

纪增华, 武晓博, 李威, 等. 基于复经验正交函数的日本以南黑潮路径时空变化特征及其因果关系研究[J]. 海洋学报, 2024, 46(8): 50–62, doi:10.12284/hyxb2024071

Ji Zenghua, Wu Xiaobo, Li Wei, et al. Spatiotemporal variation characteristics and causal relationship of the Kuroshio path south of Japan based on complex empirical orthogonal functions[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(8): 50–62, doi:10.12284/hyxb2024071

基于复经验正交函数的日本以南黑潮路径时空变化特征及其因果关系研究

纪增华^{1,3}, 武晓博^{2*}, 李威¹, 曹力戈¹, 张蒙蒙¹, 董婉秋¹, 韩桂军^{1*}

(1. 天津大学海洋科学与技术学院 天津市海洋环境与安全保障重点实验室, 天津 300072; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 3. 国家海洋技术中心, 天津 300112)

摘要: 日本以南黑潮路径变化的相关分析一直是热点之一。过去的研究指出日本以南黑潮路径变化受到多种因素的影响, 如上游流量、中尺度涡旋、气候信号等。然而, 关于这些影响因素之间的相互因果关系尚不完全清楚。本文基于 50a (1958–2007 年) 中国海洋再分析数据集 (CORA) 和 14a (2008–2021 年) 卫星高度计资料, 获取了日本以南黑潮路径时间序列, 并利用复经验正交函数 (CEOF) 分析方法对其进行时空特征分析。结果表明, 经 CEOF 分析获取的前两个主模态可以描述日本以南黑潮路径时空变化的主要特征, 且分别代表与之相关的东传和西传信号。进一步地, 基于信息流理论的因果分析结果表明: 一方面, 太平洋十年涛动 (PDO) 通过风应力的变化影响副热带逆流 (STCC) 区域的涡旋活动, 从而影响吐噶喇海峡的黑潮输运变化, 进而对东传信号产生直接影响, 最终影响日本以南海域的黑潮路径变化; 另一方面, 黑潮延伸体的涡旋活动受到北太平洋涡旋振荡 (NPGO) 的影响, 促使该区域的中尺度涡旋向西移动, 进而对西传信号产生直接影响, 最终影响日本以南海域的黑潮路径变化。此外, 分析结果还表明: 日本以南海域的相对涡度和再循环流强度变化是对黑潮路径变化的响应, 而非影响黑潮路径变化的因素。

关键词: 日本以南黑潮路径; 复经验正交函数; 因果分析; 信息流

中图分类号: P731.21 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2024)08-0050-13

1 引言

黑潮是太平洋中著名的西边界暖流。它源于北赤道环流, 自菲律宾群岛北上, 向东北流入东海, 随后穿过吐噶喇海峡, 沿着日本南部海岸向东移动, 最终穿过伊豆海脊进入北太平洋海域^[1]。其中, 日本以南黑潮最为引人关注, 这是因为黑潮在该海域呈现典型的双流态特征: 典型大弯曲路径 (typical Large Me-

ander, tLM) 和非大弯曲路径 (Non-Large Meander, NLM), 其中非大弯曲路径又进一步被分为两种路径, 即近岸非大弯曲 (nearshore Non-Large Meander, nNLM) 和离岸非大弯曲 (offshore Non-Large Meander, oNLM)^[2-3] (图 1)。大量研究表明日本以南黑潮的路径变化对周边地区的气候、渔业、航海、军事等有着重要的影响, 因此对其开展相关研究具有重要意义^[4-7]。

过去的研究表明, 日本以南黑潮路径的变化与整

收稿日期: 2023-11-08; 修订日期: 2024-06-05。

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFC3107800); 国家自然科学基金 (42376190, 41876014)。

作者简介: 纪增华 (1999—), 男, 黑龙江省大庆市人, 主要从事黑潮分析与预报研究。E-mail: jzh1999@tju.edu.cn

* 通信作者: 武晓博 (1995—), 男, 河北省邢台市人, 主要从事黑潮分析与预报研究。E-mail: xb_wu@tju.edu.cn; 韩桂军 (1970—), 女, 辽宁省新民市人, 教授, 主要从事海洋分析与预报研究。E-mail: guijun_han@tju.edu.cn

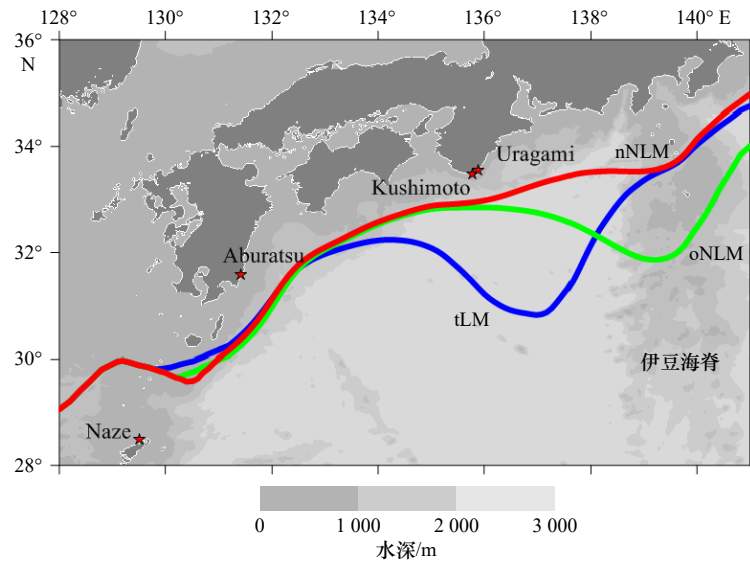


图1 基于 CORA 数据绘制的日本以南黑潮 3 种典型路径

Fig. 1 Three typical paths of Kuroshio south of Japan based on CORA data

典型大弯曲(蓝色)、离岸非大弯曲(绿色)和近岸非大弯曲(红色),红星分别表示 Naze、Aburatsu、Kushimoto 和 Urugami 4 个验潮站
Typical Large Meander (blue), offshore Non-Large Meander (green), and nearshore Non-Large Meander (red). The red stars denote tide gauge stations Naze, Aburatsu, Kushimoto and Urugami, respectively

个北太平洋的大尺度环流变化密切相关,特别是该区域上游(副热带逆流)和下游(黑潮延伸体)地区^[8-9]。一些研究表明,来自上游的流量是大弯曲发生的先决条件^[10-12]。Qiu 和 Chen 指出来自黑潮上游副热带逆流(Subtropical countercurrent, STCC)区域伴随着环流输运与九州东南部黑潮路径相互作用而产生的扰动发挥了关键作用,这种扰动使日本南部沿岸产生正相对涡度,从而导致黑潮大弯曲形成^[13]。同时,还有一些研究指出源自 STCC 区域的反气旋涡旋可以改变东海黑潮输运,从而导致日本以南黑潮路径发生变化^[14-15]。Usui 等使用数据同化模型开展了敏感性实验,结果表明较低的输运量会导致大弯曲路径持续的时间更长^[16]。除流量外,许多使用高度计资料的观测研究指出了中尺度涡旋对黑潮路径变化的重要性^[17-19]。部分研究指出上游中尺度涡旋变率的增加有利于气旋-反气旋涡旋对的产生,进而形成的“触发曲流”会进一步促进大弯曲的发生^[20]。同样地,日本以南黑潮路径变化与黑潮延伸体(Kuroshio extension, KE)之间存在密切关系^[21]。Sugimoto 和 Hanawa 基于卫星高度计资料分析了日本以南黑潮和黑潮延伸体区域的关系,结果表明当日本以南黑潮处于大弯曲路径(非大弯曲路径),下游延伸体流态较为稳定(不稳定)^[22]。吴友婷等进一步利用自组织映射和信息流的方法研究了日本以南黑潮与黑潮延伸体的因果关系,结果表明当黑潮大弯曲发生时,日本南部黑潮和黑潮延伸体

之间存在双向因果,但因果关键区不同^[23]。此外,还有一些研究认为来自黑潮延伸体区域的中尺度涡旋对日本以南黑潮路径变化有着重要影响^[24-25]。具体来说,Ebuchi 和 Hanawa 指出气旋涡旋在黑潮延伸体区域产生后,向西传播至日本以南黑潮回流区,对路径变化产生影响^[24]。Miyazawa 等指出从黑潮延伸体区域传播的气旋涡旋在合并后削弱了黑潮曲流,进而导致大弯曲状态的结束^[25]。

