

黑潮末端与黑潮延伸体海域海表流场 EOF 分析研究

方芳¹, 蔡颂¹, 孙鹤泉², 张勇三¹

(1. 中国人民解放军32033部队, 海南 海口 571199; 2. 海军大连舰艇学院, 辽宁 大连 116018)

摘要: 利用17 a的流场资料, 分析黑潮末端与黑潮延伸体海域流场的年际变化特征。通过复经验正交函数对流场数据的分析, 可发现该海域流场存在准两年的周期变化, 同时该海域流场存在对 ENSO 现象的响应; 通过经验正交函数对流场流速大小数据的分析, 证实该海域流场存在准两年的周期变化, 同时流速大小异常场的经验正交函数分析第二模态可反映黑潮流轴大弯曲现象, 北太平洋涛动信号也在第一和第三模态中有所体现。

关键词: 黑潮末端与黑潮延伸体; 海表流场; 复经验正交函数分解; 经验正交函数分解

中图分类号: P731.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2019)03-0043-06

1 前言

黑潮作为全球第二大强西边界流, 具有高温、高盐、大流量、强流速、窄流幅等特点, 研究黑潮, 对探究整个东亚海洋环境、日本南部及东部海域海洋环境等具备重要意义^[1-2]。黑潮在日本列岛以南称之为黑潮末端, 在(140°E, 35°N)附近, 黑潮与日本海岸分离后的水体称之为黑潮延伸体, 黑潮末端与黑潮延伸体同亲潮汇合横过太平洋^[2-3]。离开日本海岸后的黑潮延伸体不稳定性随着流量的增加而增强, 因而中尺度涡旋在该海域活跃存在^[3-5]。黑潮末端和黑潮延伸体海域也是整个北太平洋流场异常最为明显的区域^[6]。许多学者对黑潮末端及其延伸体进行过研究, 研究表明: 其变化特征与全球海洋变化有关, 与 ENSO 现象等有着密切联系。He 等^[7]通过对 1979—1982 年日本以南及东海黑潮流系 200 m 以浅 XBT 等温度数据的分析, 发现 1982 年 ENSO 事件出现时北太平洋黑潮锋面强度弱于正常年份; 潘家玮等^[1]等利用 Geosat 高度计数据观测黑潮流系的低频变化, 对黑潮弯曲及对应的黑潮特性变化进行详细探讨, 同时指出黑潮流系海面高度异常场经验正交分解第二模态同 ENSO 现象具有相近

周期; 张永垂等^[8]等通过对海平面高度异常(Sea Surface Height Anomaly, SSHA) 资料分析, 发现 SSHA 变化的大值区在黑潮延伸区和西太平洋暖池区, 通过经验正交函数第一模态分析, 指出 SSHA 纬向带状分布具备 7~8 a 的时间周期。卢炯等^[3]利用美国 UMD 提供的逐月全球海洋同化分析资料, 对黑潮末端与黑潮延伸体的流场异常进行复经验正交函数分析, 分季节详细探讨了该海域上层流场异常, 并指出 ENSO、PDO 等信号在该海域流场异常中有明显反映。

本文将利用黑潮末端和黑潮延伸体海域的海表流场数据, 通过复经验正交函数分析方法, 分析该海域黑潮流场的流轴位置分布以及年际变化特征, 同时, 通过经验正交函数分析方法, 对该海域海表流场流速大小异常进行分析, 探讨该海域流场流速大小异常的年际变化特征。

2 数据及分析方法

本文所采用的海表流场数据来源于法国 LEGOS 实验室提供的数据同化 GEKCO2 产品, 该产品提供的海表流场数据空间分辨率为 1/4°, 时间

分辨率为1 d,流速单位为cm/s。相较其他同类产品,该数据所具备的高时空分辨率,能很好的保持分析结果的时空连续性。本文选用海表流场数据空间范围为(130°E, 24.875°N~160°E, 45.125°N),时间范围为2000年1月1日—2016年12月31日。同时,本文主要探讨年际变化,对流场数据进行了滤波处理,采用滤波器滤去了300 d以下的周期信息。

