DOI: 10.3724/SP.J.1118.2013.01274

南极大西洋扇区南极磷虾渔获率序列的振荡模态分析

杨晓明^{1,2,3,4},朱国平^{1,2,3,4}

- 1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306;
- 2. 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. 国家远洋渔业工程技术中心, 上海 201306;
- 4. 农业部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海海洋大学, 上海 201306

摘要:为了解释南极大西洋扇区的 48 区南极磷虾(Euphausia superba)资源的多尺度振荡模态特征及其与环境振荡 之间的响应关系,采用经验模态分解方法,对 1982–2011 年间的南极磷虾月均渔获率进行了分析。结果表明,其振 荡表现出了 0.5 a、1 a、1.5 a、2.5 a、7 a 和 11 a 等多个周期,其中高频振荡对南极磷虾资源变动影响较大,低频振 荡影响较小; 3 个亚区渔获率都为冬高夏低季节性振荡,48.1~48.3 亚区最高值依次出现在 5 月、 6 月和 9 月,渔获 率的最低值出现在 1 月;所有振荡周期中以 1 a 为最主要振荡周期(方差解释率为 46.7%),南极磷虾年补充规模对 其渔获率最为重要;其 2.5 a 振荡和海冰面积 3.0 a;振荡有关;渔获率低频振荡周期与气候-海流系统振荡周期有 关。海冰面积和渔获率有较好的正相关关系(相关系数为 0.44,位相差 10 个月)。海冰面积异常振荡会在 8~11 个月 之后对渔获率和渔获率异常产生的正相关影响。磷虾资源的振荡是环境振荡和磷虾生物周期综合作用的反映。

关键词: 南极磷虾; 渔获率; 振荡模态; 经验模态分解; 南极大西洋扇区 中图分类号: S 932.4 ______文献标志码: A _______文章编号: 1005-8737-(2013)06-1274-10

南极磷虾(*Euphausia superba*)(下简称"磷虾") 是极地生态系统食物链中最为重要的一个环节^[1-2], 被称为南极生态系统中的"关键种",其资源存在 显著的季节性变动^[3]、年际变化和次年代际振荡 ^[4-8],而驱动这些振荡的内在动力关键性因素包括 海冰面积、叶绿素浓度及南极绕极流(Antarctic Circumpolar current, ACC)等因素^[1,9-11]。一些学者 从生物学和物理学过程解释了产生这些因素和磷 虾资源变动的联系机制^[1,9-10],但迄今为止少有学 者从时间序列角度对磷虾资源振荡特征进行详细 的定量研究。本研究利用经验模态分解方法 (Empirical Mode Decomposition, EMD),估算磷虾 资源时间序列中蕴含的不同时间尺度的振荡特征, 从而探讨以下问题: (1) 南极大西洋扇区磷虾资源 由哪些尺度的振荡构成, (2) 哪些尺度的振荡对磷 虾资源变化起主要作用, 这些尺度的振荡和环境 振荡的关系如何。

本研究以中国磷虾的最主要捕捞区域——南极海洋生物资源养护委员会(CCARMLR)大西洋扇区 CCAMLR 48 区的 3 个分区(48.1、48.2 和 48.3 亚区)的时间序列为研究对象,了解磷虾资源的多尺度振荡特征,为该海域磷虾资源的渔业管理、CPUE 标准化、渔业信息分析和渔情预报等提供科学参考。

通信作者: 朱国平, 副教授. E-mail: gpzhu@shou.edu.cn

网络出版时间: 2013-09-27 17:50

收稿日期: 2013-06-25; 修订日期: 2013-08-21.

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAD13B03);国家 973 计划项目(2012AA091802);国家海洋局极地科学重点实验室开放基金项目(KP201210);上海海洋大学"海鸥计划"项目(B-5003-11-0023).

作者简介:杨晓明(1972-),男,副教授,从事渔业地理信息系统及渔业海洋学研究.E-mail:xmyang@shou.edu.cnm

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3446.S.20130927.1750.001.html

1 材料与方法

1.1 研究区域与时间

本研究区域包括 CCAMLR 48.1 亚区(50°-70°W, 60°-65°S), 48.2 亚区(30°-50°W, 57°-64°S)和 48.3 亚 区(30°-50°W, 50°-57°S), 见图 1。时间范围从 1982 年 1 月-2011 年 12 月, 时间分辨率单位为月。





1.2 数据来源

1.2.1 磷虾渔业数据 磷虾渔业数据来自南极海 洋生物资源养护委员会。因其所提供的数据库涵盖 了辖区内所有渔业的数据,故依研究目的,本研究 对原始数据做如下预处理:(1)提取捕捞对象为磷虾 (KRILL),捕捞区域为南极大西洋扇区的 CCAMLR 48.1、48.2 和 48.3 三个亚区的生产统计数据,选取的 内容包括:编号、年份、月份、国别、捕捞区域编号、 捕捞时间(h)和渔获量(t)等;(2)在第一步基础上,剔 除缺少捕捞时间和渔获量记录,生成一个单位捕捞 努力量渔获量(Catch Per Unit of Effort, CPUE)表单, 作为本研究对象。由于 1982–2011 年间存在较少的 月份数据缺失,为了数据完整性,本研究对这些月 份的数据采用线性插值方法进行补充。