除上述影响因素以外,一些研究指出气候信号和风场对黑潮路径变化的影响,Qiu 在最新研究中采用风强迫线性涡度模型,证明了持续的大弯曲受到太平洋十年涛动(Pacific Decadal Oscillation, PDO)的影响^[26],具体来说,PDO 处于正相期间通过风应力将负海面高度异常带入黑潮延伸体区域,随后通过向西传播扰乱伊豆海脊的黑潮路径,进一步影响日本以南黑潮路径的稳定。同时,NPGO(North Pacific Gyre Oscillation)作为北太平洋涛动的另一种海洋表达形式,过去的研究表明该信号通过风应力影响海表面高度异常,进而通过西传影响日本以南的涡动能(eddy kinetic energy, EKE)变化^[27-30]。

综上所述,日本以南黑潮路径变化受到多种因素的影响,然而这些因素之间的因果关系尚不明确。Douglass 等指出一些与黑潮路径变化密切相关的因素(如:相对涡度、垂向剪切、再循环流强度和输运量)更可能是对大弯曲形成的一种响应,而不是促进

其形成的原因^[31]。因此对黑潮路径变化相关的各种因素进行进一步地因果分析是必要的。本文首先采用复经验正交函数(complex empirical orthogonal function, CEOF)分析方法提取黑潮路径的时空特征信息。随后,计算并统计黑潮上游(即副热带逆流区域)与下游(即黑潮延伸体)具有代表性因素的时间序列,通过信息流对其进行因果分析,最后对日本以南黑潮路径变化因素之间的因果关系进行讨论。

2 数据和方法

2.1 数据

本文所用到的数据主要包括用于黑潮流轴信息提取的海面高度(sea surface height, SSH)数据和绝对动力地形(absolute dynamic topography, ADT)数据,用于计算黑潮大弯曲指数的 Kushimoto 和 Uragami 验潮站水位数据^[32],用于计算吐噶喇海峡输运量的 Naze 和 Aburatsu 验潮站水位数据,用于计算涡动能、垂向剪切和再循环流强度的流速数据(经向分量和纬向分量),用于计算风应力的海表面 10 m 风速数据,以及黑潮延伸体指数, PDO 指数和 NPGO 指数。

本文所使用的海面高度来自于西北太平洋区域中国海洋再分析(China ocean reanalysis)数据集(简称“CORA”, <http://www.cmoc-china.cn>)^[33]。该区域海洋再分析数据集在日本以南黑潮地区的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间分辨率为 1d。本文所使用的区域海洋再分析数据集的时间序列长度为 50a(1958–2007 年)。

ADT 数据和流速数据均来自于哥白尼海洋和环境监测服务公司(Copernicus marine and environment monitoring service, CMEMS, <https://marine.copernicus.eu>)。ADT 数据是海平面异常(sea level anomaly, SLA)与平均动力地形(mean dynamic topography, MDT)之和,时间范围为 2008–2021 年,时间分辨率为 1d,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。流速数据时间范围为 1993–2021 年,时间分辨率为 1d,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

首先基于上述两种海面高度数据进行黑潮流轴信息的提取。黑潮流轴可以由一个特定的 SSH 等值线来定义^[21–22]。本文通过试验选取 70 cm SSH 等值线和 110 cm ADT 等值线作为黑潮流轴,这里选取黑潮路径各经度对应纬度值作为后续试验所用的黑潮路径数据,该数据可以很好地描述黑潮路径的变化^[34]。本文分析主要围绕日本以南黑潮路径年际以上的变化,因此对获取的黑潮路径数据进行月平均处理,并对月平均数据进行 13 个月的滑动平均处理。

风速数据来自于欧洲中期天气预报中心发布的 ERA5 再分析数据集,风速为海表面 10 m 的月平均数据,时间范围为 1958–2021 年,空间分辨为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。此外,本文还使用了夏威夷海平面数据永久服务中心(Permanent Service for Mean Sea Level, PSMSL)的 Kushimoto、Uragami、Naze 和 Aburatsu 验潮站水位数据,该数据来自 <https://www.psmsl.org>; 黑潮延伸体指数来自 <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/kuroshio>; PDO 指数来自 <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/pdo/>; NPGO 指数来自 <http://www.o3d.org/npgo/>。

2.2 方法

2.2.1 CEOF 分析

复经验正交函数(CEOFF)分析方法是 Barnett 于 1983 年提出的,它不仅可以分析气候变量场空间尺度驻波振动分布结构,而且可以分析行波分布结构和相位变化^[35],目前已被应用于大气和海洋相关环境变量时空特征分析中^[36–37]。CEOFF 分析就是将一个标量场通过变换,构造出同时含有实部和虚部的 Hermite 矩阵来分解,从而获取主要的复空间模态和时间系数。具体步骤如下:

首先对黑潮路径数据进行 CEOFF 分析,将黑潮路径数据构建成矩阵 X :

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中, x_{mn} 表示第 m 个空间位置上的 n 时刻的值。

将矩阵 X 正则化处理为 X' :

$$X' = \sigma^{-1} (X - \bar{X}), \quad (2)$$

式中, σ 为标准差矩阵, \bar{X} 为矩阵均值。

通过对矩阵 X' 进行 Hilbert 变换来构造 Hermite 矩阵 U , U 可以进一步分解为

$$U = BP, \quad (3)$$

式中, B 为时间函数矩阵, P 为空间函数矩阵。

下一步,计算时间振幅函数和时间位相函数,时间振幅函数为

$$S_k(x) = [B_k(x)B_k^*(x)]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

式中, x 表示空间点数, k 为主分量序号, $B_k(x)$ 表示第 k 个特征值对应的特征向量, $B_k^*(x)$ 是 $B_k(x)$ 的共轭向量。时间振幅可以反映行波的空间结构随时间的变化。

时间位相函数为

$$Q_k(x) = \arctan \left[\frac{\text{Im} B_k(x)}{\text{Re} B_k(x)} \right], \quad (5)$$

式中, $Q_k(x)$ 为时间相位幅角, Im 表示虚部, Re 表示实部。时间相位可以反映行波的传播速度。

计算空间振幅函数和空间位相函数, 空间振幅函数为

$$S_k(t) = [P_k(t) P_k^*(t)]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

式中, t 为时间点数, $P_k(t)$ 表示第 k 个主分量, $P_k^*(t)$ 表示共轭。空间振幅可以反映行波的空间分布结构。

空间位相函数为

$$Q_k(t) = \arctan \left[\frac{\text{Im} P_k(x)}{\text{Re} P_k(t)} \right], \quad (7)$$

式中, $Q_k(t)$ 为空间相位幅角, $P_k(x)$ 表示第 k 个特征值对应的特征向量。空间相位可以反映行波的传播方向。

2.2.2 Liang-Kleeman 信息流

Liang-Kleeman 信息流方法是 Liang 基于信息流理论严格推导出的在无任何先验知识的情况下, 利用两个时间序列 x_1 与 x_2 在单位时间内的信息传递来定量地表征两者之间的因果关系的方法^[38]。该方法严格建立在坚实的物理基础上, 在线性与非线性模型中都得到了验证^[39], 具有模型简化、可多尺度分析和可解释性强等优点。它可以发现一些传统统计方法无法检测到的因果关系, 提供了一种直观和可解释的方法来描述海洋系统中信息传递和交换过程。此方法已被广泛应用于海洋科学相关的因果性实际问题中, 如二氧化碳与全球变暖的关系、风场和黑潮入侵对吕宋冷涡的影响以及日本以南黑潮与延伸体的关系等^[40-41, 23]。具体如下:

对于两条时间序列 x_1 和 x_2 , 在线性模型假设下, 由 x_2 到 x_1 的信息流率的最大似然估计为

$$T_{2 \rightarrow 1} = \frac{C_{11} C_{12} C_{2, d1} - C_{12}^2 C_{1, d1}}{C_{11}^2 C_{22} - C_{11} C_{12}^2}, \quad (8)$$