本文所采用研究方法为经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析方法和复经验正交函数(Complex Empirical Orthogonal Function, CEOF)分析方法,EOF和CEOF是海洋和气象要素处理的两种常用方法,其原理在许多文献中都有详细介绍^[9-13],这里不做过多说明。常规CEOF方法是对矢量数据距平场进行处理,可获取异常场的年际变化规律,本文则采用CEOF方法对高通滤波处理后的流场矢量数据直接处理,理论上可获取黑潮末端和延伸体海域海表流场在分析年限内的主要特征,达到概略认知该海域流场目的,作为背景流场为后续分析奠定基础;在对流场距平场的分析处理中,一般习惯于综合分析流场或分别分析纬向、经向流场,本文则仅着眼于流场大小进行分析,探究流速大小信号独有特性。具体EOF处理流程:对高通滤波处理后的海表流场流速大小数据进行距平处理,即求取各空间位置对应17 a的平均值,各对应空间位置日均流场数据减去该平均值;在此基础上进行气候态距平处理,即对应每年每天的流场按17 a分别计算平均值,对应空间位置流速大小数据减去对应日期的平均值,得到流速大小异常场,对海表流场流速大小异常场进行EOF处理。

3 结果分析

3.1 流场CEOF分析

对海表流场直接CEOF分析,得到第一模态贡献率高达67.3%,第二模态贡献率仅6.2%,因而第一模态可充分反映该海域海表流场特征。图1为CEOF分析结果第一模态示意图,图1 a为CEOF第一模态空间场,所得空间场为复数场,可反映该海域流场分布特征,后续分析中,以CEOF分析第一模态结果为背景分析流场大小异常特征;CEOF分析所得时间系数同样为复数场,其模值大小反映空间场流速大小变化,幅角大小反映空间场流速方向变化。图1 b为时间系数模值大小随时间变化示意图,图1 c为时间系数幅角值随时间变化示意图。从图1 c可以看出,幅角值大小集中在-1°附近,变化很小,因而该海域流场流向变化在图示年份中可忽略不计。从图1 a,可清晰看到该海域黑潮流轴所处的主要位置,也很好的反映出黑潮附近流场的细节信息,可看到黑潮流轴两侧有涡旋对称分布,其中以日本本州岛南侧涡旋最为明显,流场细节信息表现显著。图1 b和图1 c分别为时间系数的模值与幅角值示意图。

分析时间系数,可发现时间系数模值和幅角值存在相似的年周期变化特征,为进一步分析时间系数周期特性,同时综合考虑模值和幅角特性,基于时间系数幅角正弦值趋近于0的事实,取时间系数模值与时间系数幅角的余弦值相乘,得到新的实序列时间系数序列,并对其进行周期分析,得到图2所