1.2.2 海洋环境数据 海冰数据为美国国家航空航天局(NASA)Cryosphere Science Research 提供的每月南极各主要海区的海冰面积时间序列 (http://neptune.gsfc.nasa.gov/),时间从 1978 年 1

月-2011 年 12 月, 南极地区提供 6 个扇区和海冰 总面积的时间序列数据, 本研究选取和 CCAMLR 48 区所处的大西洋扇区海冰面积数据。

1.3 数据分析方法

1.3.1 CPUE 计算 磷虾渔船主要以单船中层拖 网为主,属于大型尾滑道拖网加工船,作业水深 一般在 200 m 以浅水层,作业区域主要分布在海 冰边缘及开阔水域。通常认为,单位捕捞努力量 渔获量可作为渔业资源丰度的主要指标^[12],其大 小也常被作为资源丰度的相对指数,用以反映资 源丰度的变化,因此本研究渔获率以名义 CPUE(t/h)作为表示(下称 CPUE)。计算方法为:

 CPUE = C/f
 (1)

 式中, f 表示有效拖网作业时间即捕捞努力量(h),

 C 表示该段时间内磷虾捕捞产量(t)。

为减少季节变化的对资源变动的影响,首先 计算了 30 年内各月平均 CPUE, 然后计算 30 a 各 月 CPUE 的异常值。在经验模态分析中,对 CPUE 值采用标准化处理,计算方法为:

aCPUE(*i*, *j*) = (CPUE(*i*, *j*) – mCPUE(*j*))/1000 (2) 式中, *i* 代表年份, *j* 代表月份。aCPUE(*i*, *j*)代表 CPUE 异常, mCPUE 表示 30 年间各月的平均 CPUE。

1.3.2 经验模态分解 利用经验模态分解法分析 资料中各个独立因子,该分解法由 Huang 等^[13]于 1998 发表,其优点是克服使用傅里叶分析(Fourier analysis)时所受到的限制,且在处理非线性及 非平稳性资料上具有更佳的效果。该分解法涵盖 两个步骤:第一,将实测序列(经验资料)分解为 数目不多的内禀模态函数分量(Intrinsic Mode Function, IMF)和一个长期趋势项(Trend);第二, 分别对每个 IMF 分量作周期分析,得知序列中蕴 含的不同时间尺度的振荡特征。典型的 IMF 具有 如下特征:穿过零点和极值点的数目相等,而且 上、下包络线关于零线局部对称;对于所有 IMF, 从频域上观察,从高频逐渐到低频。其表达式为:

$$X(t) = \sum_{i=1}^{n} C_{j}(t) + r_{n}(t)$$
(3)

上式的含义为: 一个复杂的原序列 X(t), 经 过逐级筛选过程后, 可以分解为 n 个内禀模态函 数 IMF 分量以及一个趋势项(剩余)r_n(t)。 **1.3.3** 交相关分析 采用 SPSS 软件交相关分析工 具,获取两时间序列时滞参数及相应的相关系数。

2 结果与分析

2.1 渔获率序列的振荡模态结构

磷虾 CPUE 月均异常值时间序列可视作由几个 周期波动叠加而成。为获得这些周期性波动特征,采 用 EMD 方法对标准化 CPUE 进行模态分解计算, 获得了 6 个内禀模态函数分量(IMF)和一个趋势项 (图 2)。图 2 是原序列从高频到低频分量逐级分解的 过程,其中图 2(a)为异常序列,图 2(b)-(g)为其 6 个 内禀模态函数分量,图 2(h)为趋势项。由图 2(a)可知, 磷虾渔业 CPUE 序列波动较不规则,但分解后的各 IMF 分量均表现为围绕零值线,且局部极大值和极小 值基本对称的振荡形态,其信号的非平稳程度较原始 信号序列低。为了解各 IMF 分量对于原序列的相对重 要性,用方差贡献表现和相关系数衡量各分量对原序 列的重要性;同时采用傅里叶变换计算各 IMF 分量功 率谱,获得各分量的振荡周期,结果见表 1。



图 2 近 30 年南极大西洋扇区(50°-70°W, 60°-65°S; 30°-50°W, 57°-64°S; 30°-50°W, 50°-57°S)磷虾渔获率(异常)序列(a) 和 6 个 IMF 分量(b)~(g)及趋势项(h)

Fig. 2 Time series of outliner (a), 6 IMF components (b ~ g) and trend item (h) on catch rate of Antarctic krill fishery in the recent 30 years in the Atlantic Sector of Antarctic Ocean(50°-70°W, 60°-65°S; 30°-50°W, 57°-64°S; 30°-50°W, 50°-57°S)

Tab. 1 Variance contribution and correlation analysis on IMF components of Antarctic krill in the Altantic sector of the Antarctic Ocean Antarctic Ocean							
	48 🗵	方差	方差解释百分比/%	周期区间/a	相关系数		
	Area 48	variance	variance contribution	period	Correlation coefficient		
	第1模态分量 IMF1	8.3388	35.60	0.50	0.4384**		
	第 2 模态分量 IMF 2	10.9497	46.74	0.97	0.5555**		
	第3模态分量 IMF 3	2.1707	9.27	1.64	0.3609**		
	第 4 模态分量 IMF 4	0.4029	1.72	2.51	0.1623**		
	第 5 模态分量 IMF 5	1.0002	4.27	7.11	0.2123**		

表 1 南极大西洋扇区 IMF 分量对原序列的方差贡献各 IMF 分量的相关性分析

注: "*"表示通过水平的显著性检验, "**"表示通过 P=0.01 水平的显著性检验. 48 区位置: 50°-70°W, 60°-65°S; 30°-50°W, 57°-64°S; 30°-50°W. 50°-57°S.