式中, C_{ij} 为样本协方差, $C_{i, dj}$ 是 x_i 和由 x_j 导出的级数之间的样本协方差。在通过显著性检验的基础上, 如果 $T_{2 \rightarrow 1}$ 为 0, 则 x_2 不是 x_1 的因, x_1 独立于 x_2 变化; 否则, x_2 是引起 x_1 变化的因, 且其大小表征了因果关系的强弱。如果 $|T_{2 \rightarrow 1}|$ 的值远大于 $|T_{1 \rightarrow 2}|$ 的值, 且 $|T_{1 \rightarrow 2}|$ 接近于 0 可忽略不计时, 也可以认为 x_2 是 x_1 的因。如果二者的值相当, 则 x_2 和 x_1 互为因果^[40, 42]。

3 日本以南黑潮路径时空变化分析

基于获取的 64a (1958–2021 年) 日本以南黑潮路径数据, 结合 CEOF 分析方法, 首先对日本以南黑潮

路径进行时空特征分析。分析获得的各模态方差贡献率如表 1 所示, 所有模态均通过 North 显著性检验^[43]。由表可知, 前 3 个主模态方差累计占比接近 90%, 其中前两个主模态分别占据了 53.03% 和 23.41% 的方差贡献率, 基本包含了主要时空特征信息, 因此本文后续只对前两个主模态进行分析讨论。

表 1 CEOF 前 3 个模态贡献率
Table 1 Contribution rate of the first 3 modes of CEOF

模态	模态方差贡献率/%	模态累积方差贡献率/%
1	53.03	53.03
2	23.41	76.44
3	12.81	89.25

第一主模态解释了总方差的 53.028%。图 2 展示了第一主模态的空间模态和时间系数的振幅及其相位的分布情况。如图 2 所示, 第一主模态的空间模态在日本以南大弯曲区域 (134°~137°E) 以及伊豆海脊处 (140°E) 均存在较大的振幅 (图 2a)。这些区域与日本以南黑潮路径变化区域基本一致, 这表明第一主模态反映了黑潮路径主要的空间变化情况。同时, 空间模态的相位幅角随着经度东移逐渐增大 (图 2b), 呈现出一种波的东传效果。图 2c 与 2d 分别描述了第一主模态时间系数的振幅和相位分布情况。时间系数的振幅在黑潮大弯曲发生时期相对较大, 时间系数的相位幅角随着时间不断减小, 并呈现周期循环。幅角在大弯曲时期变化相对较缓, 这表明东传的波速在大弯曲时期相对较低。

第二主模态解释了总方差的 23.413%, 该模态的空间模态和时间系数的振幅及其相位的分布情况如图 3 所示。第二主模态的空间模态在日本以南黑潮非大弯曲区域 (131°~134°E) 和伊豆海脊以西处 (139°E) 振幅明显高于其他位置 (图 3a), 且 131°~134°E 区域通常为“触发曲流”发生区域, 这表明第二模态与黑潮大弯曲的形成可能密切相关。空间模态的相位幅角随着经度东移逐渐减小 (图 3b), 呈现出一种波的西传效果。图 3c 与 3d 分别描述了时间系数的振幅和相位的分布情况。同样, 时间系数的振幅在黑潮大弯曲发生时期相对较大, 时间系数的相位幅角随着时间不断减小, 并呈现周期循环, 周期小于第一主模态时间系数的周期, 且在大弯曲时期周期更小, 由于大弯曲路径的维持通常被理解为由向西的行星 β 效应和向东的平流效应平衡所致, 这表明西传信号所代表的波动在大弯曲时期传播速度更快, 这可能意味着大弯

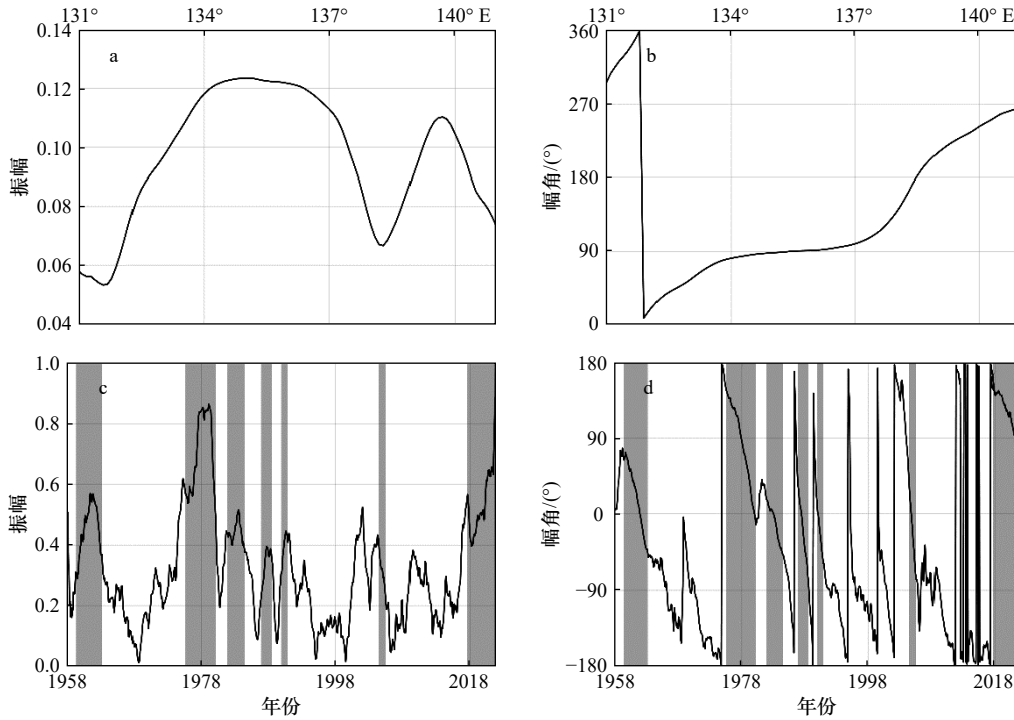


图 2 第一主模态空间分布与时间序列的振幅(无量纲)和幅角

Fig. 2 Amplitude (dimensionless) and angle plots of the spatial distribution and time series of the first principal mode

a.空间振幅;b.空间幅角;c.时间振幅;d.时间幅角。灰色阴影区域表示黑潮大弯曲时期

a. Spatial amplitude; b. spatial angle; c. time amplitude; d. time angle. The gray shaded area represents the period of the Kuroshio Large Meander

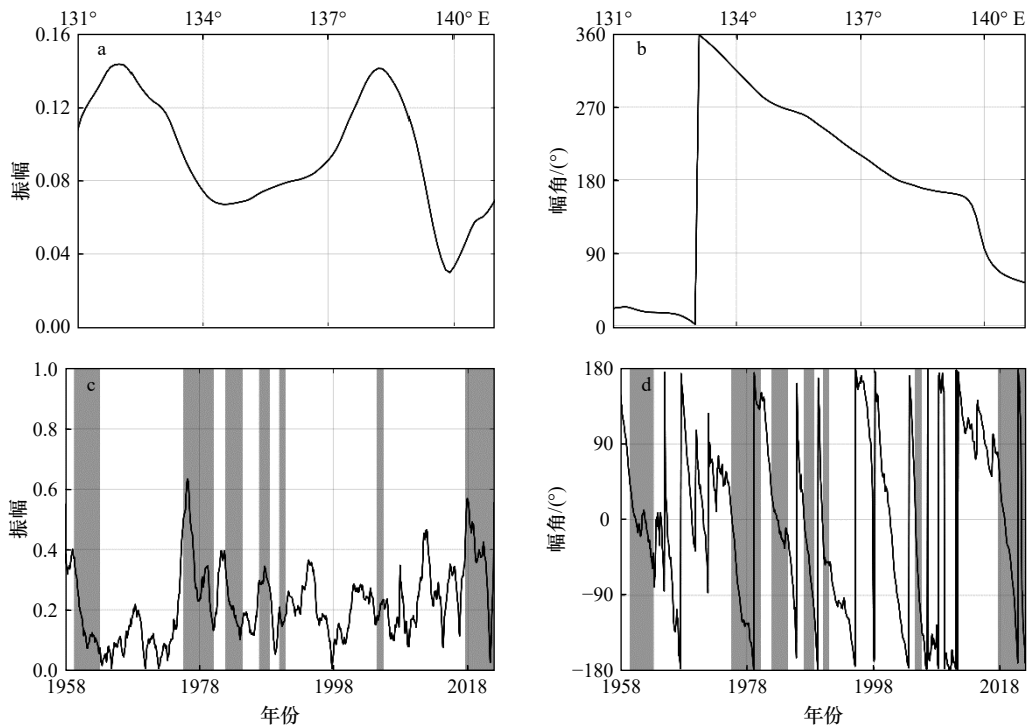


图 3 第二主模态空间分布与时间序列的振幅(无量纲)和幅角

Fig. 3 Amplitude (dimensionless) and angle plots of the spatial distribution and time series of the second principal mode

a.空间振幅;b.空间幅角;c.时间振幅;d.时间幅角。灰色阴影区域表示黑潮大弯曲时期

a. Spatial amplitude; b. spatial angle; c. time amplitude; d. time angle. The gray shaded area represents the period of the Kuroshio Large Meander

