

文章编号: 1000-0615(2017)04-0525-10

DOI: 10.11964/jfc.20150810010

不同气候模态下西北太平洋柔鱼渔场环境特征分析

余 为^{1,2}, 陈新军^{2,3,4,5*}, 易 倩^{2,5}

(1. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092;

2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海海洋大学, 上海 201306;

4. 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海海洋大学, 上海 201306;

5. 远洋渔业协同创新中心, 上海海洋大学, 上海 201306)

摘要: 柔鱼冬春生群体广泛分布于西北太平洋, 其种群分布与大小受气候变化和环境因子调控。本实验根据中国鱿钓组提供的1995—2011年渔业捕捞数据和海洋环境数据包括海表温度(SSTA)、海表面高度(SSHA)和混合层深度(MLDA)的距平值, 分析不同气候模态下(PDO暖期和PDO冷期)柔鱼渔场环境的变化。结果显示, PDO暖期时, 柔鱼CPUE高; PDO冷期时, CPUE变低。柔鱼渔场SSTA、SSHA和MLDA年间变化显著, 各环境变量的时间变化与PDO冷暖相位对应。SSTA和SSHA与PDO指数负相关, 滞后时间分别为-9~10月和-20~17月, 且均在0月时相关系数最大; 而MLDA与PDO指数呈正相关, 滞后时间为-6~5月, 在-1月相关系数最大。利用经验正交函数分析了SSTA、SSHA和MLDA时空变化的主要模态, 前5个模态特征向量分别反映了西北太平洋柔鱼渔场SSTA、SSHA和MLDA分布场78.73%、32.82%和64.57%的信息。研究表明, 气候模态变化驱动柔鱼渔场环境的变化, 进而对西北太平洋柔鱼资源丰度产生显著影响。

关键词: 柔鱼; 环境因子; 气候变化; EOF分析; 时空变化; 西北太平洋

中图分类号: S 931.4

文献标志码: A

短生命周期的头足类, 其资源丰度与分布对大尺度气候条件和局部海域环境因子的变化极其敏感^[1]。如Waluda等^[2]认为厄尔尼诺和拉尼娜事件对秘鲁海域的茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)资源丰度产生显著影响, 1997—1998年强劲的厄尔尼诺事件导致秘鲁沿岸上升流减弱, 初级生产力降低, 饵料生物减少, 最终茎柔鱼产量锐减。Tian等^[3]利用日本水产厅长时间序列枪乌贼(*Loligo bleekeri*)的捕捞资料, 研究认为气候模态转换对枪乌贼资源在日本海和太平洋纬度分布具有重要影响。可以看出, 鱼类生活史在不同气候模态下经历不同的海洋环境, 其资源分布与大小随之变化。因此探讨海洋经济鱼类渔场环境因子在不同气候模态下的转变对预测其资源分布

和大小至关重要。

柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)作为重要的经济头足类, 广泛分布于北太平洋海域^[4], 其种类包括秋生群体和冬春生群体^[5], 而冬春生群体西部种群是我国鱿钓船主要的捕捞对象^[6]。黑潮与亲潮两大海流在西北太平洋海域交汇, 交汇海域衍生出重要的柔鱼渔场, 其物理和生物环境复杂, 且受到大尺度气候条件影响^[7]。以往的研究认为海表温度^[8](sea surface temperature, SST)和海表面高度^[9](sea surface height, SSH)等环境要素可能是驱动柔鱼资源渔场变动的重要因子。太平洋年代际涛动(Pacific decadal oscillation, PDO)是一种以10年周期尺度变化的太平洋气候变化现象, 在太平洋10年涛动“暖相位”(或“正相位”)期

收稿日期: 2015-08-01 修回日期: 2015-11-23

资助项目: 国家科技支撑计划(2013BAD13B01); 上海海洋大学博士科研启动基金(A2-0203-17-100313)

通信作者: 陈新军, E-mail: xjchen@shou.edu.cn

间西太平洋偏冷而东太平洋偏暖；在“冷相位”（或“负相位”）期间西太平洋偏暖而东太平洋偏冷，是2种不同的气候模态^[10]。已有研究表明，PDO对太平洋鲑属(*Oncorhynchus*)渔场环境会产生影响^[11]。为此，本实验拟探讨2种不同气候模态下，对比分析柔鱼产量和资源丰度的变化以及渔场环境因子时空变化特征，整体把握柔鱼渔场环境因子的时空分布特征以及大尺度气候对其的影响，从而丰富对西北太平洋柔鱼渔场环境动态的认识，为管理柔鱼渔业资源提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

柔鱼渔业生产统计数据来自中国远洋渔业协会鱿钓技术组，时间为1995—2011年。西北太平洋柔鱼的作业范围主要分布在35°~50°N、150°~175°E海域内，空间分辨率为1°×1°。数据包括作业时间(年和月)、经度、纬度、日产量(t)、作业船数等。

环境数据包括SST、SSH和混合层深度(mixed layer depth, MLD)，时间范围覆盖1995—2011年1—12月，共计204个月，数据范围为35°~50°N、150°~175°E，空间分辨率均转化为1°×1°，以匹配渔业数据空间分辨率。其中SST数据来源于夏威夷大学网站(<http://apdrc.soest.hawaii.edu/data/data.php>)；SSH数据来源于美国NOAA Ocean-Watch数据库(<http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov/las/servlets/dataset>)；MLD数据来源于美国国家环境预报中心(<http://apdrc.soest.hawaii.edu/las/v6/dataset>)。定义太平洋年代际涛动指数为20°N以北北太平洋SST异常第一主分量^[12]，其数据来源于美国哥伦比亚大学环境数据库(<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/Indices/>)。