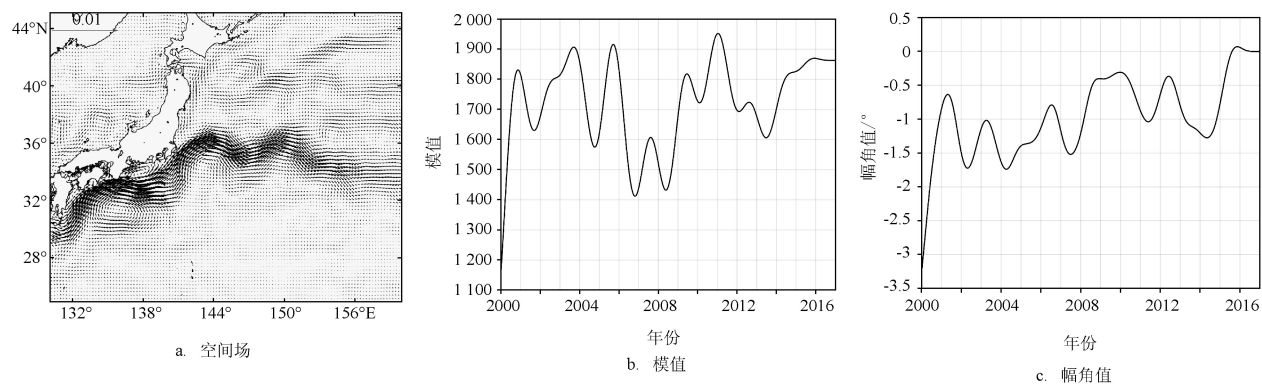


图1 速度场CEOF分析第一模态示意图

示结果。图2 a为计算所得实时间序列,图2 b为周期分析结果,其中红线上方谱密度所示极大值为周期对应位置,横坐标为对应周期。

分析图2 a实序列时间系数可知,该时间序列存在准两年的周期波动,说明黑潮末端和黑潮延伸体海域海表流场并非常年稳定,该海域海表流场存在着周期性变化,结合图1 a,周期变化的主要位置出现在黑潮流轴海域,通过周期分析发现,该海域流场变化周期约为1.7 a。同时周期分析发现还存在一个约为5.6 a的周期,结合前人对ENSO事件周期特性的分析^[14],5.6 a周期是该海域流场对ENSO事件的响应。

3.2 流场流速大小 EOF 分析

对流场流速大小数据进行滤波处理后,获取异常场,进行EOF处理分析,所得EOF分析结果各模态贡献率如下表1所示:

表1 各模态贡献率

模 态	贡献率/%	累计贡献率/%
第一模态	25.36	25.36
第二模态	14.42	39.78
第三模态	10.04	49.82

前三个模态累计贡献率为49.82%,对前3个模态进行分析可基本反映该海域流场流速大小异常的变化特征。下图3为第一模态空间场、时间系数以及时间系数周期分析示意图。

分析图3 a,第一模态正负相位主要集中在黑潮末端和黑潮延伸体流轴附近,偏北侧为正相位,偏南侧为负相位,分析图3 b,时间系数存在较为明显的准2 a的周期波动,通过周期分析得到显著的2.1 a周期,结合图2结果,可知流速大小异常EOF分析第一模态存在对黑潮流轴海域流场周期性变化的响应,反过来也证实该海域流场存在准两年的周期波

