理过程(如海冰状况、气温、海流和水团等)之间的关系进行了分析,但还需要对南极磷虾 CPUE 与更多物理机制之间的关系进行分析,从而理解他们之间的联系^[14]。可以预测,不久的将来,南极磷虾渔业将会不断扩展^[32]。因此,收集有关磷虾渔业方面的详细信息非常重要,以此评估环境因素或渔业压力所引起的南极磷虾生物量的波动^[20]。

感谢 CCAMLR 提供渔业数据及哥伦比亚大学气象数据库提供相关环境数据。感谢上海海洋大学海洋科学学院硕士研究生胡奎伟帮助处理渔业数据和环境数据的匹配。

参考文献:

- [1] 陈雪忠, 徐兆礼, 黄洪亮. 南极磷虾资源利用现状与中国的开发策略分析[J]. 中国水产科学, 2009, 16(3): 451-458.
- [2] Siegel V. A concept of seasonal variation of krill (*Euphausia superba*) distribution and abundance west of the Antarctic Peninsula[C] // Sahrhage D, ed. Antarctic ocean and resources variability. Berlin Heidelberg, Springer Verlag. 1988: 219-230.
- [3] Siegel V, Sushin V A, Damm U. Catch per Unit Effort (CPUE) data from the early years of commercial krill fishing operations in the Atlantic sector of the Antarctic[J]. CCAMLR Science, 1998, 5: 31-50.
- [4] Croxall J, Prince P, Reid K. Diet, provisioning and productivity responses of marine predators to differences in availability of Antarctic krill[J]. Marine Ecology Progress Series, 1999, 177: 115-131.
- [5] Everson I. Role of krill in marine food webs: the Southern Ocean[C] // Everson I (ed). Krill: biology, ecology and fisheries. Oxford: Blackwell Science, 2000: 194-201.
- [6] Quetin L B, Ross R M, Fritsen C H, et al. Ecological responses of Antarctic krill to environmental variability: Can we predict the future?[J] Antarctic Science, 2007, 19(2): 253-266.
- [7] Kawaguchi S, Nicol S, Taki K, et al. Fishing ground selection in the Antarctic krill fishery: trends in patterns across years, seasons and nations[J]. CCAMLR Science, 2006, 13: 117-141.
- [8] Taki K, Hayashi T, Naganobu M. Characteristics of seasonal variation in diurnal vertical migration and aggregation of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the Scotia Sea, using Japanese fishery data[J]. CCAMLR Science, 2005, 12: 163-172.
- [9] Sushin V A. Distribution of the Soviet krill fishing fleet in the South Orkneys area (subarea 48.2) during 1989/1990[J]. CCAMLR Science, 1998, 5: 51-62.
- [10] Maunder M N, Punt A E. Standardizing catch and effort data: a review of recent approaches[J]. Fisheries Research, 2004, 70(2-3): 141-159.
- [11] Venables W N, Dichmont C M. GLMs, GAMs and GLMMs: an overview of theory for applications in fisheries research[J]. Fisheries Research, 2004, 70(2-3): 319-337.
- [12] 牛明香, 李显森, 徐玉成. 基于广义可加模型的时空和环境因子对东南太平洋智利竹筴鱼渔场的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 1049-1055.
- [13] 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]. Fisheries Oceanography, 1999, 8(3): 178-198.
- [14] Fedoulov P P, Murhpy e, Shulgovsky K E. Environmental-krill relations in the South Georgia marine ecosystem[J]. CCAMLR Science, 1996, 3: 13-30.
- [15] Kawaguchi S, Candy S, Nicol S, et al. Analysis of trends in Japanese krill fishery CPUE data, and its possible use as a krill abundance index[J]. CCAMLR Science, 2005, 12: 1-28.
- [16] Guisan A, Edwards T C, Hastie T J. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: Setting the scene[J]. Ecological Modelling, 2002, 157(2-3): 89-100.
- [17] Swartzman G, Huang C H, Kaluzny S. Spatial analysis of Bering Sea groundfish survey data using generalized additive models[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1992, 49(7): 1366-1378.
- [18] Burnham K P, Anderson D R. Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach. 2nd Ed [M]. New York: Springer, 2002: 488.
- [19] Conover W J. Practical Nonparametric Statistics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1980: 493.
- [20] Litvinov F F, Sundakov A Z, Arkhipov V I. CPUE indices used in Soviet krill fishery statistics from 1977 to 1992 and their possible utility for evaluation of relative changes in krill biomass[J]. CCAMLR Science, 2004, 11: 165-177.
- [21] Hilborn R, Walters C J. Quantitative fisheries stock assessment: choice, dynamics and uncertainty[M]. London: Chapman & Hall, 1992: 570.
- [22] Kawaguchi S, Ichii T, Naganobu M. Catch per unit effort and proportional recruitment indices from Japanese krill fishery data in Subarea 48.1[J]. CCAMLR Science, 1997, 4: 47-63.
- [23] Camlr S C. Report of the Working Group on Ecosystem Monitoring and Management[R]. Report of the Twenty-first Meeting of the Scientific Committee (SC-CAMLR-XXI), Annex 4, 2002: 121-308.
- [24] Priddle J, Croxall J P, Everson I, et al. Large-scale fluctuations in distribution and abundance of krill - a discussion of possible causes[C] // Sahrhage D (ed) Antarctic Ocean and Resources Variability. Berlin: Springer-Verlag,