1.2 实验方法

以渔船每年单位捕捞努力量渔获量(catch per unit effort, CPUE)表征西北太平洋柔鱼资源丰度，探讨PDO暖期和冷期2种气候模态下1995—2011年间柔鱼资源丰度变化及其差异。

本实验侧重分析2种气候模态下北太平洋柔鱼渔场各环境因子的异常变化情况，使用海表温度距平(SSTA)、海表面高度距平(SSHA)和混合层深度距平值(MLDA)，即计算渔场中每个空

间点的距平值为该点的实际环境数据与其所有年份平均值之差。并利用互相关函数分析SSTA、SSHA、MLDA与PDO的关系。

所有环境因子资料可表示为矩阵 $m \times n$ ， m 为空间点(1°×1°)， n 为时间点(月)，本研究中 $m=405$ ， $n=204$ 。经验正交函数分解法(empirical orthogonal function, EOF)在分析气象元素的长时间序列变化中具有显著优势^[13]，因此本实验利用该方法对西北太平洋柔鱼主要渔场近17年的环境因子(SSTA, SSHA和MLDA)进行分解，得到并分析主要空间和时间的变化模态。

2 结果

2.1 两种气候模态下柔鱼资源丰度变化

1995—2011年西北太平洋柔鱼产量及其资源丰度年间波动显著，17年的平均产量为9.2万t，1999年产量最高为13.2万t，2009年产量最低为3.7万t，对应的CPUE分别为331.4 t/船和134.7 t/船，CPUE年间变化与产量基本对应一致(表1)。

北太平洋在1995—2011年经历PDO冷暖2个周期，其中1995—1998年和2002—2006年为PDO暖期，暖期对应柔鱼平均CPUE分别为301.7 t/船和380.9 t/船，1999—2001年和2007—2011为PDO冷期，冷期对应柔鱼平均CPUE分别为266.5 t/船和296.9 t/船，PDO暖期CPUE明显高于PDO冷期CPUE。

2.2 各环境因子距平值的变化特征及与PDO的关系

1995—2011年间西北太平洋柔鱼渔场SSTA的变化非常剧烈，变化范围为-1.40~1.35 °C，最小值为-1.39 °C，发生在1997年9月；最大值为1.33 °C，发生于2008年9月。1995—1998年和2002—2006年PDO暖期时，平均SSTA为负值，分别为-1.18和-0.11 °C，明显低于1999—2011年和2007—2011年PDO冷期的平均SSTA 0.04和0.23 °C。时间序列和互相关分析说明西北太平洋渔场的SSTA与PDO指数呈显著负相关关系，且SSTA滞后PDO指数-9~10月，在0月相关系数最大，为-0.6467(图1-a，图2-a)。柔鱼渔场的SSHA波动较大，时间序列分布有强的正趋势，表明渔场SSHA在17年中缓慢增加，尤其在近5年的上升趋势表现特别明显。SSHA变化范围为-5.80~

表 1 不同PDO时期柔鱼平均CPUE

Tab. 1 The average catch per unit effort (CPUE) in different Pacific decadal oscillation (PDO) phases

年份 year	产量/10 ⁴ t catch	单位捕捞努力量渔获量/(t/船) CPUE	不同PDO时期CPUE平均值 the average CPUE in different PDO phases	
			PDO相位 PDO phase	单位捕捞努力量渔获量/(t/船) CPUE
1995	7.3	294.3	PDO暖期(1995—1998)	301.7
1996	8.3	225.5		
1997	10.2	302.0		
1998	11.7	384.9		
1999	13.2	331.4	PDO冷期(1999—2001)	266.5
2000	12.4	278.5		
2001	8.1	189.8		
2002	8.4	233.4		
2003	8.3	404.6	PDO暖期(2002—2006)	380.9
2004	10.7	502.5		
2005	9.8	433.4		
2006	10.8	330.6		
2007	11.3	443.7	PDO冷期(2007—2011)	296.9
2008	10.6	410.9		
2009	3.7	134.7		
2010	5.5	211.3		
2011	5.4	283.9		

6.80 cm, 最小值为-5.77 cm, 发生在1998年2月; 最大值发生于2011年9月, 为6.77 cm。1995—1998年和2002—2006年PDO暖期时, 平均SSHA分别为-3.23和-0.37 cm, 明显低于1999—2001年(0.12 cm)和2007—2011年(2.88 cm)PDO冷期的平均SSHA。同时, 时间序列和互相关分析说明了SSHA与PDO指数呈显著负相关关系, SSHA滞后PDO指数-20~17月, 且在0月时相关系数最大, 为-0.6018(图1-b, 图2-b)。渔场MLDA变化显著, 变化范围为-36.00~30.00 m, 最小值为-35.02 m, 发生在2004年6月; 最大值为29.63 m, 发生于1999年3月。但对应PDO冷暖期平均MLDA变化较小, 其中1995—1998年和2002—2006年PDO暖期时, 平均MLDA分别为2.09和-0.70 m, 高于1999—2001年(-1.40 m)和2007—2011年(-0.13 m)PDO冷期的平均MLDA。时间序列和互相关分析说明了MLDA与PDO指数呈显著正相关关系, 且MLDA滞后PDO指数-6~5月, 在-1月相关系数最大, 为0.3307(图1-c, 图2-c)。

2.3 EOF分析结果

对204个月的SSTA、SSHA和MLDA进行EOF分解, 进一步分析柔鱼渔场环境因子在时间和空间上的变化特征。表2是各环境因子分解得到的前5个模态的结果, 前5个模态特征向量分别反映了西北太平洋柔鱼渔场SSTA、SSHA和MLDA分布场78.73%、32.82%和64.57%的信息, 另外可以看出从第3模态后所解释的方差贡献率都逐渐变小, 本实验重点分析了各环境因子前2个主要的主成分及其模态, 即代表1995—2011年间西北太平洋柔鱼渔场SSTA、SSHA和MLDA的主要变化形态。