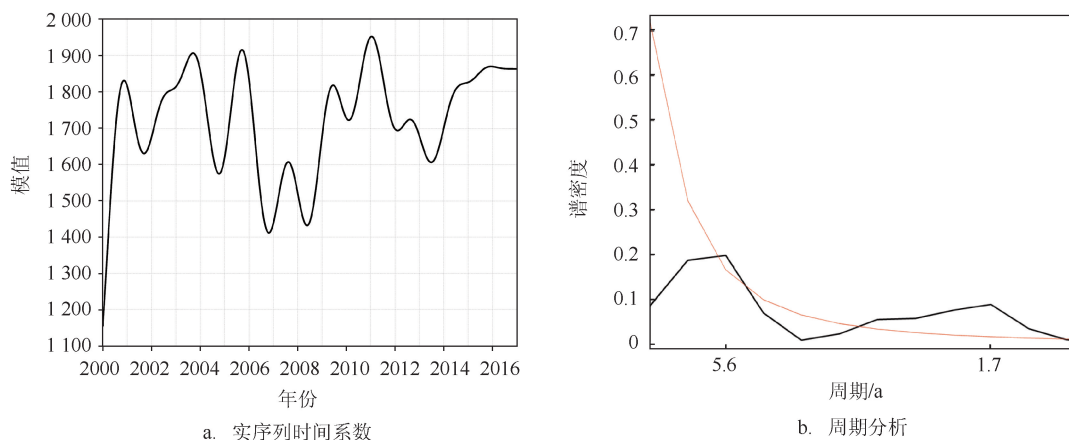


图2 第一模态实时间系数周期分析

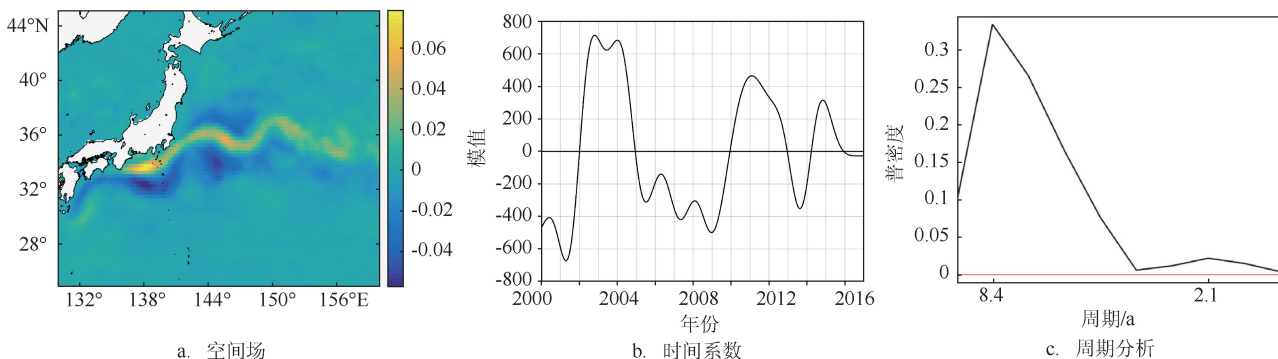


图3 第一模态示意图

动,且主要出现在黑潮末端和黑潮延伸体海域流轴附近。同时,通过对时间系数的周期分析,还存在显著的8.4 a周期,有学者指出,20世纪60年代后,北太平洋涛动周期为8~15 a^[15],第一模态的8.4 a周期特征是对北太平洋涛动的响应。

图4中给出第二模态空间场、时间系数以及时间系数周期分析示意图。

分析图4 a,其正负相位同样集中在黑潮末端和黑潮延伸体流轴附近,但偏北侧为负相位,偏南侧为正相位,综合分析图4 b和图4 c,第二模态存在显著的准2 a周期,同时可以发现,时间系数在2001年和2006年附近都出现较大波动,而1999—2001年该海域黑潮正处于大弯曲成长期,黑潮流轴与流场相对不稳定,2002—2005年该海域黑潮流轴流场则相对稳定,2006年该海域黑潮大弯曲消失,流轴与流场变化复杂^[16],可见第二模态是对该海域黑潮流轴附近流场异常变化的良好反映,分析所得的4.2 a周期恰好是对该段时间内黑潮流轴大弯曲成长与消失的响应。同时,从2007年左右开

始,时间系数呈下降趋势并出现稳定的准2 a周期变化,可推测直至2016年黑潮流轴暂未出现大弯曲或弯曲消失而导致流场异常度增加的事件。综合可知,黑潮流轴大弯曲现象可通过对流场大小EOF分析的第二模态来进行分析。同时,该模态呈现准两年周期变化的事实,也证实了黑潮末端与黑潮延伸体海域流场存在准2 a的周期变化特征。

图5中给出第三模态空间场、时间系数以及时间系数周期分析示意图。

由图5 a可知,第三模态正负相位主要出现在黑潮延伸体海域,同时在整个研究海域内,都有较为明显正负相位零散分布,可见第三模态并不仅限于反映黑潮流轴海域流场流速大小异常的变化特征,更是对研究所处北太平洋海域流场流速大小异常的一个反映。而对时间系数分析,除存在准两年周期外,发现主要存在一个8.4 a的周期,结合研究所处研究海域,8.4 a周期刚好是对北太平洋涛动的一个响应。