2.40

Note: * * 'means passing the 5% significance level test; * ** 'means passing the 1% significance level test. The location of Area 48: 50°-70°W, 60°-65°S; 30°-50°W, 57°-64°S; 30°-50°W, 50°-57°S.

图 2 中,存在 IMF1(图 2b)和 IMF2(图 2c)两个 高频振荡, IMF1 表示 CPUE 异常序列的涨落时间 尺度最短(0.5 a), IMF2 反映原序列的 1 a 周期振荡 变化, 其振幅分布在-10~10; 原序列的值为各内 禀模态函数的振幅值叠加而成, IMF1 和 IMF2 对 原序列贡献较大,分别占总方差 35.6% 和 46.7%(表1,两者合计能够解释82.3%方差),两者 与原序列的相关系数分别为 0.438 4 和 0.555 5 (表 1)。 因此,可以认为磷虾资源变动主要受到1a及0.5a 为周期的高频振荡控制。IMF1 和 IMF2 的振荡幅度 变化中存在着显著差异, 图中阴影部分为振荡幅度 较大区域,对应IMF1和IMF2振荡幅度大的原序列 值也较大。由图 2 可知, 1982-1984 年间振幅变化最 大,表明这段时间磷虾的渔获率较高;1984-1993 年较长的一段时间内 IMF1 和 IMF2 的振荡幅度较 小,与IMF3~IMF6保持在同一个水平上,这段时期 的渔获率水平较低;随后,1994-1995年再次显著 振荡; 1996-2001 年振荡幅度减弱; 2001 年后, 振荡 幅度保持在较高稳定状态下,直到2009年,这段时 间为相对稳定且较长高振幅的时期;近2年、振荡 幅度再次表现出下降趋势。

0.5631

在年际变化振荡模态函数中, IMF3 分量(图 2d) 表示 1.5 a 左右的振荡变化, 振幅在-4~4, 并保持 相对稳定, 方差的解释率为 9.27%, 相关系数为 0.360 9, 这说明 IMF3 为重要的资源变动因子。 IMF4~IMF6(图 2e~2g)振幅为-1~1,比 IMF1、 IMF2 小一个量级, 分别表示 2.5 a(与 ENSO 周期

对应), 7.1 a(与 ENSO 的 7 a 周期对应)和 11 a(与太 阳黑子活动周期对应)振荡变化;尽管方差的解释 率相对较低,相关系数也较弱,但这些均为全球环 境变化的振荡周期在磷虾资源波动上的某种反映。

10.67

30 a 磷虾的渔获率趋势线见图 2h, 形态上近似 对数分布, 1982 年开始渔获率缓慢下降, 1991 年左 右降至最低值,后明显上升,至2009年达最大值, 近年来又开始出现缓慢下降趋势。

2.2 渔获率季节性振荡模态特征

基于对相邻的 48.1, 48.2 和 48.3 三个亚区的 CPUE 值和渔获量的季节性差异分析,由此可为 渔船的捕捞策略提供参考,本研究分别计算各亚 区 CPUE 和渔获量的各月均值的分布情况(图 3)。 从图 3 中可见, (1) 所有亚区的季节性变化均非常 明显, CPUE 和总渔获量的基本同步(除了 48.1 亚 区于 10 月份出现第 2 峰值外), 渔获率高(CPUE 值高)会带动更多的捕捞努力量,从而使得渔获量 (Catch)更高。(2) 季节性变化幅度最小的亚区为 48.1 亚区, 最大的为 48.3 亚区。(3) 西南端的 48.1 亚区, CPUE和渔获量的最高值均在5月, 4-7月的 产量和渔获率较高;而 48.2 亚区最高值出现在 6 月,48.2 亚区高峰比 48.1 亚区推迟 1 个月,48.3 亚 区又较 48.2 亚区推迟了 3 个月。

2.3 海冰面积与磷虾渔获率的相关分析

为了解 CPUE 振荡与海冰面积的相关关系, 本研究对海冰面积序列数据进行了如下步骤的处 理和分析: 首先, 为了降低季节变化对分析结果

0.2058**

第6模态分量 IMF 6



- 图 3 磷虾渔业 48 区各亚区(48.1:50°-70°W, 60°-65°S;
 48.2:30°-50°W, 57°-64°S; 48.3:30°-50°W, 50°-57°S)
 CPUE(左)和平均渔获量(右)月变化
- Fig. 3 Monthly variations on the CPUE (left) and average catch (right) of Antarctic krill fishery in the 3 subareas (48.1:50°-70°W, 60°-65°S; 48.2:30°-50°W, 57°-64°S; 48.3:30°-50°W, 50°-57°S) of Area 48