首先由SSTA分解出前2个模态方差贡献率分别为44.98%和18.94%(表2), 从第一模态特征向量图可以看出, 在整个柔鱼渔场范围内均为正相关(图3-a), 这表明了西北太平洋柔鱼主要渔场范围内温度变化趋势在空间上体现了整体一致的特征。数值从北向南有逐渐增加再递减的趋势,

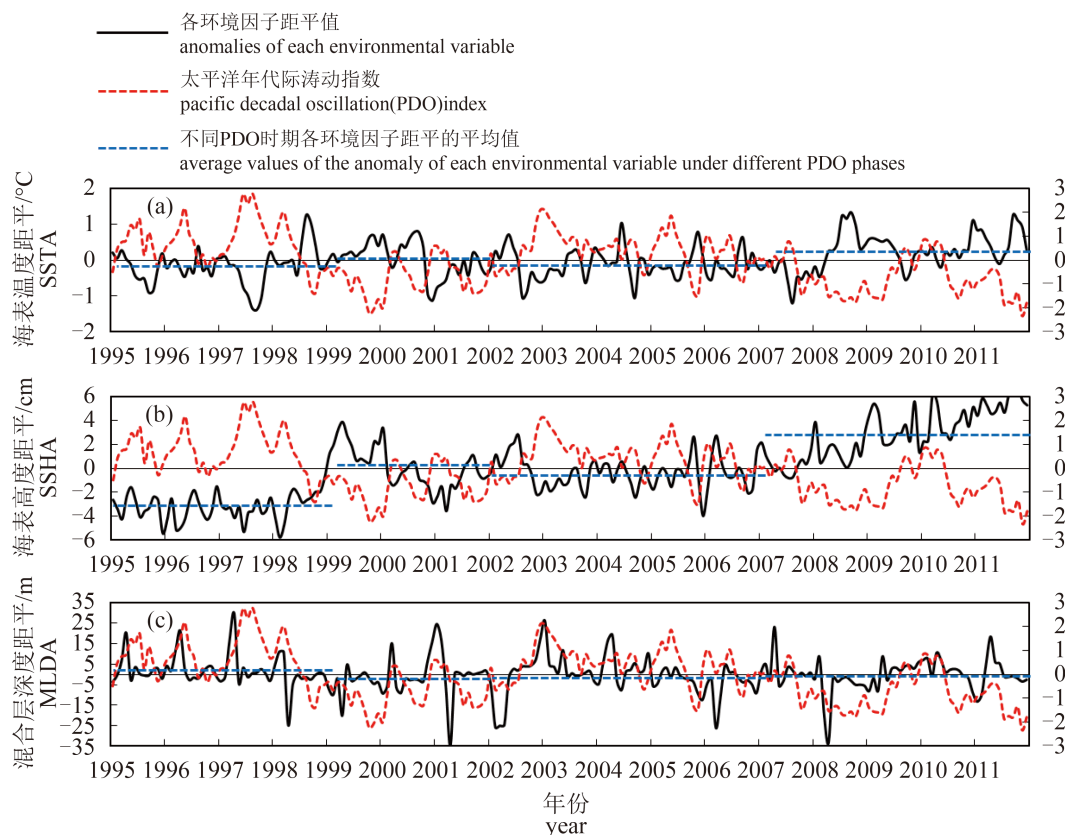


图1 1995—2011年PDO以及西北太平洋柔鱼渔场各环境因子距平值的时间序列变化

Fig. 1 Time series of PDO and the anomaly of environmental conditions including SSTA, SSHA and MLDA on the fishing ground of *O. bartramii* during 1995—2011 in the Northwest Pacific Ocean

高值区主要分布在渔场偏东南部中心位置 $152^{\circ} \sim 175^{\circ}\text{E}$ 、 $37^{\circ} \sim 44^{\circ}\text{N}$ 。第一模态特征向量逐年时间序列变化如图4-a, 1995、1997和2007年为明显的系数小值年份, 这些年为对应的柔鱼渔场SSTA偏低的年份, 1998、1999、2008、2010和2011年为明显的系数大值年份, 这些年对应了渔场SSTA偏大的年份。同时可以看出, 1995—1998年和2002—2006年PDO暖期对应的SSTA主要为系数小值年份, 而1999—2001和2007—2011年PDO冷期对应的SSTA主要为系数大值年份。第一模态时间系数变化与整个渔场平均SSTA时间序列变化基本一致, 说明第一模态反映了整个西北太平洋柔鱼渔场平均SSTA的变化。第二模态空间分布是渔场SSTA的次要变化形态, 显示渔场 43°N 以北为SSTA低值区, 43°N 以南海域表现为高值区, 且在渔场西南部表现更为显著(图3-b)。结合该模态对应的时间序列, 当时间系数为正时, 表现为南部海域SSTA的上升和北部海域SSTA的下降; 当时间系数为负数时, 则表现为北部海域的SSTA上升和南部海域SSTA的