曲时期需要更快的速度来维持平衡状态。并且由于黑潮大弯曲通常发生在振幅达到极大值之后, 这表明西传信号在黑潮大弯曲的形成过程中可能扮演着重要角色。

为了进一步描述 CEOF 分析结果, 这里分别将第一主模态和第二主模态进行重构, 并基于重构结果绘制了霍夫默勒图, 如图 4 所示。图 4a 展示了利用真实场绘制的霍夫默勒图, 真实场表示的变量为黑潮流速, 是对黑潮路径数据提取得到的流轴数据经正则化处理后得到的, 红圈代表最新两次大弯曲发生的时期。由图 4 可知, 在 2004 年黑潮大弯曲发生期间, 黑潮随纵轴时间的变化呈现出自西向东的传播, 存在明显的东传信号。而在 2017 年发生的最新一次大弯曲期间, 黑潮则呈现出自东向西的传播, 存在明显的西传信号。在第一模态重构中(图 4b)黑潮随时间的增长整体呈现出向东传播的趋势, 而在第二模态重构中(图 4c)黑潮随时间的增长整体则呈现向西传播的趋势。这进一步表明, 第一主模态主要反映了黑潮路径变化中存在的东传信号, 而第二模态主要反映了黑潮路径变化中的西传信号。图 4d 是利用前两个主模态的重构结果, 该重构场与真实场基本吻合, 这也表明前两个主模态可以较好地表征日本以南黑潮的主要时空变化特征。

4 黑潮与其相关因素的因果分析

上一节的分析结果表明, 由 CEOF 分析获取的前

两个模态分别反映了与日本以南黑潮路径变化密切相关的东传与西传信号。而过去的研究指出日本以南黑潮路径变化与多种因素密切相关, 然而它们之间是否存在怎样的联系, 孰因孰果, 这些有待进一步地探究。基于此, 本节首先计算并统计了黑潮上游(即副热带逆流区域)与下游(即黑潮延伸体区域)具有代表性因素的时间序列, 然后通过信息流的方法对其进行因果分析。

4.1 黑潮相关因素计算

本节将黑潮相关变量按照空间区域分布(日本以南黑潮上游、当地和下游), 分别计算了 STCC 区域的涡动能(EKE), 吐噶喇海峡的输运量(Kuroshio Transport, KT), 日本以南海域的垂向剪切(shear)、相对涡度(Curl)和再循环流强度(recirculation gyre strength, SRG)以及黑潮延伸体海域的涡动能; 同时统计了代表日本以南黑潮大弯曲的大弯曲指数(Kushimoto Urugami Index, KUI)、代表黑潮延伸体的 KE 指数。此外, 还统计和计算了对日本以南黑潮路径可能起到影响作用的气候信号(PDO 指数和 NPGO 指数)和北太平洋的风应力。由于黑潮大弯曲是反映日本以南黑潮路径变化的重要指标(时期), 因此在图中都对其发生时期进行标注。此外, 受可获取资料的限制, 黑潮相关变量的时间序列为获取的最长时间序列。各变量计算具体介绍如下:

首先, 为了能够量化诱导大弯曲发生的涡旋状态, 我们根据 Qiu 和 Chen 的研究^[13], 利用流速数据计

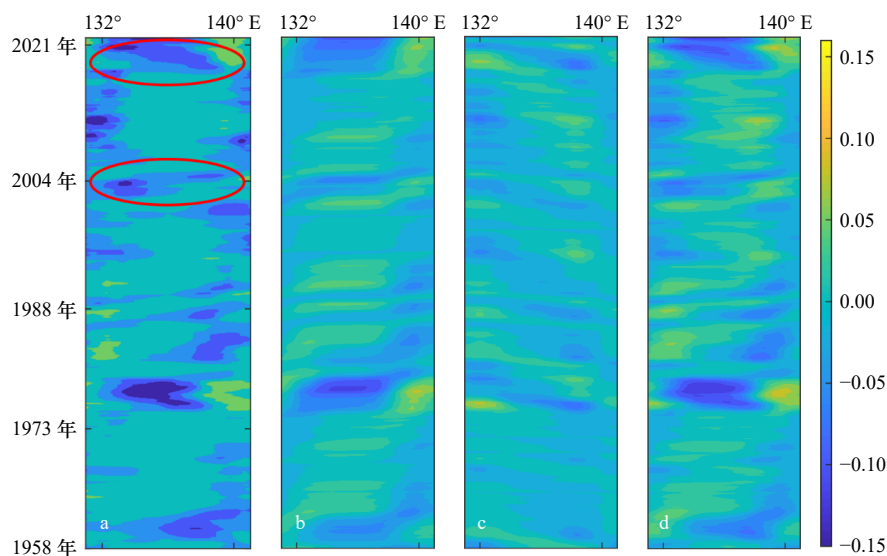


图 4 日本以南黑潮路径的霍夫默勒图(无量纲)

Fig. 4 Hovmöller diagram of the Kuroshio path south of Japan (dimensionless)

a. 真实场; b. 第一模态重构; c. 第二模态重构; d. 第一和第二模态重构叠加

a. Real field; b. first mode reconstruction; c. second mode reconstruction; d. first and second mode reconstruction superposition

算了 STCC 区域 ($18^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{W}$) 的涡动能时间序列, 涡动能可以代表该地区的中尺度涡旋水平。如图 5 所示, STCC 区域的涡动能年际变化较为明显, 涡动能峰值分别出现在 1996–1998 年、2003–2005 年和 2015–2017 年, 这些年份多数处于大弯曲发生之前, 这可能表明黑潮大弯曲的发生与 STCC 区域的涡动能增加密切相关。

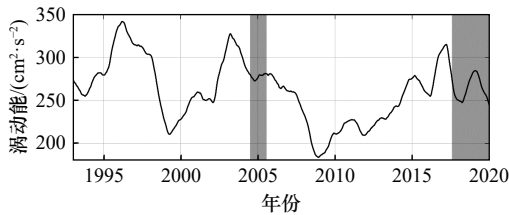


图 5 STCC 区域的涡动能时间序列

Fig. 5 STCC area of eddy kinetic energy time series.

灰色阴影区域表示黑潮大弯曲时期

The gray shaded area represents the period of the Kuroshio Large Meander

其次, 一些研究认为, 吐噶喇海峡的输运量也是影响日本以南黑潮路径变化和中尺度涡旋的关键因素, 并且大弯曲的纵向位置也被认为与黑潮输运量有关, 输运量的大小对其维持或衰减起到关键作用^[10-12]。本节基于 Kawabe 的方法计算了吐噶喇海峡的输运量, 公式如下^[44]:

$$Z_D = 0.326X_1 - 0.296X_4 + 24.7, \quad (9)$$

式中, Z_D 为黑潮输运, X_1 和 X_4 分别为 Naze 和 Aburatsu 的 1 年月平均海平面数据, 单位为 cm。如图 6 所示, 吐噶喇海峡的年际输运变化明显, 整体呈现下降的趋势, 并且在黑潮大弯曲发生时期输运量更高, 在非大弯曲时期输运量较小。

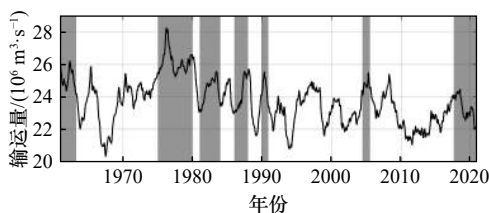


图 6 吐噶喇海峡输运量时间序列

Fig. 6 Time series of transport volume in Tokara Strait

灰色阴影区域表示黑潮大弯曲时期

The gray shaded area represents the period of the Kuroshio Large Meander

对于日本以南海域, 以前的研究定义了几个指数来反映大弯曲现象的发生^[45], 其中 KUI 指数是 Kushimoto 和 Uragami 验潮站测得海平面时间序列之差, 该指数能够较好地反映黑潮大弯曲的发生。从图 7 中可以明显看出, KUI 指数能够较好地反映大弯曲的年