干扰,对该海域海冰面积逐月数据减去对应月份 的平均面积数据,获得海冰面积异常序列数据; 接着,采用 EMD 方法对海冰面积异常序列进行 IMF 分解,获得各内禀模态函数分量及其趋势项; 然后,对各 IMF 分量进行周期和方差值计算;最后,在上述计算基础上,对 CPUE 异常序列及其 IMF 分量和海冰面积、海冰面积异常和海冰面积 异常 IMF 各分量进行相关性和时间差分析。

对南极大西洋扇区海冰面积异常序列的经验 模态分解计算,提取了 6 个内禀模态函数分量和一 个趋势项,计算获得各内禀模态函数 IMF 分量的方 差及周期(表 2)。由表 2 中可以发现,海冰面积异常 的振荡周期没有出现一个非常重要周期特征,最主 要的振荡周期在 3 a 左右,方差贡献率近 24%。除 此之外, 0.47 a、0.91 a、1.29 a、10.67 a 和 14.22 a 左右的周期振荡较为相近,方差贡献均超过 10%。

通过对 CPUE 序列与海冰面积的相关分析及 时间差估算,本研究设交相关的最大时间差为 12 个月,选取绝对值的最大相关系数及其对应的时 间差(表 3)。

由表3可发现, CPUE 和海冰面积高度相关(相 关系数0.44),海冰面积先于 CPUE 变化10个月; CPUE 与海冰面积异常之间具相关性(相关系数为 0.18),海冰面积异常出现后8~11个月, CPUE 出现 相应变化; CPUE 异常和海冰面积之间无相关性; CPUE 异常和海冰异常之间存在一定的相关性(相 关系数为0.21),海冰面积异常变化先于 CPUE 异 常8个月。值得注意的是,海冰面积异常对 CPUE 异常的影响比对 CPUE 的影响更显著,其相关性 更强。

对 CPUE 异常和海冰面积异常两者的振荡 IMF 分量进行相关分析及时间差分析,并进一步 对通过显著性检验的序列因子及其对应的相关系 数和时间差(表 3)进行分析后发现,海冰面积异常 的 IMF 和周期相近的 CPUE 异常的 IMF 分量相关

表 2 南极大西洋扇区海冰面积的 IMF 分量方差贡献及相关性分析

 Tab. 2
 Variance contribution and correlation analysis on IMF components of seaice coverage in the Altantic sector of the

Antarctic Ocean

海冰面积内在模态组成	第1模态分量	第2模态分量	第3模态分量	第4模态分量	第5模态分量	第6模态分量
IMF components of seaice	IMF1	IMF 2	IMF3	IMF 4	IMF 5	IMF 6
方差 variance	0.1650	0.2048	0.1628	0.2785	0.1288	0.2237
方差解释/% variance contribution	14.18	17.60	13.99	23.93	11.07	19.23
周期 period	0.47a	0.91a	1.29a	3.05a	10.67a	14.22a

Tob 3

Tab. 5 Cross-correlation analysis between scale coverage and Cr OE of Antaretic Kim fishery					
CPUE 和》	每冰面积相关分析因子	相关系数	CPUE 的延迟数/月		
correlation analysis fa	ctors of seaice coverage and CPUE	correlation coefficient	lags of CPUE/month		
CPUE	海冰面积 seaice coverage	0.44**	-10		
CPUE	海冰面积异常 seaice coverage anomaly	0.18**	-11~-8(相近 close)		
CPUE 异常 CPUE anomaly	海冰面积 seaice coverage	0.07	-11		
CPUE 异常 CPUE anomaly	海冰面积异常 seaice coverage anomaly	0.21**	-8		
CPUE 异常 IMF2(0.97 a) CPUE anomaly IMF2	海冰面积异常 IMF2(0.91 a) seaice coverage anomaly IMF2	-0.25**	-5		
CPUE 异常 IMF3(1.64 a) CPUE anomaly IMF3	海冰面积异常 IMF3(1.29 a) seaice coverage anomaly IMF3	-0.39**	-1		
CPUE 异常 IMF4(2.51 a) CPUE anomaly IMF4	海冰面积异常 IMF4(3.05 a) seaice coverage anomaly IMF4	0.31**	-6		

表 3	磷虾渔业 CPUE 和海冰面积的父相大结果
Cross correlation on	alusis between series equences and CDUE of Antonetic krill fishery

注:"*"表示通过 0.05 显著性检验,"**"表示通过 0.01 显著性检验.

Note: '*' means passing the 5% significance level test, '**' passing the 1% significance level test.