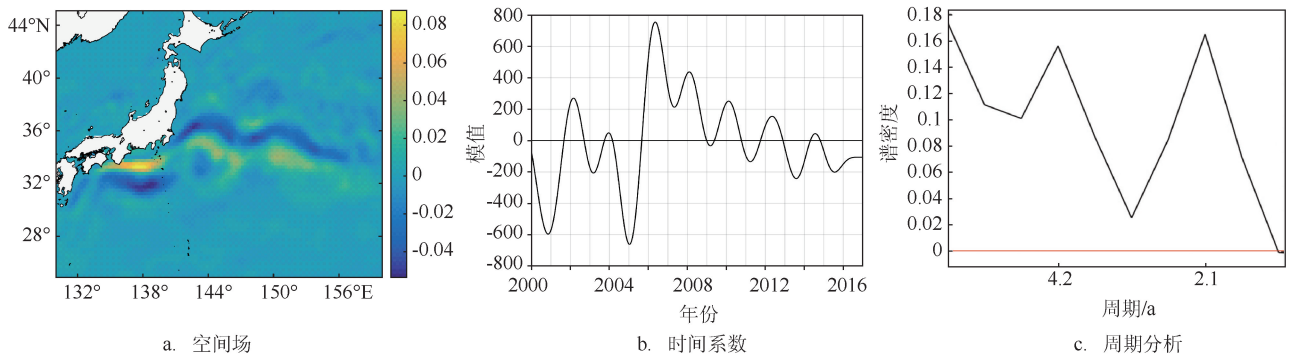


图4 第二模态示意图

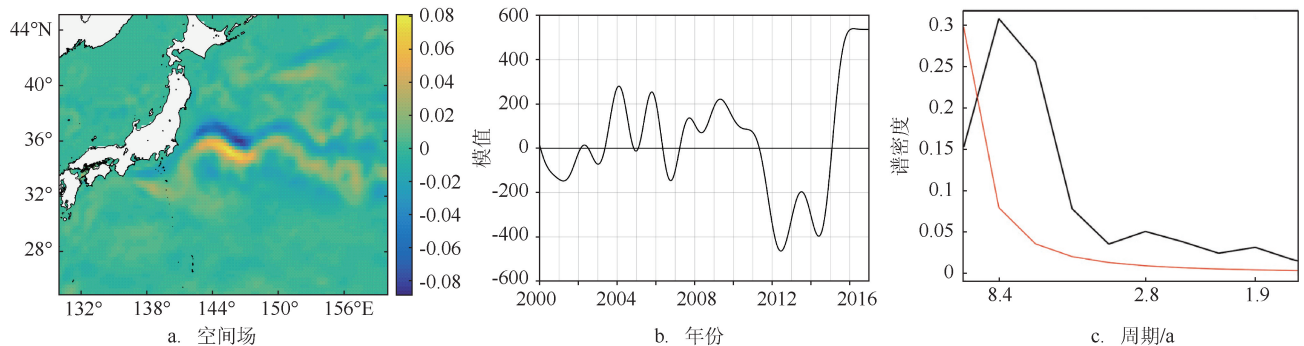


图5 第三模态示意图

4 结论

利用GEKCO2流场数据资料,对黑潮末端与黑潮延伸体海域流场进行年际分析,应用高通滤波、CEOF、EOF、周期分析等方法,可得到如下主要结论:

黑潮末端与黑潮延伸体海域流场存在较为明显的准两年周期变化特征,黑潮流轴大弯曲生消等异常现象在流场流速大小异常场EOF分析模态中有明显体现,同时可发现,2007—2016年时间内,黑潮流轴附近流场未存在较大的弯曲或弯曲消失等异常现象,变化相对平缓。同时,ENSO、北太平洋涛动信号在该海域有明显体现,ENSO信号出现在流场自身变化中,以黑潮流轴海域流场响应较为明显;而北太平洋涛动信号主要出现在流场流速大小异常EOF分析的各模态中,同时北太平洋涛动信号不仅限于黑潮流轴海域,整个研究海域流速大小异常都对北太平洋涛动信号有响应。