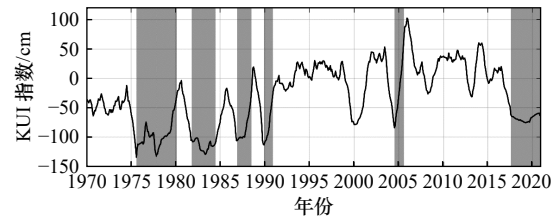


图 7 Kushimoto 和 Uragami 验潮站海平面差时间序列

Fig. 7 Time series of sea level differences between Kushimoto and Uragami tidal stations

灰色阴影区域表示黑潮大弯曲时期

The gray shaded area represents the period of the Kuroshio Large Meander

际变化, 在大弯曲发生期间, KUI 指数明显偏低, 而在非大弯曲状态下情况则明显增高。

同时, 为了更具体地呈现日本以南黑潮区域的特征, 本文还计算了与黑潮路径变化密切相关的动力因素: 再循环流强度、垂向剪切速度和相对涡度。这里参考 Douglass 等的研究^[31], 空间上选取 $26.5^{\circ}\sim 32.5^{\circ}\text{N}$, $132^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 作为日本以南黑潮海域, 时间上则选取 1958 年 1 月至 2007 年 12 月的数据进行计算, 最后将所得结果进行 13 个月的滑动平均。3 种变量的计算公式如下:

$$S(t) \equiv \iint_A h(x, y, t) dx dy, \quad (10)$$

式中, S 为再循环流强度, t 为时间, A 为海面高度大于 150 厘米的面积, h 为海面高度, x 和 y 分别代表横纵坐标。

$$\zeta = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad (11)$$

式中, ζ 为相对涡度, u 和 v 分别为东向和北向的速度, x 和 y 分别代表空间上的横纵坐标。

垂向剪切定义为 $\langle U_{0-200} - U_{200-600} \rangle$, U_{0-200} 和 $U_{200-600}$ 分别表示 200 m 以上和 200 m 至 600 m 垂直平均黑潮速度, 对原始速度数据选取黑潮区域 ($132^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 后取均值即可得到。

图 8 展示了再循环流强度、垂向剪切速度和相对涡度的时间序列变化, 由图 8a 可知, 再循环流强度年际变化明显, 整体呈现上升趋势, 在黑潮大弯曲发生时期, 其数值较低。图 8b 展示了垂向剪切的时间序列, 剪切量在大弯曲时期普遍升高, 随时间波动明显, 并且具有多个中间峰。图 8c 展示了相对涡度的时间序列, 该序列整体呈现下降趋势, 在大弯曲发生时期数值相对较大。通过对比 3 种时间序列, 在大弯曲发生时期, 再循环流强度的减弱与相对涡度的增加能够较好地对应, 二者在整体上也呈现相反的变化趋势。

对于黑潮下游延伸体区域, Qiu 等提出 KE 流态的稳定程度可以通过 31°~36°N, 140°~165°E 区域的海表面高度距平区域平均值作为指数来衡量^[46]。该指数为正(负)值代表 KE 处于稳定态(不稳定态), 且正(负)的绝对值越大表示 KE 越稳定(不稳定)。同时, 为了进一步探究中尺度涡旋在产生和维持大弯曲路径中发挥的作用, 这里计算了 1993–2021 年黑潮延伸体的涡动能时间序列。如图 9 所示, KE 指数与涡动能时间序列在整体趋势上较为一致, 相关系数为 0.68, 并且在黑潮大弯曲时期出现数值增大现象。

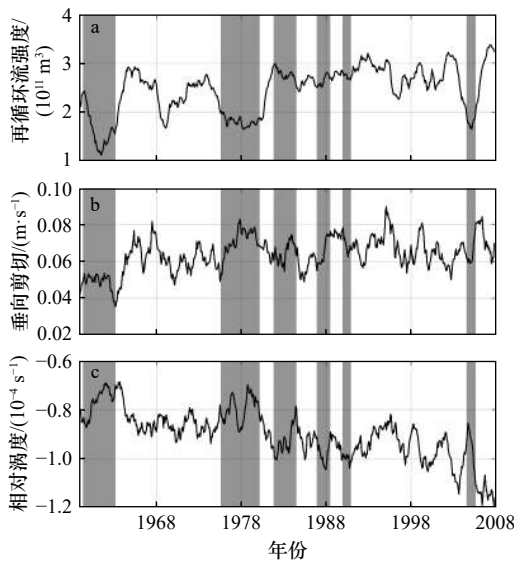


图 8 再循环环流强度(a); 垂向剪切(b); 相对涡度(c)
Fig. 8 Recirculation gyre strength (a); vertical shear (b); relative vorticity (c)

灰色阴影区域表示黑潮大弯曲时期

The gray shaded area represents the period of the Kuroshio Large Meander

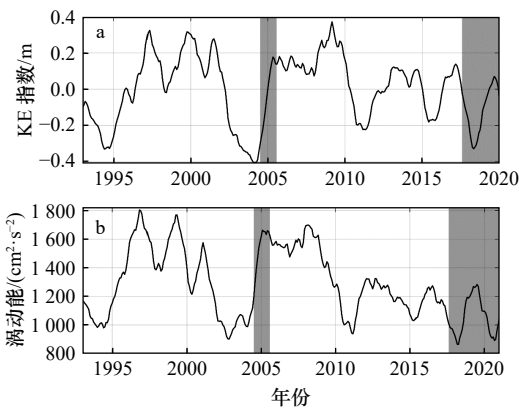


图 9 KE 指数(a)和 KE 区域(b)的涡动能时间序列
Fig. 9 KE index (a) and Eddy kinetic energy time series in the KE region (b)

灰色阴影区域表示黑潮大弯曲时期

The gray shaded area represents the period of the Kuroshio Large Meander

最后, 本节还计算统计了与黑潮路径变化相关的气候信号指数(PDO、NPGO)以及风应力变化。其中, 风应力计算公式为

$$\tau = \rho \cdot C_d \cdot U^2, \quad (12)$$

式中, τ 为风应力, ρ 为空气密度, C_d 是风阻系数, U 是风速。

PDO、NPGO 和风应力的时间变化如图 10 所示, 3 种时间序列整体波动随时间变化较为明显, PDO 指数与风应力整体呈现增大的趋势, 在大弯曲时期没有较为特殊的变化规律。

4.2 信息流因果分析

上一节的结果表明日本以南黑潮大弯曲与许多因素(上游和下游、气候)存在已知或潜在的关系, 为了进一步探究上述时间序列之间的因果关系及其对于日本以南黑潮路径变化的影响, 本节主要基于 CEOF 分析的第一主模态(东传)和第二主模态(西传), 利用信息流的方法探讨相关因素间的因果关系。

表 2 展示了基于 CEOF 分析的第一主模态(东传)和第二主模态(西传)与各因素间的信息流因果关系。表 2 中加粗字体代表该结果通过 90% 的置信检验, 横轴表示因, 纵轴表示果。这些因素依次为: STCC 区域涡动能 [EKE(STCC)]、输运量(KT)、东传信号、西传信号、相对涡度(CURL)、再循环环流强度(SRG)、垂向剪切(SHEAR)、大弯曲指数(KUI)、黑

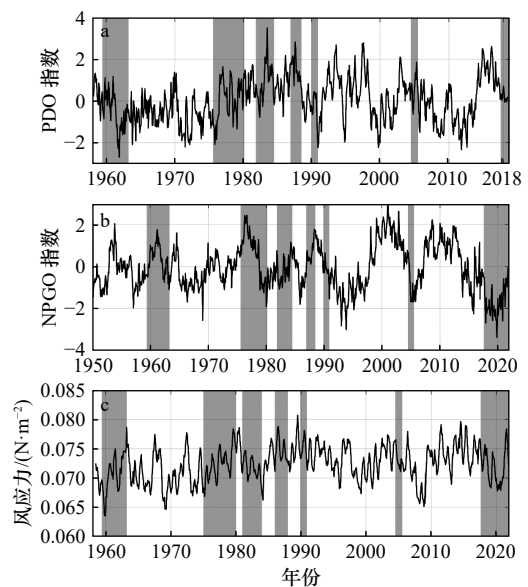


图 10 PDO 指数(a), NPGO 指数(b)和北太平洋风应力(c)时间序列

Fig. 10 PDO index (a), NPGO index (b) and North Pacific wind stress (c) time series