下降。可以看出1995—1997年时间系数以负值为主, 1999—2005年以正值为主, 之后几年时间系数振荡明显(图4-b)。

环境变量SSHA分解出前2个模态方差贡献率分别为11.82%和7.35%(表2)。从第一模态特征向量图(图3-c)可以看出, 渔场 157°E 以西和东北向 $167^{\circ} \sim 175^{\circ}\text{E}$ 、 $43^{\circ} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 范围内数值为负值, 说明这2个海域内SSHA呈下降趋势。渔场中部海域 $158^{\circ} \sim 166^{\circ}\text{E}$ 、 $35^{\circ}\text{N} \sim 41^{\circ}\text{N}$ 范围数值上升, 尤其是南部海域, 数值上升明显。最高值区主要集中在渔场西南部很小范围内。SSHA第一模态特征向量逐年时间序列变化如图4-c, 系数为正主要表现为渔场中部主要海域SSHA上升, 而为负值时则SSHA降低。1995—1998年为明显的小值年份, 对应中部渔场SSHA降低, 2009—2011年为明显的大值年份, 对应中部渔场SSHA上升, 而1999—2008年SSHA高低值交替出现, SSHA振荡变化明显。同时, PDO暖期对应了较低的SSHA, 而PDO冷期对应较高的SSHA, 这与SSTA的变化趋势较为一致。第二模态空间分布

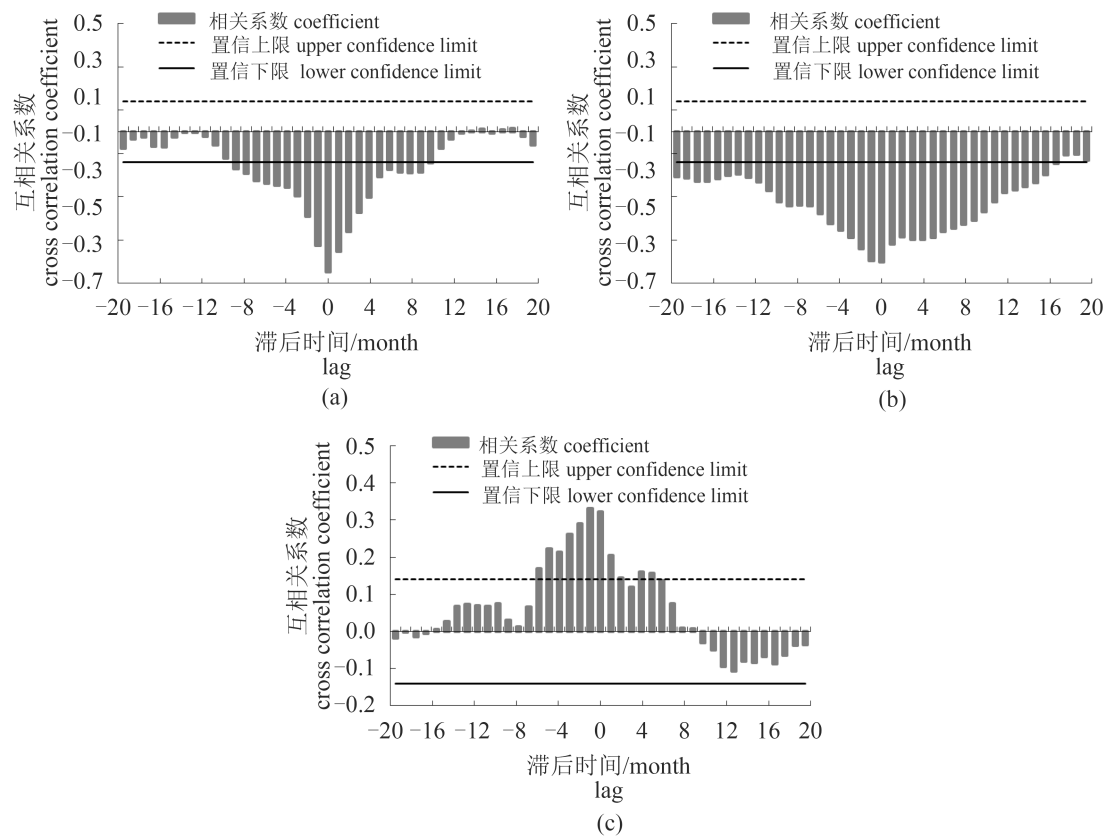


图 2 PDO指数与SSTA(a)、SSHA(b)和MLDA(c)的互相关系数

Fig. 2 Cross correlation coefficients between the PDO index and the anomaly of environmental variables including SSTA(a), SSHA(b) and MLDA(c)

表 2 各环境变量EOF的前5个模态方差贡献率

Tab. 2 The contributions of the first five EOF modes corresponding to each environmental variable %

特征值序列 features sequence	海表面温度距平 SSTA		海表面高度距平 SSHA		混合层深度距平 MLDA	
	贡献率	累积贡献率	贡献率	累积贡献率	贡献率	累积贡献率
	contributions	accumulated contributions	contributions	accumulated contributions	contributions	accumulated contributions
EOF1	44.48	44.48	11.82	11.82	33.97	33.97
EOF2	18.94	63.42	7.35	19.17	10.65	44.62
EOF3	8.61	72.03	5.00	24.17	8.95	53.57
EOF4	3.48	75.51	4.68	28.85	5.54	59.11
EOF5	3.22	78.73	3.97	32.82	5.46	64.57

显示渔场大部分范围内SSHA正负相位交错分布, 渔场西南部海域出现小范围的极低值区(图3-d)。结合该模态的时间序列发现1995—1998年和2002—2006年渔场SSHA以负值为主, 而1999—2001年和2007—2011年以正值为主(图4-d), 其变化趋势与第一模态特征向量时间变化明显相反。

环境因子MLDA分解出前2个模态方差贡献率分别为33.97%和10.65%(表2)。第一模态特征向

量图显示了整个渔场MLDA为负值区, 且从北向南逐渐降低(图3-e)。第一模态特征向量逐年时间序列变化如图4-e, 发现5—12月MLDA变化剧烈, 而6—11月MLDA变化较小。其中1997、2007和2011年冬春季MLDA为明显的小值年, 表现为渔场MLDA的增加; 2001和2008年冬春季MLDA为明显的系数为正的年份, 这些年对应了渔场MLDA降低的年份。同时发现, 1995—1998年和2002—2006年PDO暖期对应冬季的MLDA时