性较高。CPUE 最重要的 1a 振荡周期 IMF2 和海 冰面积 IMF2 相关系数为-0.25,时间延迟 5 月; CPUE 的 IMF3 也是重要的振荡周期,和海冰面积 IMF3 相关性较强,相关系数为-0.39,时间延迟 1 个月。CPUE 中,方差较小的 IMF4 和海冰面积异 常最重要的 IMF4 周期相关性也较好,相关性为 0.31,时间延迟 6 个月,这个周期为2~3 a的振荡 周期和全球 ENSO 周期基本一致,其对磷虾资源 影响较小,而对海冰面积影响却较大。

3 讨论

3.1 渔获率振荡区域差异、幅度和趋势特征

研究中可以发现, CCAMLR 48 区的 3 个亚区 CPUE 均存在明显的冬高夏低季节性振荡特征, 而且冬季高值自南向北逐渐出现, 48.1 亚区振荡 幅度最小, 典型的季节性振荡最高值出现在 5 月 份, 最低出现在 1月份; 48.2 亚区最高出现在 6月, 最小出现在 11 月; 48.3 亚区最高值出现在 9 月, 最低值 1 月, 且只在冬季有较好的渔获率, 其他 月份渔获率较低。根据上述的时空变动特征, 结 合磷虾生活习性, 可大致推测其季节性行为模式, 其分布区域随季节和成熟期而有较大的变化。磷 虾为喜低温动物, 对温度非常敏感, 冬季海冰面 积北扩, 海水温度下降, 同时位于最北的 48.3 亚 区(南乔治亚群岛)夏季繁盛的藻类能为其提供丰 富的食物^[9,11,14]。冬季结束,海冰边界南退,磷虾 也逐渐返回至 CCAMLR 48.1 亚区。

EMD 分解获得趋势项后也可看出, 1992 年后, 渔获率有一个较长时间的增长过程。通常影响渔 获率的主要因素包括渔业资源量、环境条件和渔 业因素等^[15]。就渔业资源量而言,基于调查数据 和声学调查影像分析, Atkinson 等^[11, 16]认为, 磷 虾渔业资源呈持续下降趋势,自 20 世纪 80 年代 至今,资源量下降幅度在 38%~80%。据 Nicol 等^[17] 报道, 磷虾渔业经过了几个明显的阶段, 20世纪80 年代, 磷虾渔业主要为前苏联控制, 年渔获率在 20万t以上。随着1991年前苏联的解体,1992年 渔获量直线下跌。1992 年至 2004 间的渔获主要 来自日本船队,年捕捞水平在 10 万~20 万 t。 2003/2004 年渔季后, 日本渔获量开始衰减, 但随 着韩国、挪威及英国等进入该渔业,总渔获量开 始上升。近来,挪威研究并开发了新的磷虾捕捞 技术(泵吸式拖网捕捞),采用生态连续捕捞的方 式,避免了磷虾受挤压死亡,使磷虾的单船捕捞 产量大幅度提高。鉴于本研究中 CPUE 保持持续 增长态势,因此可认为这种增长在一定程度上来 自于捕捞技术及磷虾加工工艺的不断提高所致。

3.2 渔获率振荡周期性与海洋环境的关系

磷虾渔业资源振荡与海洋环境的年际变化密 切相关。磷虾是一个生命史较长的(5~7 a), 喜好 集群的甲壳类浮游生物,同时需大量饵料补充能量,这些需求出现在不同的生命阶段,且对饵料种类的需求也不一样,其需要充分利用表层、底层和海冰环境;在仔稚时期,水平和垂直方向上均存在着非常复杂的移动过程,东向的绕极流ACC、西向近岸流和上升流最为重要^[18–19]。

本研究发现, 1982-2011 年的 30 a 内, 海冰面 积变动存在 0.5 a、 0.9 a、 1.3 a、 3 a、 11 a 和 14 a 左右等6个振荡周期。其中主要周期为3a周期(近 1/4 方差解释率), 其他周期对方差影响相近, 为 次要周期。卞林根等^[20]研究认为, 南极海冰面积 具有 10 a、3~5 a 和 2 a 左右的准振荡周期。马丽 娟等^[21]采用 Hardly 数据认为, 南极海冰在不同区 域海冰变化趋势和周期不同,其南极半岛地区海 冰最少, 变化也小; 但不同区域的海冰均存在着 较明显的 2~3 a 和 5~7 a 主振荡周期。这与本研究 的结果有些不同,其原因可能在于:(1)这些研究 主要观察年际变化,均采样了12个月的滤波平滑 转换, 但主要振荡周期和本研究中 3 a 主周期相 近; (2) 本研究仅采用了维德尔海部分海域海冰 面积数据。在海洋环境和资源周期相关性分析中, 本研究发现 CPUE 和海冰面积及 CPUE 变动和海 冰面积变动序列之间存在着显著地正向相关关系, 两者的相位差分别为 CPUE 值延迟 10 月和 8 个月 (表 3)。通常认为、磷虾补充量和一个好的冰期有 非常强的相关性^[22],但这种相关性的内在机制还 不十分清楚,可能原因有多种,冬季大面积的海 冰在其十分关键的越冬时期, 能够增加幼体成活 率,能提供逃避捕食者、供给食物来源(冰藻),冰 藻也有利于当春季海冰融化时浮游藻类的爆发, 从而为增加了越冬幼体的生存率^[22]。补充的成功 也可能依赖于产卵的时间和规模。当海冰融化时, 浮游藻类爆发, 能够为性腺的快速发育提供充足 的食物,这将有利于亲体更早产卵,并且在一个 繁殖季节产下更多的卵^[18]。Siegel^{19]}提出了一个 概念模型用于估算磷虾补充量和海冰的关系,考 虑了海冰对繁殖和幼体成活率的影响。大面积的 海冰和冬季的海冰持续长时间,导致晚春和初夏 时期的高的繁殖输出,自然就会出现下一个初级