灰色阴影区域表示黑潮大弯曲时期

The gray shaded area represents the period of the Kuroshio Large Meander

表 2 信息流因果分析结果
Table 2 Results of causal analysis of information flow

因果	EKE (STCC)	KT	东传	西传	CURL	SRG	SHEAR	KUI	KE	EKE (KE)	风应力	PDO	NPGO
EKE(STCC)	-	-0.002 1	0	0	0.001 2	-0.025 3	-0.010 3	0.000 1	0.004	-0.000 2	0.070 9	0.017 1	0.002 9
KT	0.009 5	-	0.009 1	0.000 02	0.000 6	0.003 2	0	0.013 4	0.002 3	0.016 0	-0.000 7	0.000 4	0.000 1
东传	0	-0.007 5	-	-0.003 3	0.000 5	0.000 4	0	0.016 8	-0.005 5	0.006 2	0	0	0.000 8
西传	0	0.000 2	0.003 2	-	0	0.000 5	0.000 3	0.001 3	-0.005 2	0.101 0	-0.000 1	-0.000 4	0
CURL	-0.002 3	0.020 8	0.037 6	0.000 2	-	0.042 9	0.003 1	0.035 2	0.015 7	0.024 4	-0.000 1	0.002 7	0.000 4
SRG	0.028 3	0.006 0	0.030 5	0.002 5	0.020 1	-	-0.002 9	0.023 3	0.010 7	-0.000 4	0.009 9	-0.000 4	0.000 9
SHEAR	0.016 2	0	0	0.003 6	0.021 7	0.013 1	-	0.000 3	0.004 1	0.000 3	0.004 6	0.002 0	0.000 5
KUI	0.000 1	-0.007 1	-0.009 2	-0.000 6	0.001 8	0.000 4	0.000 2	-	0.001 1	0	0	0	0.000 1
KE	-0.000 9	0.002 5	0.003 0	0.008 0	0.000 8	-0.002 9	-0.001 1	-0.001 1	-	0.071 4	0.000 1	0.003 7	-0.002 6
EKE(KE)	0.000 9	-0.003 0	-0.000 7	-0.004 7	-0.001 2	0.000 4	-0.000 1	0.000 4	-0.061 7	-	0	0.000 6	-0.002 7
风应力	-0.055	0.000 7	0	0.000 1	0.000 3	0.000 7	0.001	0	0.000 3	0.000 5	-	-0.001 2	0.000 3
PDO	-0.006 6	0	0.000 1	0.003 4	0.002 8	0.001 6	0.000 6	0.000 4	0.003 0	0.005 1	0.001 1	-	0.011 3
NPGO	0.009 7	0.000 9	-0.001 0	0.000 3	-0.000 5	0.000 3	0.000 2	0	0.008 8	0.006 1	0.000 1	0.009 2	-

Note: 黑色加粗(未加粗)表示通过了(未通过)显著性水平为90%的置信度检验,红色表示重点关注结果。

潮延伸体指数(KE)、延伸体区域涡动能[EKE(KE)]、风应力(τ)、PDO和NPGO指数。由于本文只重点关注日本以南黑潮区域,用红色字体将部分结果进行标注,其他部分结果超出了本文的研究范围,后续不再对其进行分析讨论。具体分析结果如下:

基于表2结果,一方面,PDO与风应力存在双向因果关系,这表明PDO对风应力产生影响,并且PDO和风应力信号都单方向对STCC区域的涡动能产生影响,例如在最新两次大弯曲时期,风应力(图10c)与涡动能(图5)在显著增长后都变得较为平稳。其次,STCC区域涡动能对吐噶喇海峡输运量产生单方向的影响,这一结果与Ichikawa^[19]的研究结果一致,其结果同样显示东海黑潮变化受到源自STCC区域变化的外部强迫。同时,STCC区域涡动能与再循环流强度和垂向剪切存在双向的因果关系。然后,输运量和东传信号以及KUI指数之间存在双向因果关系,这表明吐噶喇海峡输运量通过平流东传至日本以南海域并对黑潮路径变化产生影响,输运量在每次大弯曲时期较大(图6),KUI指数在大弯曲时期相应地变小(图7)。最后,KE指数单方向受到垂向剪切、再循环流强度和东传信号的影响,并且KE指数又单方向对KUI指数与东传信号有影响,这也表明黑潮延伸体与日本以南黑潮之间存在双向因果关系,起到互相影响的作用。另一方面,NPGO单方向对黑潮延伸

体的涡动能和KE指数产生影响,从图9也可以看出KE指数与该地区涡动能的变化较为一致,这反映出NPGO信号对KE区域起到调制作用。其次,延伸体区域的涡动能对西传信号和相对涡度有影响,如图9b和图8c所示,在2004-2005年大弯曲之间,涡动能显著增大,而相对涡度显著变小,这表明延伸体区域的涡动能受到NPGO信号的影响后,进一步通过西传到达上游日本以南地区,并对西传信号、相对涡度造成影响,从而对日本以南黑潮路径变化起到调制作用。除此之外,从表3结果可知,日本以南区域的相对涡度变化以及再循环流强度是对黑潮路径变化的响应,而不是影响黑潮路径变化的因素。

为了进一步探究这种联系,结合4.1节相关因素的时间变化,这里选取2003年1月-2005年7月,即本世纪发生的第一次完整大弯曲过程以及前1.5a的时间序列,所有因素均经过正则化处理,结果如图11所示。除此之外,本文还对上述时间序列采用超前相关分析,对相关因素的因果关系进行验证,左边因素超前于右边因素进行计算(如PDO- τ ,即为PDO超前于 τ 计算其相关性),选取最佳超前结果,结果如表3所示,计算得到的相关系数大多在0.8以上,并且都通过了0.01显著性水平检验。这表明各因素之间存在着很好的相关关系,与信息流因果分析所得到的结果结合可以帮助我们验证关于日本以南黑潮路径变

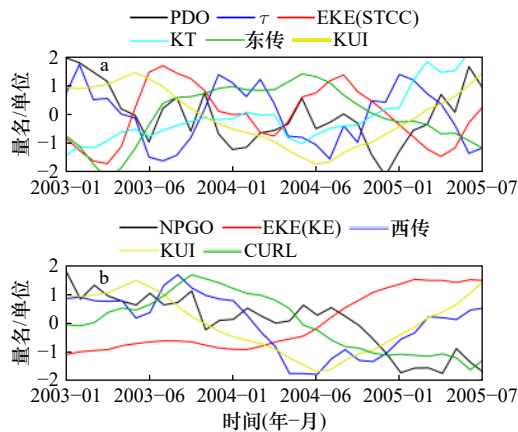


图 11 东传相关因素(a)和西传相关因素(b)时间序列(无量纲)
Fig. 11 Time series of factors related to eastward transmission (a) and westward transmission (b) (dimensionless)

表 3 超前相关分析
Table 3 lead correlation analysis

(a) 东传					
	PDO- τ	τ -EKE	EKE-KT	KT-东传	东传-KUI
相关性	0.71	-0.82	0.76	-0.86	-0.94
超前/月	1	6	4	2	2
(b) 西传					
	NPGO-EKE	EKE-西传	西传-KUI	EKE-CURL	
相关性	-0.63	0.92	0.93	-0.85	
超前/月	2	2	2	2	

化的猜想。

具体来说,一方面,在 2003 年 1 月,风应力受 PDO 信号的调控明显增大,在大约 6 个月后 STCC 区域的涡旋活动也明显增加(超前 6 个月,相关系数为 -0.82),随后涡旋被西边界流携带至吐噶喇海峡,继续向下游传播,使得该区域输运量不断增加(超前 4 个月,相关系数为 0.76),进而对东传信号产生直接影响,东传信号在大弯曲期间数值不断减小,最终影响日本以南海域的黑潮路径变化,KUI 指数在大弯曲发生前达到最低,随着大弯曲的持续不断增大。另一方面,NPGO 信号作为风应力变化引起的海平面异常西向传播^[30],对黑潮延伸体的涡旋产生影响,并使该区域的涡动能持续增高(超前 2 个月,相关系数为 -0.63)。同时涡旋的变化对西传信号也造成影响,西传信号在大弯曲发生前数值不断增大,大弯曲发生期间数值逐渐减小,最终影响了日本以南黑潮的路径变化。具体表现为,KUI 指数在大弯曲发生前达到最低,同时日本以南区域的相对涡度在大弯曲时期持续减小。