参考文献

- [1] 潘家玮,袁业立,郑全安. 用Geosat高度计数据观测黑潮流系的低频变化 II. 季节及年际变化分析[J]. 海洋学报, 1997, 19(4): 41-50.
- [2] 潘丰,张有广,林明森. 黑潮延伸体区海平面异常和中尺度涡的时空特征分析[C]//中国海洋学会第五届青年海洋科学家论坛暨首届国家海洋局青年海洋科学基金学术研讨会论文集. 杭州: 中国海洋学会, 首届国家海洋局, 2011.
- [3] 卢炯,徐建,卢艳,等. 黑潮末端与黑潮延伸体的流场异常模态分析[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(1): 10-21.
- [4] Scharffenberg M. Annual variations of geostrophic currents and eddy kinetic energy inferred from TOPEX/Poseidon-Jason-1 Tandem Mission data[C]//Eumetsat Meteorological Satellite Conference and, American Meteorological Society. 2010: 526-534.
- [5] Qiu B, Chen S M, Hacker P, et al. The kuroshio extension northern recirculation gyre: profiling float measurements and forcing mechanism[J]. Journal of Physical Oceanography, 2008, 38(8): 1764-1779.
- [6] 路凯程,卢炯,张铭. 赤道外北太平洋上层洋流异常分析[J]. 海洋通报, 2011, 30(1): 29-36.
- [7] He Y H, White W B. Interannual variability of the kuroshio frontal structure along its western boundary in the north pacific ocean associated with the 1982 ENSO event[J]. Journal of Physical Oceanography, 1987, 17(9): 1494-1506.
- [8] 张永垂,张立凤,王业桂. 北太平洋海表面高度的年际变化及其机制[J]. 地球物理学报, 2010, 53(2): 247-255.
- [9] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. Monthly Weather Review, 1982, 110(7): 699-706.
- [10] Dommengat D, Latif M. A cautionary note on the interpretation of EOFs[J]. Journal of Climate, 2002, 15(2): 216-225.
- [11] 符淙斌,全小伟,苏炳凯. 用复EOF分析EI Niño增暖的振幅和位相变化[J]. 科学通报, 1987, 32(16): 1241-1241.
- [12] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- [13] Barnett T P. Interaction of the monsoon and pacific trade wind system at interannual time scales part I: the equatorial zone[J]. Monthly Weather Review, 1984, 111(4): 756-773.
- [14] 卢炯,包赞,吕庆平. 热带太平洋上层洋流异常的复EOF分析[J]. 海洋预报, 2014, 31(2): 56-66.
- [15] 李崇银,李桂龙. 北大西洋涛动和北太平洋涛动的演变与20世纪60年代的气候突变[J]. 科学通报, 1999, 44(16): 1765-1768.
- [16] 李杰,杜凌,韩飞,等. 黑潮延伸体海域海平面年际变化及其与海流的关系[J]. 海洋通报, 2015, 34(2): 158-167.

EOF analysis of sea surface currents in the Kuroshio end and Kuroshio extension region

FANG Fang¹, CAI Song¹, SUN He-quan², ZHANG Yong-san¹

(1. Unit 32033, P.L.A, Haikou 571199 China; 2. Dalian Naval Academy, Dalian 116018 China)

Abstract: The annual variation characteristics of sea surface current in the Kuroshio End and Kuroshio Extension region are analyzed using 17-year sea surface current data in this paper. Based on analysis using complex empirical orthogonal function, it is found that the current field has a quasi periodicity of 2 years and shows response to the ENSO events. Applying an empirical orthogonal function (EOF) analysis to the current speed, the quasi periodicity of 2 years is confirmed. The second mode typically shows the large Kuroshio meander. A further indication is that the signal of the North Pacific Oscillation is revealed in both mode 1 and mode 2.

Key words: Kuroshio end and Kuroshio extension; sea surface current; complex; empirical orthogonal function; empirical orthogonal function