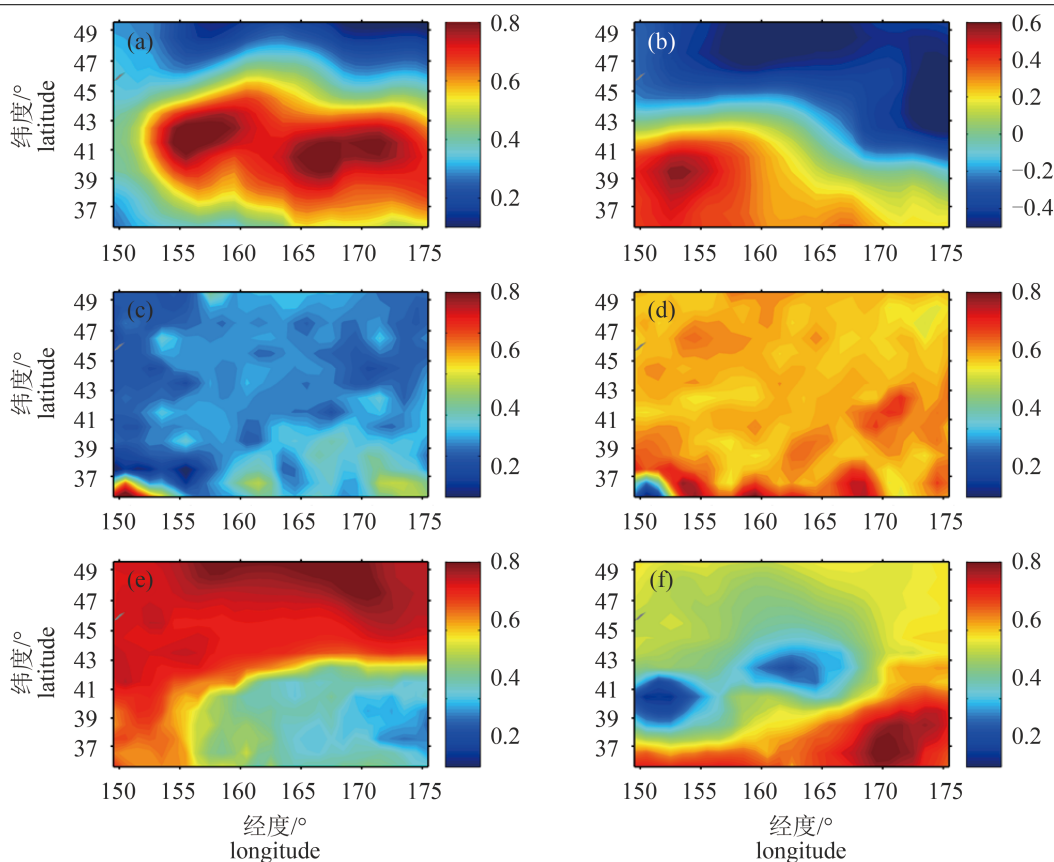


图3 EOF分析各环境因子前2个模态的空间分布

Fig. 3 The spatial distributions of the first 2 modes for environmental variables including SSTA, SSHA and MLDA on a basis of EOF analysis

间系数主要为负值,而1999—2001和2007—2011年PDO冷期对应的时间系数为正值。从第二模态空间分布可以看出,渔场西北部海域MLDA下降明显,空间上出现2个负值中心。东北局部海域振幅几乎为0,南部海域MLDA逐步过渡为正值,呈上升趋势(图3-f)。分析第二模态的时间序列(图4-f),可以看出其时间系数在6—11月变化幅度较小,而其他月份则振荡明显。

3 讨论

柔鱼为一年生鱼类,短生命周期的生活史特征决定其资源丰度和分布极大程度上依赖于环境条件^[14]。已有的研究表明,厄尔尼诺和拉尼娜事件的交替变更对柔鱼资源变动影响显著^[15]。如Chen等^[16]认为拉尼娜事件发生时,柔鱼产卵场温度升高,不利于其仔幼鱼孵化和繁殖,导致资源补充量减少,且渔场重心向北转移;而厄尔尼诺事件发生时则为相反情况,有利于资源补充,渔场向南移动。Yu等^[17]构建了西北太平

洋柔鱼渔场的适宜栖息地模型,对比分析了厄尔尼诺、拉尼娜和正常气候条件下柔鱼栖息地的变化。研究表明,1998年拉尼娜事件产生大量暖水团以及适宜的叶绿素和SSHA范围,柔鱼适宜栖息地面积扩张;但2009年厄尔尼诺事件导致水温降低,摄食条件和SSHA范围不适宜柔鱼生存,有利的栖息地面积锐减。厄尔尼诺和拉尼娜事件为太平洋海域高频发生的气候现象,其周期较短^[18]。而北太平洋海域变化另一主导因素是低频振荡的长期气候变化即PDO,其变化频率低于ENSO现象^[10]。目前很少研究将西北太平洋柔鱼资源的变动与PDO现象关联。中国鱿钓船从1995年开始大规模捕捞柔鱼,到2011年,北太平洋经历2个PDO周期,即1995—1998年PDO暖期和1999—2001年PDO冷期以及2002—2006年PDO暖期和2007—2011年PDO冷期(表1)。研究表明,PDO暖期CPUE较高,当PDO模态转化为冷期时,CPUE则降低。说明PDO暖期产生了有利于柔鱼生长和繁殖的气候条件,导致资源量上