和夏季的高出平均值的补充量。冬季海冰面积扩 大,接下来的产卵季节幼体的成活率就会增加。 陈峰和戴立峰^[23-24]分别对南极 48 区和 48.2 亚区 磷虾资源和海冰关系做了相应研究。

磷虾 CPUE 多年的年际振荡周期中 2.5 a 和海 冰 3 a 的振荡相关性较高,表现出较好的一致性, 位相差为 6 个月(表 3)。许多研究认为,该区域受 到厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)变动引起的经向大 气变化强烈影响,表现出 3~5 a 周期性^[25-26]。研究 认为,海冰减少让更多的南向表面风,沿着南极 半岛西部气温达到最高,磷虾资源显著地衰退, 反映负面种群效应,这种效应为 3~4 a 周期^[27-28]。 在 3~4 a 周期的季节性海冰周期下,樽海鞘桡足动物 丰度和磷虾补充成功也表现出一定的周期振荡^[29]。 3.3 资源振荡周期性特征

磷虾资源振荡是自然环境和生物学进程相结 合的一个过程。资源的振荡周期和磷虾自身生物 学特征密切相关,以1a为周期的繁殖补充,准备 产卵磷虾在每年夏季(连续的 4 个月内)在开阔海 域产下大量的卵^[30];并在半年后,即 2 龄以后达 到性成熟,第2年或者第3年开始繁殖,每次产卵 之后,"幼化(re-juveniles)"一次,生命周期一般 为 4~5 a^[31]。王荣和鲁北伟^[32]对磷虾年龄组成发 现,5⁺龄个体比重较小,3⁺龄虾占优势,生殖后的 死亡率相对高;朱国平等^[33]则发现夏季存在 5⁺ 龄及以上占优势的虾群。

本研究结果显示,磷虾资源年际的振荡模态 周期有 0.5 a、1 a、1.5 a、2.5 a、7 a 和 11 a 多个 周期,通过对环境影响、生物特性分析后认为,磷 虾资源的 0.5 a 振荡周期,虽然和海冰面积变动 0.5 a 周期相同,但两者相关关系并没有通过显著 性相关检验,尽管生物因子和非生物环境因子共 同作用是一种致因,但其原因可能较为复杂,需 要采用多因子进行深入探讨;1 a的振荡周期,基 本上可以认为 1 a 的生物补充周期,以及海冰 1 a 周期振荡对补充的影响(表 3)共同作用形成,也是 最主要的振荡周期,决定着近 50%的方差。

磷虾资源的 1.5 a 振荡,因环境因子和生物因 子均没有对应周期,因此可以认为是 1 a 和 0.5 a 振荡的交叠产生,其也和海冰面积 1.3 a 左右的振荡存在明显负相关。

磷虾资源的 2.5 a 振荡, 和海冰面积的 3 a 振 荡周期较好的正相关, 两者存在 6 个月的位相差 (表 3), 而且和磷虾的 2~3 a 成熟繁殖期相对应, 因此, 本研究认为这个周期是一个较好的补充发 生后, 这些补充个体在 2.5 a 后成功地补充到种群 中去。这个和 Loeb^[34]根据成功繁殖的 1999/2000、 2000/2001 和 2001/2002 年龄组影响, 发现可能存 在磷虾种群有利于早期的大小, 存在 2~3 a 的时 间间隔能够存在一个好的补充, 结论相一致。不 过 2.5 a 的振荡对磷虾资源的影响仍非常有限。

对于低频 7 a 的次年代际振荡, Murphy 等^[35] 认为向东的绕极地流过程对冬季海冰有一个 7~9 a 的周期, 两者之间是否存在相关关系需要进一步 研究。对于磷虾资源 10.7 a 周期振荡和太阳黑子 活动周期 11 a 周期能够较好地吻合。

4 结论

(1)海冰面积和渔获率有较好的正相关关系, 两者的位相差为 10 个月,即通常所谓的头年冬 季的海冰面积和强度对第2年的磷虾资源有较好 的正作用;海冰面积振荡异常会在 8~11 个月之 后对磷虾的渔获率和渔获率异常产生明显的正 相关影响。

(2) CCAMLR 48 区磷虾资源的振荡是在海洋 环境振荡影响下磷虾的生物与物理因素共同作用 的结果。其振荡表现出了 0.5 a、1 a、1.5 a、2.5 a、 7 a和11 a等多个周期,其中高频振荡对磷虾资源 变动影响较大,低频振荡影响较小;以 1 a 为主 要振荡周期,近 50%的方差解释率,这与海冰面 积的1 a振荡周期以及1 a的生物补充周期相一致, 说明了每年的磷虾补充上成功与否对渔获率起最 重要作用;其次为 0.5 a 周期的季节性振荡(方差 解释率为 35.6%);1.5 a的周期为两个主要振荡周 期的合成结果;2.5 a 振荡和海冰面积振荡有关; 渔获率的低频振荡周期(7 a和 11 a的振荡)和气候-海流系统振荡周期有关。