5 总结与讨论

本文基于 50a(1958–2007 年)中国海洋再分析数据集(CORA)和 14a(2008–2021 年)卫星高度计资料提取的黑潮路径时间序列,利用复经验正交函数分析方法对其进行时空特征分析。结果表明,经 CEOF 分析后的前两个主模态能够描述日本以南黑潮路径主要时空变化特征,且这两个模态分别表示引起黑潮路径变化的东传与西传信号。

为了进一步探究上游和下游对日本以南黑潮路径的具体影响以及它们之间的动态联系,本文分别计算了北太平洋风应力,吐噶喇海峡的输运量,副热带逆流、日本以南海域和黑潮延伸体海域的涡动能、垂向剪切、相对涡度和再循环流强度等多种具有代表性的时间序列,同时下载了代表日本以南黑潮大弯曲的 KUI 指数、黑潮延伸体的 KE 指数以及对日本以南黑潮路径起到影响作用的气候信号(PDO 指数和 NPGO 指数)。通过信息流方法对不同区域的时间序列进行因果分析,结果表明:如图 12 所示,图中所有结果均通过 90% 显著检验,其中,黑色粗实线表示由 PDO(NPGO)到日本以南黑潮路径的因果关系链,蓝色细实线表示存在双向因果的反向因果关系链,蓝色虚线表示存在因果关系但仍需进一步验证的过程。具体来说,日本以南黑潮路径变化是受到其上游和下游共同作用的结果:一方面,PDO 通过风应力的变化影响副热带逆流区域的涡旋活动,从而影响吐噶喇海峡的黑潮输运变化,进而对东传信号产生直接影响,最终影响日本以南黑潮路径变化(图中黑色实线);另一方面,黑潮延伸体的涡旋运动受到 NPGO 信号的影响,从而影响该区域的中尺度涡旋向西移动,进而对西传信号产生直接影响,最终影响日本以南黑潮路径变化。分析结果还表明,部分区域存在双向因果关系,如日本以南黑潮区域与其上游副热带逆流区及其下游延伸体区,都存在互相影响的反向因果关系(图中蓝色实线)。此外,PDO 对 STCC 区域的涡动能有单方向影响,这表明 PDO 不仅通过风应力间接影响涡旋活动,也可能通过海温等其他因素对其造成影响。与其相类似的影响还包括 PDO 对黑潮延伸体和日本以南黑潮区域等影响(图中蓝色虚线),这些影响的具体原因还需进一步地探究。

综上所述,本文基于 CEOF 和信息流分析获取了一些结果,包括 CEOF 分析主模态对黑潮路径变化的描述,以及对路径变化因素的分析讨论。本文重点关注

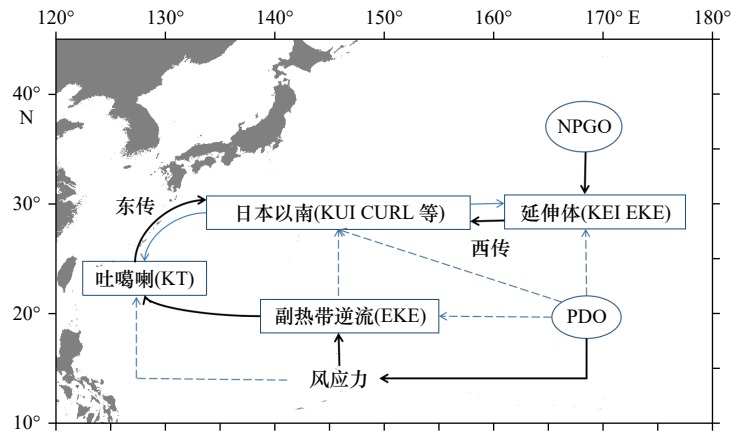


图 12 日本以南黑潮路径因果关系导向

Fig. 12 Causal relationship of the Kuroshio path south of Japan

所有结果均通过 90% 显著检验。黑色粗实线表示由 PDO(NPGO)到日本以南黑潮路径的因果关系链,蓝色细实线表示存在双向因果的反向因果关系链,蓝色虚线表示存在因果关系但仍需进一步验证的过程

All results passed the 90% significance test. The thick black lines indicate the causal chains from PDO (NPGO) to the path of the Kuroshio south of Japan, the blue thin solid lines indicate reverse causality chains with two-way causation and the blue dashed lines indicate the process where causality exists but requires further verification

信息流的因果分析结果,但是这些结果只是采用统计分析方法获取的,仅采用信息流因果分析的方法来判断各种因素对日本以南黑潮路径的影响。尽管本文基于分析结果对于其背后形成机制做出一些系统解释和推断,但是这些机制的动力过程可能需要进一步地验证,对于部分信息流结果也需要进一步探究,进

而更好地揭露黑潮的形成过程。未来可以在信息流方法的基础上,结合模式模拟的动力过程分情况讨论不同路径状态下各变量对黑潮的影响,同时结合模式结果对大弯曲形成的物理过程做更充分得解释。此外,利用信息流方法得到的相关因素还可以作为日本以南黑潮路径的预测因子,对黑潮路径展开预报研究。

参考文献:

- [1] Takeyoshi Nagai, Hiroaki Saito, Koji Suzuki, et al. Kuroshio Current Physical, Biogeochemical, And Ecosystem Dynamics [M]. American Geophysical Union, Geophysical Monograph 243, 2019.
- [2] Kawabe M. Sea level variations at the Izu Islands and typical stable paths of the Kuroshio[J]. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 1985, 41(5): 307–326.
- [3] Wu X, Zhao Y, Han G, et al. Temporal-spatial oceanic variation in relation with the three typical Kuroshio paths south of Japan[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2022, 41: 15–25.
- [4] 于振娟. 东海黑潮流轴的变化及日本以南黑潮大弯曲同青岛降水量的关系 [J]. *海洋科学*, 1988, 12(4): 6–11.
Yu Zhenjuan. Relationship of variation of axial position of the Kuroshio in the East China Sea and its meanders south of Japan with the precipitation in Qingdao[J]. *Marine Sciences*, 1988, 12(4): 6–11.
- [5] Xu H, Tokinaga H, Xie S. Atmospheric effects of the Kuroshio large meander during 2004–05[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(17): 4704–4715.
- [6] 崔雪森, 伍玉梅, 唐峰华, 等. 日本以南黑潮流量对西北太平洋柔鱼渔场重心影响的滞后性分析 [J]. *大连海洋大学学报*, 2017, 32(01): 99–104.
Cui Xuesen, Wu Yumei, Tang Fenghua, et al. Effect of Kuroshio transport off southern Japan on fishing ground gravity of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in northwest Pacific Ocean based on time lag analysis [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2017, 32(01): 99–104.
- [7] Lizarbe Barreto, Daniel Andres, Chevarria Saravia, et al. Phytoplankton increase along the Kuroshio due to the large meander [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021.
- [8] Hasumi H, Tatebe H, Kawasaki T, et al. Progress of North Pacific modeling over the past decade[J]. *Deep-Sea Research II*, 2010, 57: 1188–1200.
- [9] Usui N, Wakamatsu T, Tanaka Y, et al. Four-dimensional variational ocean reanalysis: a 30-year high-resolution dataset in the western North Pacific (FORA-WNP30)[J]. *Journal of Oceanography*, 2017, 73: 205–233.
- [10] Chao S. Bimodality of the Kuroshio[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1984, 14: 92–103.
- [11] Yoon J, Yasuda I. Dynamics of the Kuroshio large meander: Two-layer model[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1987, 17: 66–81.