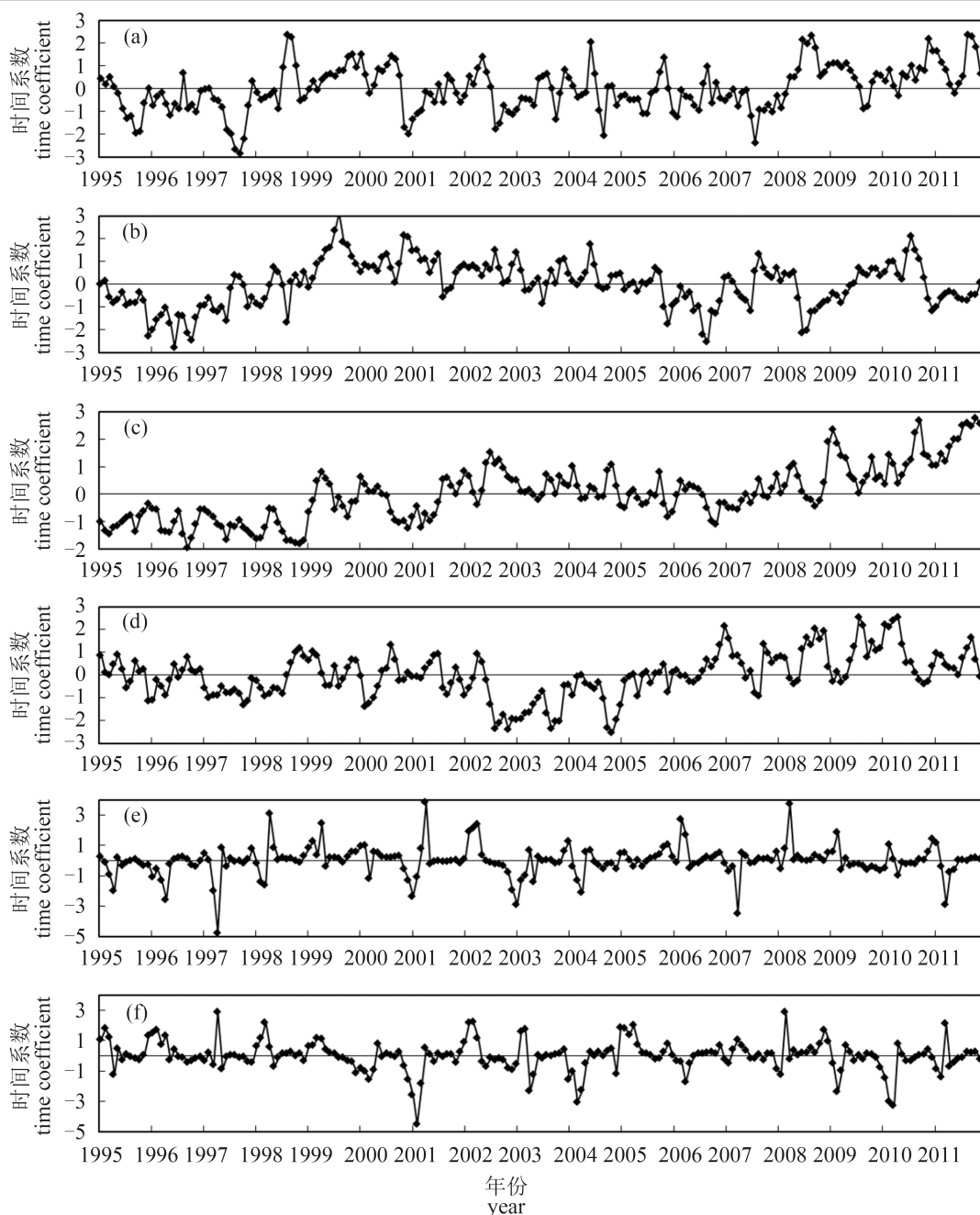


图 4 EOF分析各环境因子前2个模态的时间系数

Fig. 4 The time coefficients of the first 2 modes for environmental variables including SSTA, SSHA and MLDA on a basis of EOF analysis

升;相反,PDO冷期则产生了不利于柔鱼的环境条件,导致柔鱼资源丰度下降,从而产量锐减。

PDO现象为柔鱼渔场提供了一个年际到年代际时间尺度的气候背景,其模态转换对渔场范围内的各环境因子具有调控作用。由于我国鱿钓渔业发展历程短,缺乏长时间序列的捕捞数据,因此本实验主要探索PDO现象高频振荡时对柔鱼渔场环境的影响。研究发现,PDO指数与

渔场SSTA和SSHA负相关,与MLDA正相关,说明PDO暖相位时,渔场内的SSTA和SSHA偏低,而MLDA偏高;PDO冷相位时则相反。余为等^[19]对比研究了2008和2009年柔鱼传统作业渔场的水温因子,结果发现2009年渔场大部分范围内分布的SSTA较低,导致了该年柔鱼产量降低;而2008年作业位置均分布在较高SSTA范围内,当年的柔鱼高产,说明较高的SSTA有利于柔鱼的生

