

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(9): 38–54, doi:10.12284/hyxb2022069

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(9): 38–54, doi:10.12284/hyxb2022069

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

吴友婷^{1,2}, 杨洋^{3*}, 梁湘三^{4,5}

(1. 自然资源部第一海洋研究所 海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061; 2. 南京信息工程大学 海洋科学学院, 江苏 南京 210044; 3. 厦门大学 海洋与地球学院, 福建 厦门 361102; 4. 复旦大学 大气与海洋科学系, 上海 200438; 5. 复旦大学 IRDR 极端天气气候与健康风险互联和治理国际卓越中心, 上海 200438; 6. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000)

摘要: 过去的研究认为, 黑潮延伸体的年代际振荡受来自其下游的太平洋年代际振荡 (PDO) 相关联的信号主导, 但最近的观测表明这种调控机制在 2017 年 9 月之后不再成立。与此同时, 黑潮延伸体的上游即日本南部黑潮正在发生一次大弯曲事件。利用 26 年 (1993–2018 年) 的卫星高度计提供的海表高度距平数据和自组织映射 (SOM) 方法, 本文研究了日本南部黑潮与黑潮延伸体的时空模态及其因果关系。结果表明, SOM 能有效地提取两个海区典型空间模态, 且它们的演变轨迹表明当日本南部黑潮处于大弯曲 (离岸型非大弯曲) 路径时, 黑潮延伸体趋于稳定 (不稳定) 态。基于 SOM 识别得到的海表面高度距平 (SLA) 特征区及特征时间模态, 我们进一步利用一种最近发展的定量因果分析方法研究了两个流系之间的因果关系。研究发现, 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。前者对后者的影响集中在纪伊半岛东南侧及黑潮延伸体“两脊一槽”区域, 而后者对前者的影响则集中在黑潮延伸体“两脊一槽”区域及黑潮再循环流区域。这说明黑潮大弯曲的发展对黑潮延伸体的稳定性有重要作用, 同时黑潮延伸体通过调制南部再循环流影响日本南部黑潮的路径。不同的是, 当离岸型非大弯曲路径发生时, 只有从日本南部黑潮向黑潮延伸体的单向因果关系, 且因果性主要集中在伊豆海脊及再循环流区域。这与该时期海表高度负异常沿日本南岸不断向位于下游的黑潮延伸体再循环流的传播有关, 它使得黑潮延伸体变得不稳定。

关键词: 黑潮大弯曲; 黑潮延伸体; 自组织映射; 因果分析; 信息流

中图分类号: P731.27

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)09-0038-17

1 引言

北赤道流于菲律宾群岛偏转北上, 成为一支以深水色、窄流幅、大流量、高流速、高透明度为特点的西边界流, 这就是黑潮。作为西太平洋一支重要的暖

流, 黑潮的流态在不同海域都具有独特的分布特征, 本文所关注的日本南部黑潮与黑潮延伸体 (Kuroshio Extension, KE) 是黑潮主流轴通过吐噶喇海峡流出东海后的分支 (图 1), 其中日本南部黑潮是黑潮位于吐噶喇海峡 (130°E) 与伊豆海脊 (140°E) 之间的部分, 因

收稿日期: 2021-10-12; 修订日期: 2022-01-25。

基金项目: 国家自然科学基金 (41806023, 41975064); 2015 江苏双创团队项目; 上海市“科技创新行动计划”国际科技合作伙伴项目 (21230780200)。

作者简介: 吴友婷 (1999—), 女, 浙江省湖州市人, 主要从事近海海洋模式的研究。E-mail: wuyt@fio.org.cn

* 通信作者: 杨洋, 男, 博士, 主要从事海洋多尺度动力学研究。E-mail: yangyangoccano@gmail.com

其独特的大弯曲(Large Meander, LM)路径得到广泛关注。当黑潮处于LM路径时,其流轴在 $136^{\circ}\sim 139^{\circ}\text{E}$ 区间内远离日本海岸,呈现出明显的气旋性弯曲;在伊豆海脊处,黑潮经 34°N 附近三宅岛以北的深海峡流出^[1]。当LM未发生时,黑潮路径往往表现为相对平直的非大弯曲(Non-Large Meander, NLM)路径,此时黑潮贴近纪伊半岛西南部流动。根据NLM路径在伊豆海脊的实际流出通道,Kawabe^[2]将NLM路径进一步细分为从八丈岛以南 33°N 浅水区流出的离岸的非大弯曲(offshore Non-Large Meander, oNLM)路径以