(3) CCAMLR 48.1、48.2 和 48.3 三个亚区渔

获率都为冬高夏低季节性振荡,而且 CPUE 高值 自南向北依次出现,48.1 亚区最高值出现在5月, 48.2 亚区最高出现在6月,48.3 亚区最高值出现在 9月;3个亚区 CPUE 的最低值基本都出现在1月; 3个区的季节振荡差异在于48.1 亚区振荡幅度最 小,48.3 亚区渔获率季节差异最大;48 区磷虾在资 源量显著下降的趋势中,CPUE在48.1,48.2 和48.3 三个亚区均表现出上升趋势,48.3 和48.2 亚区较 48.1 亚区更明显;48 区的 CPUE 趋势较好增长来自 于捕捞技术和针对磷虾加工工艺的不断提高。

参考文献:

- Hofmann E E, Murphy E J. Advection, krill, and Antarctic marine ecosystems [J]. Antartct Sci, 2004, 16(4): 487–499.
- [2] 孙松, 刘永芹. 南极磷虾与南大洋生态系统[J]. 自然 杂志, 2009, 31(2): 88-90.
- [3] Lascara C M, Hofmann E E, Ross R M, et al. Seasonal variability in the distribution of Antarctic krill, *Euphausia superba*, west of the Antarctic Peninsula [J]. Deep-Sea Res I, 1999, 46(6): 951–984.
- [4] Reid K, Barlow K, Croxall J, et al. Predicting changes in the Antarctic krill, *Euphausia superba*, population at South Georgia [J]. Mar Biol, 1999, 135(4): 647–652.
- [5] Murphy E, Watkins J, Trathan P, et al. Spatial and temporal operation of the Scotia Sea ecosystem: a review of large-scale links in a krill centred food web [J]. Philos Trans R Soc Lond, B, 2007, 362(1477): 113–148.
- [6] Loeb V J, Hofmann E E, Klinck J M, et al. ENSO and variability of the Antarctic Peninsula pelagic marine ecosystem [J]. Antarct Sci, 2009, 21(2): 135–148.
- [7] Plourde S, Winkler G, Joly P, et al. Long-term seasonal and interannual variations of krill spawning in the lower St Lawrence estuary, Canada, 1979–2009 [J]. J Plankton Res, 2011, 33(5): 703–714.
- [8] Siegel V. Krill stocks in high latitudes of the Antarctic Lazarev Sea: seasonal and interannual variation in distribution, abundance and demography [J]. Polar Biol, 2012, 35(8): 1151–1177.
- [9] Fedoulov P P, Murphy E, Shulgovsky K E. Environmentkrill relations in the South Georgia marine ecosystem [J]. CCAMLR Sci, 1996(3): 13–30.
- [10] Murphy E J, Watkins J L, Reid K, et al. Interannual variability of the South Georgia marine ecosystem: biological and physical sources of variation in the

abundance of krill [J]. Fish Oceanogr, 1998, 7(3-4): 381-390.

- [11] 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.
- [12] Maunder M N, Punt A E. Standardizing catch and effort data: a review of recent approaches [J]. Fish Res, 2004, 70(2): 141–159.
- [13] 郑祖光,刘莉红. 经验模态分析与小波分析及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2010.
- [14] Jonesa C D, Rammb D C. The commercial harvest of krill in the southwest Atlantic before and during the CCAMLR 2000 Survey [J]. Deep-Sea Res II, 2004, 51: 1421–1434.
- [15] Hiroaki O, Miyabe N, Inagake D. Interpretation of high catch rates of bigeye tuna in 1977 and 1978 observed in the Japanes longline fishery in the indian ocean[R]. IOTC / WPM01-01/4, 2001: 169–190.
- [16] Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E, et al. A re-appraisal of the total biomass and annual production of Antarctic krill [J]. Deep-Sea Res I, 2009, 56(5): 727–740.
- [17] Nicol S, Foster J, Kawaguchi S. The fishery for Antarctic krill-recent developments[J]. Fish Fish, 2012, 13(1): 30-40.
- [18] Quetin L B, Ross R M. Episodic recruitment in Antarctic krill *Euphausia superba* in the Palmer LTER study region
 [J]. Mar Ecol Prog Ser, 2003, 259: 185–200.
- [19] Siegel V. Distribution and population dynamics of *Euph-ausia superba*: summary of recent findings [J]. Polar Biol, 2005, 29(1): 1–22.
- [20] 卞林根,林学椿.近 30 年南极海冰的变化特征[J].极地 研究, 2005, 17(4): 233-244.
- [21] 马丽娟, 陆龙骅, 卞林根. 南极海冰的时空变化特 征[J]. 极地研究, 2004, 16(1): 29-37.
- [22] Siegel V, Loeb V. Recruitment of Antarctic krill *Euphausia superba* and possible causes for its variability [J]. Mar Ecol Prog Ser, 1995, 123(1): 45–56.
- [23] 陈峰,陈新军,刘必林,等. 海冰对南极磷虾 (Euphausua superba)资源丰度的影响[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(4): 495-499.