长。本研究发现, PDO暖相位时, SSTa偏低, 但需要结合每年SSTa具体变化情况, 如1998年虽处于PDO暖相位, 但其SSTa较高(图1), 产量也高; 2008年处于PDO冷相位时, SSTa处于较高水平, 其产量也丰产。此外, Tian等^[20]利用栖息地指数模型研究了西北太平洋柔鱼的栖息地适宜性, 研究发现适宜SSH范围为-20~4 cm, SSHA偏低时有利于形成适宜的柔鱼栖息地, 因此PDO暖相位更有利于形成高产的渔场。水团垂直结构混合作用可能改变营养盐和饵料生物浓度, 从而影响了海洋鱼类的丰度与分布。Nishikawa等^[21]利用前向和后向的粒子追踪技术研究了柔鱼冬春生群体仔幼鱼的摄食环境及其育肥场中MLD形成过程, 结果表明, 秋冬季较深的混合层提供了大量的营养盐成分, 促进光合作用, 有利于形成丰富的饵料生物场, 利于柔鱼仔幼鱼摄食, 从而提高资源丰度。因此, PDO暖期较高的MLDA易形成适宜的育肥场, 为柔鱼仔幼鱼提供较好的摄食环境, PDO冷期情况则相反。

本实验通过长达17年的环境数据, 利用正交经验方法分析柔鱼渔场SSTa、SSHA和MLDA时空分布规律, 量化分离并分析了前2种主要模态。SSTa正交分析第一模态时间系数与渔场温度距平值基本一致, 体现了多年平均温度距平值分布场的基本特征, 在空间上具有较好的一致性, 高值SSTa海域主要出现在渔场偏东南部中心位置。第二模态可能体现了黑潮、亲潮交汇过渡区域SSTa的分布规律, 即北部SSTa低, 南部SSTa高。黑潮是高温暖水团, 亲潮为低温冷水团, 两股海流的势力强弱及其曲折弯曲等物理过程影响整个渔场海域的温度和叶绿素浓度等环境条件^[22-24], 势必导致柔鱼种群大小振荡变动。黑潮大弯曲年份可能导致作业渔场温度变低, 作业位置分布广泛, 但CPUE较低; 而黑潮小弯曲年份则情况相反^[25]。SSHA正交分析第一模态反映了多年平均海表面高度距平分布场的分布情况, 主要为中部海域与西部和东北部分海域反相位振荡特征, 其时间系数变化与PDO振荡具有高度一致性。第二模态则可能体现了海流交汇区域复杂的涡流结构, 其物理意义还需进一步研究。MLDA正交分析第一模态体现了渔场MLDA从北向南逐渐降低的分布特征。对比第二模态时间系数和混合层深度多年距平值, 其趋势基本一致, 因此第二模态可能反映

了其多年平均MLDA空间分布结构。各环境因子的时间系数变化与PDO冷暖期交互对应, 说明环境因子在时间上受PDO现象调控。本研究发现, 气候模态变化驱动柔鱼渔场各环境因子变化, 对西北太平洋柔鱼的资源丰度产生显著影响。对于生物和物理环境因子与气候变化共同作用于柔鱼种群的机理, 还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Anderson C I H, Rodhouse P G. Life cycles, oceanography and variability: ommastrephid squid in variable oceanographic environments[J]. Fisheries Research, 2001, 54(1): 133-143.
- [2] Waluda C M, Rodhouse P G. Remotely sensed mesoscale oceanography of the Central Eastern Pacific and recruitment variability in *Dosidicus gigas*[J]. Marine Ecology Progress, 2006, 310(8):25-32.
- [3] Tian Y J, Nashida K, Sakaji H. Synchrony in the abundance trend of spear squid *Loligo bleekeri* in the Japan sea and the Pacific ocean with special reference to the latitudinal differences in response to the climate regime shift[J]. ICES Journal of Marine Science, 2013, 70(5): 968-979.
- [4] Murata M. Oceanic resources of squids[J]. Marine & Freshwater Behaviour & Physiology, 1990, 18(1): 19-71.
- [5] Bower J R, Ichii T. The red flying squid (*Ommastrephes bartramii*): a review of recent research and the fishery in Japan[J]. Fisheries Research, 2005, 76(1): 39-55.
- [6] Chen X J, Liu B L, Chen Y. A review of the development of Chinese distant-water squid jigging fisheries[J]. Fisheries Research, 2008, 89(3): 211-221.
- [7] Yatsu A, Chiba S, Yamanaka Y, et al. Climate forcing and the Kuroshio/Oyashio ecosystem[J]. ICES Journal of Marine Science, 2013, 70(5): 922-933.
- [8] Chen C S, Chiu T S. Abundance and spatial variation of *Ommastrephes bartramii* (Mollusca: Cephalopoda) in the eastern North Pacific observed from an exploratory survey[J]. Acta Zoologica Taiwanica, 1999, 10(2): 135-144.
- [9] 樊伟, 崔雪森, 沈新强. 西北太平洋巴特柔鱼渔场与环境因子关系研究[J]. 高技术通讯, 2004, 14(10): 84-89.
Fan W, Cui X S, Shen X Q. Study on the relationship between the Neon flying squid, *Ommastrephes bartramii*, and ocean environment in the Northwest