- 1988, 169–182.
- [25] Kawaguchi S, Nicol S. Learning about Antarctic krill from the fishery[J]. *Antarctic Science*, 2007, 19(2): 219–230.
- [26] Vanyushin G P. Sea-surface temperature and krill catches around South Georgia in December-February 1989-1991 and 1999-2001[J]. *CCAMLR Science*, 2002, 9: 165–172.
- [27] 朱国平, 冯春雷, 吴强, 等. 南极磷虾调查 CPUE 指数变动的影响因素初步分析[J]. *海洋渔业*, 2010, 32(4): 368–373.
- [28] Huang T, Sun L, Stark J, *et al.* Relative changes in krill abundance inferred from Antarctic fur seal[J]. *PLoS ONE*, 2011, 6(11): e27331.
- [29] Lee C I, Pakhomov E A, Atkinson A, *et al.* Long-term relationships between the marine environment, krill and salps in the Southern Ocean[J]. *Journal of Marine Biology*, 2010, 2010(ID 410129): 1–18.
- [30] Hirche H J. Temperature and Metabolism of Plankton .1. Respiration of Antarctic zooplankton at different temperatures with a comparison of Antarctic and Nordic krill[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology – Part A : Physiology*, 1984, 77(2): 361–368.
- [31] Tarling G A, Shreeve R S, Hirst A G, *et al.* Natural growth rates in Antarctic krill (*Euphausia superba*): I. Improving methodology and predicting intermolt period[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(2): 959–972.
- [32] Nishikawa J, Naganobu M, Ichii T. Distribution of salps near the South Shetland Islands during austral summer, 1990-1991 with special reference to krill distribution[J]. *Polar Biology*, 1995, 15(1): 31–39.
- [33] Marrari M, Daly K L, Hu C M. Spatial and temporal variability of SeaWiFS chlorophyll a distributions west of the Antarctic Peninsula: Implications for krill production[J]. *Deep-Sea Research II*, 2008, 55(3–4): 377–392.
- [34] Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E, *et al.* Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean[J]. *Nature*, 2004, 432: 100–103.
- [35] Lipski M. Chlorophyll a in the Bransfield Strait and the southern part of Drake Passage during BIOMASS-SIBEX (December 1984 - January 1985)[J]. *Polish Polar Research*, 1985. 6: 21–30.
- [36] Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E A. Oceanic circumpolar habitats of Antarctic krill[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, 362: 1–23.

Effects of temporal and environmental factors on the fishing ground of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the northern Antarctic Peninsula based on generalized additive model

ZHU Guo-ping^{1, 2, 3*}

(1. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

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

3. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The present study analyzed the spatial-temporal distribution of fishing ground for Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the subareas 48.1, 48.2 and 48.3 from 1998 to 2009 using the generalized additive model (GAM) based on the data derived from Statistical Bulletin (Volume 23) of Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCAMLR), and the relationship between standardized catch per unit fishing effort (CPUE) of Antarctic krill fishery and environmental factors [sea surface temperature (SST) and chlorophyll a concentration] were also analyzed. The results showed that the accumulation of deviance explained (%) of model to CPUE is 51.11, 69.25 and 65.82 respectively and the variation that provides the maximum contribution is the month for 3 subareas. Standardized annual average CPUE was stable in the 3 subareas from 1998 to 2009. The inter-annual variation on average CPUE in the subarea 48.1 was smallest and that of subarea 48.3 was larger than subarea 48.2. Annual variation on average CPUE had no significant difference among 3 subareas, within the subarea 48.2 and the subarea 48.3, however, remarkable difference can be found on annual average CPUE in the subarea 48.1. The monthly average CPUE only presented the unimodal distribution in the 3 subareas, and the peak value of CPUE in the subareas 48.1, 48.2 and 48.3 occurred in April, May and June respectively. The monthly average CPUE had no significant difference among 3 subareas, however, remarkable difference can be found on monthly average CPUE within 3 subareas. The suitable range of SST is -3 to 2°C in the subarea 48.1, -2 to 2°C in the subarea 48.2, 0 to 5°C in the subarea 48.3 respectively for forming Antarctic krill fishing ground and the dominant CPUE values ranged in the SST of -2 to 1°C in the subarea 48.1, -1 to 0°C in the subarea 48.2, 0.8 to 2.4°C in the subarea 48.3 respectively. The dominant proportions of CPUE values were in the range of 0 to 0.2 mg/m^3 for chlorophyll a concentration in the subarea 48.1 (53%), 48.2 (39%) and 48.3 (51%).

Key words: *Euphausia superba*; generalized additive model; CPUE; northern Antarctic Peninsula

Corresponding author: ZHU Guo-ping. E-mail: gpzhu@shou.edu.cn