- [12] Kazunori Akitomo, Masao Kurogi. Path transition of the Kuroshio due to mesoscale eddies: A two-layer, wind-driven experiment[J]. *Journal of Oceanography*, 2001, 57: 735–741.
- [13] Qiu B, Chen S. Revisit of the Occurrence of the Kuroshio large meander south of Japan[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2021, 51: 3679–3694.
- [14] Kobashi F, Hanawa K. Hydrographic features off the southeast coast of Kyushu during the Kuroshio small meanders: A case study for small meanders that occurred in 1994 and 1995 spring[J]. *Journal of Oceanography*, 2004, 60: 645–661.
- [15] Miyazawa Y, Kagimoto T, Guo X, et al. The Kuroshio large meander formation in 2004 analyzed by an eddy-resolving ocean forecast system[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: C10015.
- [16] Usui N, Tsujino H, Nakano H, et al. Long-term variability of the Kuroshio path south of Japan[J]. *Journal of Oceanography*, 2013, 69: 647–670.
- [17] Ebuchi N, Hanawa K. Trajectory of mesoscale eddies in the Kuroshio recirculation region[J]. *Journal of Oceanography*, 2001, 57: 471–480.
- [18] Mitsudera H, Waseda T. Anticyclonic eddies and Kuroshio meander formation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28: 2025–2028.
- [19] Ichikawa K. Variation of the Kuroshio in the Tokara strait induced by mesoscale eddies[J]. *Journal of Oceanography*, 2001, 57: 55–68.
- [20] Usui N, Tsujino H, Nakano H, et al. Formation process of the Kuroshio large meander in 2004[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: C08047.
- [21] Qiu B, Chen S. Variability of the Kuroshio extension jet, recirculation gyre, and mesoscale eddies on decadal time scales[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2005, 35(11): 2090–2103.
- [22] Sugimoto S, Hanawa K. Relationship between the path of the Kuroshio in the south of Japan and the path of the Kuroshio extension in the east[J]. *Journal of Oceanography*, 2012, 68: 219–225.
- [23] 吴友婷, 杨洋, 梁湘三. 基于自组织映射的日本南部黑潮与黑潮延伸体的典型时空模态及其因果关系研究 [J]. *海洋学报*, 2022, 44(09): 38–54.
Wu Youting, Yang Yang, Liang Xiangsan. Typical spatiotemporal patterns of the Kuroshio south of Japan and the Kuroshio extension using self organizing maps and their causal relationship[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(09): 38–54.
- [24] Ebuchi N, Hanawa K. Influence of mesoscale eddies on variations of the Kuroshio path south of Japan[J]. *Journal of Oceanography*, 2003, 59: 25–36.
- [25] Miyazawa Y, Guo X, Yamagata T. Roles of mesoscale eddies in the Kuroshio paths[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 34: 2203–2222.
- [26] Qiu B, Chen S, Oka E. Why Did the 2017 Kuroshio large meander event become the longest in the past 70 years? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2023.
- [27] Di Lorenzo E, Schneider N, Cobb K, et al. North Pacific gyre oscillation links ocean climate and ecosystem change[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L08607.
- [28] Ceballos L, Di Lorenzo E, Hoyos C, et al. North Pacific gyre oscillation synchronizes climate fluctuations in the eastern and western boundary systems[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22: 5163–5174.
- [29] Yang Y, Liang X, Qiu B, et al. On the decadal variability of the eddy kinetic energy in the Kuroshio extension[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47: 1169–1187.
- [30] Wang Q, Tang Y. The interannual variability of eddy kinetic energy in the Kuroshio large meander region and its relationship to the Kuroshio latitudinal position at 140°E [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(2).
- [31] Douglass E, Jayne S, Bryan F, et al. Kuroshio pathways in a climatologically forced model[J]. *Journal of Oceanography*, 2012, 68: 625–639.
- [32] Sekine Y, Fujita K. Why does the sea level difference between Kushimoto and Uragsami show periods of large meander and non-large meander paths of the Kuroshio south of Japan?[J]. *Journal of Oceanography*, 1999, 55(1/2): 43–51.
- [33] Han G, Li W, Zhang X, et al. A new version of regional ocean reanalysis for coastal waters of China and adjacent seas[J]. *Advances in Atmospheric Science*, 2013(4): 974–982.
- [34] 武晓博. 日本以南黑潮路径分析与预测研究 [D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [35] Hurlburt H, Rhodes R, Barron C, et al. A feasibility demonstration of ocean model eddy-resolving nowcast/forecast skill using satellite altimeter data [C]. Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, Hancock, 2000.
- [36] Xu W, Ren H. A CEOF-based method for measuring amplitude and phase properties of the QBO [J]. *Climate Dynamics* 2023, 61, 923–937.
- [37] Wu X, Han G, Li W, et al. A hybrid deep learning model for predicting the Kuroshio path south of Japan[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1112336.
- [38] Liang X. Unraveling the cause-effect relation between time series[J]. *Physical Review E*, 2014, 90(5): 052150.
- [39] Liang X. Information flow and causality as rigorous notions ab initio[J]. *Physical Review E*, 2016, 94(5): 052201.
- [40] Stips A. On the causal structure between CO₂ and global temperature[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21691.
- [41] 邓思捷, 谢玲玲, 朱振坤, 等. 吕宋冷涡的年际变化及影响机制分析 [J]. *海洋科学进展*, 2022, 40(01): 13–26.
Deng Sijie, Xie Lingling, Zhu Zhenkun, et al. Interannual variation of the Luzon cold eddy and its mechanism[J]. *Advances in Marine*

- Science, 2022, 40(01): 13–26.
- [42] 宫湛秋, 孙诚, 李建平, 等. 基于信息流理论的因果分析在辨析大西洋多年代际振荡物理机制中的应用 [J]. 大气科学, 2019, 43(5): 1081–1094.
Gong Zhanqiu, Sun Cheng, Li Jianping, et al. The application of causality analysis based on the theory of information flow in distinguishing the Atlantic multi-decadal oscillation driving mechanism[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(5): 1081–1094.
- [43] North G, Bell T, Cahalan R, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(7): 699–706.
- [44] Kawabe M. Variations of current path, velocity, and volume transport of the Kuroshio in relation with the large meander[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1995, 25: 3103–3117.
- [45] Moriyasu S. On the difference in the monthly sea level between Kushimoto and Uragami, Japan[J]. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 1961, 17: 197–200.
- [46] Qiu B, Chen S, Schneider N, et al. A coupled decadal prediction of the dynamic state of the Kuroshio extension system[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(4): 1751–1764.

Spatiotemporal variation characteristics and causal relationship of the Kuroshio path south of Japan based on complex empirical orthogonal functions

Ji Zenghua^{1,3}, Wu Xiaobo², Li Wei¹, Cao Lige¹, Zhang Mengmeng¹, Dong Wanqiu¹, Han Guijun¹

(1. Tianjin Key Laboratory for Marine Environmental Research and Service, School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. National Marine Environment Forecasting Center, Beijing 100081, China; 3. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

Abstract: The analysis of the changes in the path of the Kuroshio south of Japan has always been a hot topic. Previous studies have pointed out that the changes in the Kuroshio path south of Japan are influenced by various factors, such as upstream transport, mesoscale eddies, climate signals etc. However, the causal relationship between these influencing factors is not fully understood. The paper first obtains the time series of the Kuroshio path south of Japan based on the 50 year (1958–2007) China Ocean Reanalysis dataset (CORA) and 14 year (2008–2021) satellite altimeter data, and uses the Complex Empirical Orthogonal Function (CEOF) analysis method to analyze its spatiotemporal characteristics. The results show that the first two main modes obtained by CEOF analysis can describe the main characteristics of the space-time variation of the Kuroshio path in the south of Japan and represent the related eastward and westward signals, respectively. Furthermore, the causal analysis results based on information flow theory indicate that: on the one hand, PDO affects the eddy kinetic energy in the subtropical countercurrent (STCC) region through changes in wind stress, thus affecting the changes of Kuroshio transport in the Tokara Strait, and then has a direct impact on the eastward signal, and finally affects the changes of the Kuroshio path in the southern region of Japan. On the other hand, the eddy kinetic energy of the Kuroshio extension is influenced by the NPGO signal, which affects the westward movement of the mesoscale eddies in the region, thereby directly affecting the westward signal and ultimately affecting the Kuroshio path changes in the region south of Japan. In addition, the experimental results also indicate that the relative vorticity and recirculation gyre strength in the southern region of Japan are responses to the changes in the Kuroshio path, rather than factors affecting the changes in the Kuroshio path.

Key words: Kuroshio path south of Japan; CEOF; causality analysis; information flow