- Pacific Ocean[J]. Chinese High Technology Letters, 2004, 14(10): 84-89 (in Chinese).
- [10] Mantua N J, Hare S R. The Pacific decadal oscillation[J]. Journal of Oceanography, 2002, 58(1): 35-44.
- [11] Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, *et al.* A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(6): 1069-1079.
- [12] Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93[J]. Journal of Climate, 1997, 10(5): 1004-1020.
- [13] 周琴, 赵进平, 何宜军. 用TOPEX/POSEIDON高度计数据研究南极绕极流流域海面高度的低频变化[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(3): 256-266.
- Zhou Q, Zhao J P, He Y J. Low-frequency variability of the Antarctic circumpolar current sea level detected from TOPEX/POSEIDON satellite altimeter data[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica. 2003, 34(3): 256-266 (in Chinese).
- [14] Yu W, Chen X J, Yi Q, *et al.* A review of interaction between neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) and oceanographic variability in the North Pacific Ocean[J]. Journal of Ocean University of China, 2015, 14(4): 739-748.
- [15] Chen C S. Abundance trends of two neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) stocks in the North Pacific[J]. ICES Journal of Marine Science, 2010, 67(7): 1336-1345.
- [16] Chen X J, Zhao X H, Chen Y. Influence of El Niño/La Niña on the western winter-spring cohort of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwestern Pacific Ocean[J]. ICES Journal of Marine Science, 2007, 64(6): 1152-1160.
- [17] Yu W, Chen X J, Yi Q, *et al.* Variability of suitable habitat of western winter-spring cohort for neon flying squid in the Northwest Pacific under anomalous environments[J]. PloS one, 2015, 10(4): e0122997.
- [18] Wang C, Deser C, Yu J Y, *et al.* El Nino and southern oscillation (ENSO): a review[J]. Coral Reefs of the Eastern Pacific, 2012, 8: 3-19.
- [19] 余为, 陈新军, 易倩, 等. 西北太平洋柔鱼传统作业渔场资源丰度年间差异及其影响因子[J]. 海洋渔业, 2013, 35(4): 373-381.
- Yu W, Chen X J, Yi Q, *et al.* Annual difference of abundance index and its influencing factors of *Ommastrephes bartramii* in traditional fishing grounds in the Northwest Pacific[J]. Marine Fisheries, 2013, 35(4): 373-381 (in Chinese).
- [20] Tian S Q, Chen X J, Chen Y, *et al.* Evaluating habitat suitability indices derived from CPUE and fishing effort data for *Ommastrephes bartramii* in the northwestern Pacific Ocean[J]. Fisheries Research, 2009, 95(2): 181-188.
- [21] Nishikawa H, Igarashi H, Ishikawa Y, *et al.* Impact of paralarvae and juveniles feeding environment on the neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) winter-spring cohort stock[J]. Fisheries Oceanography, 2014, 23(4): 289-303.
- [22] Chen X J, Cao J, Chen Y, *et al.* Effect of the Kuroshio on the spatial distribution of the red flying squid *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean[J]. Bulletin of Marine Science, 2012, 88(1): 63-71.
- [23] 王文宇, 邵全琴, 薛允传, 等. 西北太平洋柔鱼资源与海洋环境的GIS空间分析[J]. 地球信息科学, 2003, 5(1): 39-44.
- Wang W Y, Shao Q Q, Xue Y C, *et al.* On the relationship between the resources of *Ommastrephes bartramii* and marine environment in the Northwest Pacific Ocean based on GIS[J]. Geo-information Science, 2003, 5(1): 39-44 (in Chinese).
- [24] 王文宇, 周成虎, 邵全琴, 等. RS/GIS 支持下的柔鱼中心渔场时空动态迁移研究[J]. 高技术通讯, 2003, 13(11): 90-93.
- Wang W Y, Zhou C H, Shao Q Q, *et al.* An application of RS/GIS on study on the migration dynamics of *Ommastrephes bartramii*[J]. Chinese High Technology Letters, 2003, 13(11): 90-93 (in Chinese).
- [25] 陈新军, 曹杰, 田思泉, 等. 表温和黑潮年间变化对西北太平洋柔鱼渔场分布的影响[J]. 大连水产学院学报, 2010, 25(2): 119-126.
- Chen X J, Cao J, Tian S Q, *et al.* Effect of inter-annual change in sea surface water temperature and Kuroshio on fishing ground of squid *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2010, 25(2): 119-126 (in Chinese).

Analysis of variations in the environmental conditions on the fishing ground of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwestern Pacific Ocean under different climate modes

YU Wei^{1,2}, CHEN Xinjun^{2,3,4,5*}, YI Qian^{2,5}

(1. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, 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 Ocean University, Shanghai 201306, China;

5. Collaborative Innovation Center for Distant-water Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The western stock of the winter-spring cohort of neon flying squid, *Ommastrephes bartramii*, is widely distributed in the Northwest Pacific Ocean, and its distribution and abundance are mediated by the climate variability and environmental conditions. Based on the fishery data during 1995—2011 from the Chinese Squid-jigging Science and Technology Group and the environmental data including the anomalies of sea surface temperature (SSTA), sea surface height (SSHA) and mixed layer depth (MLDA), we analyzed variability in the spatio-temporal distribution of environmental factors under different climate modes (warm and cold phases of the Pacific Decadal Oscillation, PDO). The results suggested that the catch per unit effort (CPUE) was high during the warm PDO phase and low during the cold PDO phase. Significant interannual variations were found in the SSTA, SSHA and MLDA, which corresponded to the variability of the warm/cold PDO phases. A negative correlation was found between the PDO index and the SSTA as well as the SSHA with time-lags of -9—-10 and -20—17 months, respectively, both with the highest correlation coefficient at the time-lag of 0 month; while the MLDA was positively correlated with the PDO index with a time-lag of -6—5 months, and the highest correlation coefficient occurred at the time-lag of -1 month. The empirical orthogonal function method was used to analyze the major mode of spatio-temporal variability of SSTA, SSHA and MLDA, the first five modes of EOF for each environmental factor contributed to 78.73%, 32.82% and 64.57% of variation, respectively. Our findings suggested that shifts in the climate mode largely drove the variations in the environmental factors on the squid fishing ground, which led to significant abundance variability of *O. bartramii* in the Northwest Pacific Ocean.

Key words: *Ommastrephes bartramii*; environmental factors; climate variability; EOF analysis; spatio-temporal variation; Northwest Pacific Ocean

Corresponding author: CHEN Xinjun. E-mail: xjchen@shou.edu.cn

Funding projects: National Key Technologies R&D Program of China (2013BAD13B01); Doctoral Scientific Research Foundation of Shanghai Ocean University (A2-0203-17-100313)