及从三宅岛以北深海峡通道流出的近岸的非大弯曲(nearshore Non-Large Meander, nNLM)路径。自此,日本南部黑潮的3大典型路径得到了明确定义(图1b),此后学者们基本沿用这一分类方式^[1,3-4]。LM路径的出现具有很大的随机性,至今难以预测。以往研究表明,斜压不稳定是LM路径形成的主要机制^[5],且九州岛东南诱导弯曲的形成是导致LM事件发生的一个重要的前提条件^[1],这一负海面高度距平(Sea Level Anomaly, SLA)在东传过程中因斜压不稳定加强,最终引发LM路径^[4,6]。

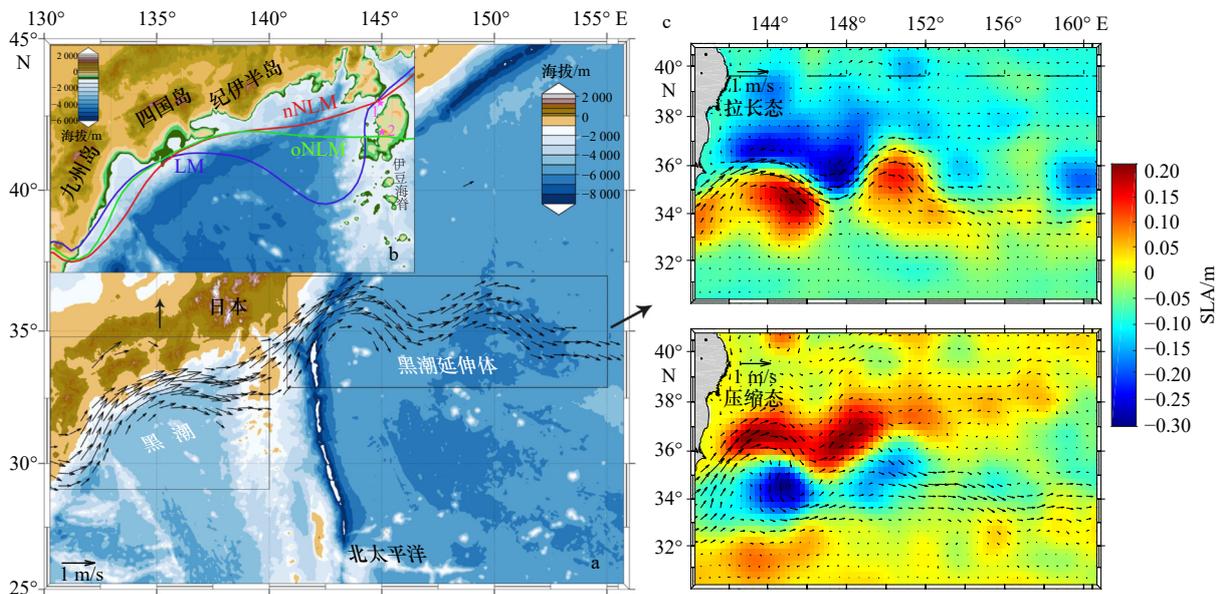


图1 基于ETOPO1数据集的研究区域地形及平均流速大于 0.25 m/s 的流矢量场

Fig. 1 Bathymetry of our research domain and the time-mean current vector field, only speed exceeding 0.25 m/s

- a. 用于表示黑潮1993–2018年的平均路径;b. 日本南部黑潮的3种典型路径(LM、oNLM、nNLM); c. 黑潮延伸体在拉长态与压缩态两种路径下的海面高度距平(SLA)场和流矢量场。海域内地理位置标注为: 1. 三宅岛; 2. 八丈岛
- a. Which indicates the mean path of the Kuroshio during 1993–2018 is shown; b. three typical paths of the Kuroshio south of Japan (i.e., the LM, oNLM and nNLM path); c. the composited sea level anomaly (SLA) field and current vector field in the Kuroshio extension's elongated mode and contracted mode. The numbered geographic positions are: 1. Miyake-jima; 2. Hachijo-jima