- [24] 戴立峰, 张胜茂, 樊伟. 南极磷虾资源丰度变化与海冰 和表温的关系[J]. 极地研究, 2012, 24(4): 352-360.
- [25] Zwally H J, Comiso J C, Parkinson C L, et al. Variability of Antarctic sea ice 1979–1998 [J]. J Geohys Res C, 2002, 107(C5): 1–19.
- [26] Liu J, Curry J A, Martinson D G. Interpretation of recent Antarctic sea ice variability [J]. Geophys Res Lett, 2004. 31(2): L02205.
- [27] Priddle J, Croxall J, Everson I, et al. Large-scale fluctuations in distribution and abundance of krill-a discussion of possible causes [M] // Antarctic ocean and resources variability. Netherlands: Springer, 1988: 169–182.
- [28] Siegel V, Bergström B, Mühlenhardt-Siegel U, et al. Demography of krill in the Elephant Island area during summer 2001 and its significance for stock recruitment [J]. Antarct Sci, 2002, 14(2): 162–170.
- [29] 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 Sci, 2006, 13: 117–141.
- [30] Ross R, Quetin L. Spawning frequency and fecundity of the Antarctic krill *Euphausia superba* [J]. Mar Biol, 1983, 77(3): 201–205.
- [31] Nicol S. Krill, currents, and sea ice: *Euphausia superba* and its changing environment [J]. Bio Sci, 2006, 56(2): 111–120.
- [32] 王荣,鲁北伟. 南极磷虾年龄组成的体长频数分布混 合分析[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(6): 598-605.
- [33] 朱国平, 吴强, 冯春雷, 等. 基于渔业调查的南极半岛 北部水域南极磷虾种群年龄结构分析[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4620-4627.
- [34] Loeb V. Environmental Variability and the Antarctic Marine Ecosystem [M] // Vasseur D A, McCann K S (eds) The Impact of Environmental Variability on Ecological Systems, Netherlands: Springer, 2007: 197–225.
- [35] Murphy E J, Clarke A, Symon C, et al. Temporal variation in Antarctic sea-ice: analysis of a long term fast-ice record from the South Orkney Islands [J]. Deep-Sea Res I, 1995, 42(7): 1045–1062.

Oscillation mode analysis on the time series of Antarctic krill (*Euphausia superba*) catch rate in the Atlantic Sector of Antarctic Ocean

YANG Xiaoming^{1,2,3,4}, ZHU Guoping^{1,2,3,4}

1. College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

- 2. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China;
- 3. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai 201306, China;
- 4. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture, Shanghai, 201306, China

Abstract: As the key species in the Antarctic ecosystem, Antarctic krill (Euphausia superba) is one of the most important linkage in the food web. In this study, we made detailed quantitative analysis from the view of time sequence of oscillation characteristics of Antarctic krill resources. The biological and physical process is also combined to explain the reason that the oscillation of krill resources. The Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCAMLR) area 48 in the Atlantic Sector of Antarctic Ocean also is the main fishing ground of Chinese Antarctic krill fishery. Using the Empirical Mode Decomposition (EMD) estimation, the present study analyzes the monthly catch rate of Antarctic krill fishery from 1982 to 2011 to explain the multi-time scale oscillation mode characteristics of Antarctic krill fishery and its response relationship to the environmental oscillation. The result show that the oscillation represent 0.5 a, 1 a, 1.5 a, 2.5 a, 7 a and nearly 11 a periodicities, in which high-frequency oscillation has a significant impact on the Antarctic krill abundance fluctuation. The catch rates of three subareas in CCAMLR area 48 all show seasonal oscillations, low oscillation in summer and high oscillation in winter can be found. The CPUE peak points appear in May, June and September in subareas 48.1(50°-70°W, 60°-65°S), 48.2 (30°-50°W, 57°-64°S) and 48.3 (30°-50°W, 50°-57°S), respectively. The CPUE is generally the lowest in January. The primary oscillation periodicity (the explanation rate of variance is 46.7%) is 1 a, and the annual recruitment size of Antarctic krill is the most important contribution of the catch rate. The secondary seasonal oscillation periodicity (the explanation rate of variance is 35.6%) is 0.5 a. The 1.5 a oscillation period can be considered as a synthesis result of two main high-frequency. The 2.5 a oscillation of catch rate is related to the 3.0 a oscillation of seaice coverage and the longer oscillation periodicity (7 a and nearly 11a oscillation period) of catch rate has a linkage to the oscillation periodicity of climate-current system. The CPUEs have increasing trend in the CCAMLR subarea 48.1, 48.2 and 48.3, although the overall abundance has a remarkably decreasing trend in the Atlantic Sector of Antarctic Ocean, particularly subareas 48.2 and 48.3. A significant positive correlation can be found between seaice coverage and catch rate (coefficient of correlation is 0.44, and P < 0.01), the phase gap is 10 months with CPUE behind seaice coverage. The oscillation of seaice coverage anomaly can put a remarkably positive impact on the catch rate and catch rate anomaly of Antarctic krill fishery with a gap of 8 to 11 months (the coefficient of correlation respectively is 0.18 and 0.21, and P < 0.01). The oscillation of Antarctic krill fishery is a response of combined influence of environmental oscillation and life history cycle of Antarctic krill.

Key words: *Euphausia superba*; catch rate; oscillation mode; Empirical Mode Decomposition (EMD); the Atlantic Sector of Antarctic Ocean

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