黑潮延伸体是日本南部黑潮越过伊豆海脊向东进入北太平洋海域的延续体。由于脱离了陆地的约束,KE在强劲的再循环流作用下成为一支纬向急流,其平均流态表现为“两脊一槽”的蛇曲分布。KE海域是海洋大尺度和中尺度变异最强的区域,也是热带地区以外太平洋海气相互作用最活跃的地带,因而该海域的海洋变率具有显著的多尺度相互作用特征^[7-9]。过去一系列研究发现KE路径存在拉长与压缩两种大尺度结构变化,这两种结构实际对应KE路径的稳定与不稳定两种状态(图1c)^[10-11]。当KE处于拉长态时,其流形较为稳定,在形态上贴近多年平均的“两脊一槽”结构,此时KE流轴长度较短、东向流量、南部

再循环流及涡动能水平较弱,这些特征引起KE流轴的相对北移。相反,在压缩态下,KE表现得不稳定,此时流轴长度较长,东向流量、南部再循环流及涡动能水平较强,流轴位置相对南移。Qiu等^[12]提出KE流态的稳定程度可以通过 $31^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$ 区域的SLA区域平均值作为指数来衡量: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),这为评估KE的稳定性提供了一种简便的计算方法(图2b)。

KE路径在稳定态与不稳定态之间的转换存在年代际周期振荡,这一振荡在过去的几十年间都与太平洋年代际涛动(Pacific Decadal Oscillation, PDO)的变

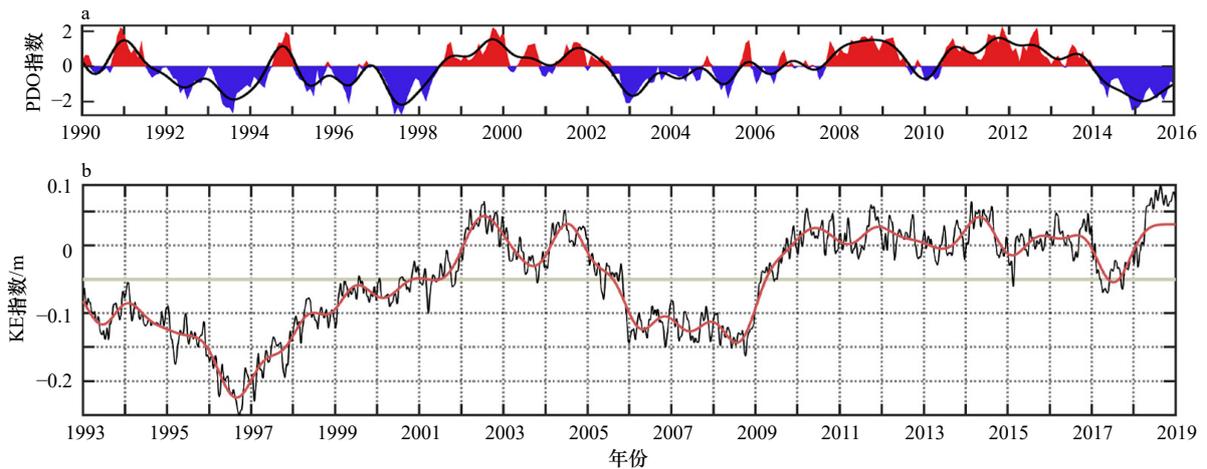


图2 负太平洋年代际涛动(PDO)指数的时间序列(a)和间隔3 d的基于海表面高度距平(SLA)数据在 $31^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$ 范围内空间平均的黑潮延伸体(KE)指数(b)

Fig. 2 Time series of the negative Pacific decadal oscillation (PDO) index (a) and Kuroshio extension (KE) index based on the area-mean ($31^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$) of the 3-day interval sea level anomaly (SLA) data (b)

化周期基本一致,两者具有显著的滞后负相关(图2),滞后时间约为3年。研究表明,这种关联是罗斯贝波西传SLA信号的结果^[8,13],因而学者们通常认为KE路径的年代际迁移处于PDO的控制之下。但是,2017年KE路径的异常变化对这一观点产生了冲击。在2014年正PDO信号的影响下,KE路径向不稳定态迁移,但2017年后半年,KE突然扭转趋势返回并维持在了稳定态。这一异常现象后被认为与2017年8月开始的上游黑潮的强LM路径有关^[1],也提醒我们日本南部黑潮也能够引起KE路径的变异。然而,过去仅有极少数学者提出KE路径的稳定性与其上游路径存在关联^[1,3]。Sugimoto和Hanawa^[3]根据卫星高度计资料的统计发现,当日本南部黑潮处于LM路径时,下游KE的路径较稳定;反之当日本南部黑潮处于oNLM路径时,下游KE趋向于不稳定。这项研究首次从统计角度指出了上游黑潮流态对下游KE可能存在的影响,但这种统计关系是否反映了两者之间存在因果关系?若存在因果关系,是单向的还是双向的?强度如何?关键作用区又是在哪?这些问题还需进一步研究。

考虑到日本南部黑潮及黑潮延伸体的多尺度性和强非线性,本文将采用一种新型的特征提取手段——自组织映射(Self-Organizing Map, SOM)方法,对这两个海域进行流态的特征提取与聚类分析,这一人工神经网络方法已被用于墨西哥湾环状流变异、吕宋海峡黑潮入侵、佛罗里达西大陆架海流等海洋学相关研究^[14-17],并且在降雨分型、光伏发电预报的云量分类等气象领域^[18-21]也有突出的表现。SOM被证明在处理容量大、复杂性高的卫星海洋数据集时,

尤其是针对充斥着复杂非线性过程的海域时具有优势^[22-23]。由于SOM分析具有较强的特征识别能力,近年来它成为海域要素场聚类分析的新兴工具,但尚未被用于日本南部黑潮的相关研究,并且本文创新性地将SOM分析与因果分析法相结合,探究两个海域的流态相关性。

2 数据和方法

2.1 数据

本文所使用的是来自AVISO数据中心(<http://www.avis0.altimetry.fr/en/home.html>)的1993–2018年的卫星高度计观测海表面高度(SSH)数据,这一数据集合并了包括Jason-3、Sentinel-3A、HY-2A、Sara1/AltiKa、Cryosat-2、Jason-2、Jason-1、T/P、ENVISAT、GFO、ERS1/2卫星在内的高度计观测结果。该产品的网格分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为1 d,本文所选取的日本南部黑潮的地理范围为 $29^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$,KE的地理范围为 $32^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\sim 152^{\circ}\text{E}$,为了减小数据的容量但又尽可能地保留真实流态变化,SSH数据的取样间隔为3 d。由于季节变化不是本文的研究重点,我们首先对SSH数据集进行了消除季节循环的处理。同时,考虑到卫星高度计观测数据在浅水区域的准确度欠缺^[16],水深浅于100 m的SSH数据已经在训练前被移除。此外,我们将SSH数据集去除多年平均(1993–2018年),将得到的海表面高度距平(SLA)数据输入SOM进行训练。

2.2 SOM方法

SOM是一种无监督的神经网络模型,它能够通过模拟人类大脑皮层的信息处理方法实现对输入数

据的自主学习和分类,进行优势模态的聚类分析。对于 SOM 网络结构的简述请见附录。对 SLA 数据做 SOM 训练时,本文采用了两种不同的方式。第一种方式将空间序列作为输入样本,得到 SOM 空间模态,后一种时间序列作为输入样本,得到 SOM 时间模态。关于 SOM 方法的详细介绍及其在海洋流态特征识别的应用,可以参考 Liu 等^[23]、Liu 和 Weisberg^[14]、Liu 等^[16]的研究。下面简单介绍本文进行 SOM 训练的步骤:

(1)如图 3a 所示,将 $SLA(x, y, t)$ 三维数据重构得到矩阵 X_{mn} 。其中, m 为数据集的时间长度, n 为海域内网格点的个数(即 x 和 y 方向格点数之积),空间样本 $X_i(i=1, \dots, m)$ 逐个进入 SOM 输入层训练。考虑到黑潮海域存在着复杂的多尺度变率,本文设置优势模态个数为 3×3 ,因而最终得到 SLA 在 26 a 间的 9 个最典型的空间模态。通过计算每个时间步上的 SLA 分布与这 9 个空间模态的欧氏距离,可以得到一条最佳匹配单元(Best Matching Unit, BMU)序列,用来表征不同时间步的 SLA 与哪一个典型空间模态最接近。

(2)将 SLA 数据矩阵重构后得到 X_{nm} ,其中, n 为海域内网格点个数, m 为时间长度,时间样本 $X_j(j=1, \dots, n)$ 逐个进入 SOM 输入层训练(图 3b)。在设置模态个数时,我们经过对比发现 6 个模态足以提取出海域内 SSH 变化最典型的区域,因而设置这一组的优势模态为 2×3 ,训练过程中具有相似 SLA 变率的网格点会被归为同一个模态,最终得到 SLA 的 6 个最典型的时间模态以及 BMU 序列。BMU 序列给出了每个网格点最接近的时间模态,由此根据 SLA 的时间序列分布特征,具有相同 BMU 的网格点属于同一个 SLA 变化特征区。

2.3 基于信息流理论的定量因果推断

信息流理论为衡量两个事件之因果关系的大小和方向提供了理论基础^[24],Liang^[24]对此进行了严格的证明,得到了两个动力过程之间的信息流的解析式(见附录),并通过最大似然估计将其转化为易于使用的公式^[25]。具体来说,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 信息流速率的最大似然估计可由下式计算:

$$T_{2 \rightarrow 1} = \frac{C_{11}C_{12}C_{2,d_1} - C_{12}^2C_{1,d_1}}{C_{11}^2C_{22} - C_{11}C_{12}^2}, \quad (1)$$

式中, C_{ij} 为 X_i 和 X_j 的协方差; C_{i,d_j} 为 X_i 和另一条导出序列 $\frac{X_{j,m+1} - X_{j,m}}{\Delta t}$ 的协方差, Δt 为时间步长。附录中式(A3)给出了计算两个时间序列之间因果关系的快捷算法。这一方法已经被运用于分析海洋与大气相关的

因果性实际问题,如厄尔尼诺和印度洋偶极子之间的关系、二氧化碳排放对全球变暖的贡献、北极平均地表温度异常和潜在的影响因素等等^[25-27]。更多细节可参见附录。

3 SOM 空间模态

在这一节中,我们对日本南部黑潮和 KE 区域 SLA 的典型空间模态展开分析。由于日本南部黑潮 SLA 的变率相比于 KE 区域 SLA 的变率较弱,如果将这两个区域作为一个大区域进行 SOM 训练,得到的结果只能反映 KE 区域的主要流型。因此,本文对这两个区域的数据分别进行 SOM 训练,得到了各自的 9 组 SLA 空间分布优势模态和 BMU 时间序列(图 4 至图 6)。由于在 SOM 的训练过程中特征相似(不相似)的模态会相互靠近(远离),因而空间分布的结果中被认为相似的模态紧挨,相异的远离,对角线两端的模态往往特征相反。本节的最后我们将用简单的统计方法,初步探究 SOM 所揭示的两块海域 SLA 变率之间的联系。

3.1 日本南部黑潮海域

对日本南部海域的 SLA 数据进行 SOM 训练,得到 9 组特征空间模态(MP1-MP9,图 4a)。根据前人的研究,日本南部黑潮的流轴主要具有 3 种路径——大弯曲(LM)路径、离岸的非大弯曲(oNLM)路径以及近岸的非大弯曲(nNLM)路径,这 3 种路径往往通过流轴在 138°E 纪伊半岛南部和 140°E 伊豆海脊的位置进行区分^[4]。依据这种判别标准,我们对以上 9 组模态进行分类。从 MP7 模态可见, $135^\circ \sim 139^\circ\text{E}$ 范围内有一强盛的负值中心,该区域黑潮流轴具有非常明显的气旋性大弯曲。与之相对的是大弯曲西南部的 SLA 正异常,这一强劲的再循环流使黑潮流量得到加强,同时通过挤压 SLA 负信号维持了流轴的大弯曲形态。在伊豆海脊处由于反气旋的作用,黑潮流轴穿过深且窄的北部海峡通道流入北太平洋。以上流态特征都符合 LM 路径的标准,因而 MP7 代表了 LM 路径。相比来看,虽然 MP1 和 MP4 也具有大弯曲路径,但是这两个模态下流轴气旋性弯曲程度较小,西南侧的再循环流也较弱,且流轴在伊豆海脊处相对南移,因而我们将这两个模态称为不成熟的 LM 路径。结合 BMU 序列(图 5c),可见这两个模态时常在成熟 LM 路径(MP7)前后出现。在其余的模态中,黑潮路径在 138°E 纪伊半岛南部没有发生大弯曲,因而属于 NLM 或其他路径。其中,MP2 和 MP3 中黑潮流轴在伊豆海脊处远离海岸呈气旋式弯曲,符合 oNLM 路径的特征;而 MP6 和 MP9 则在此贴

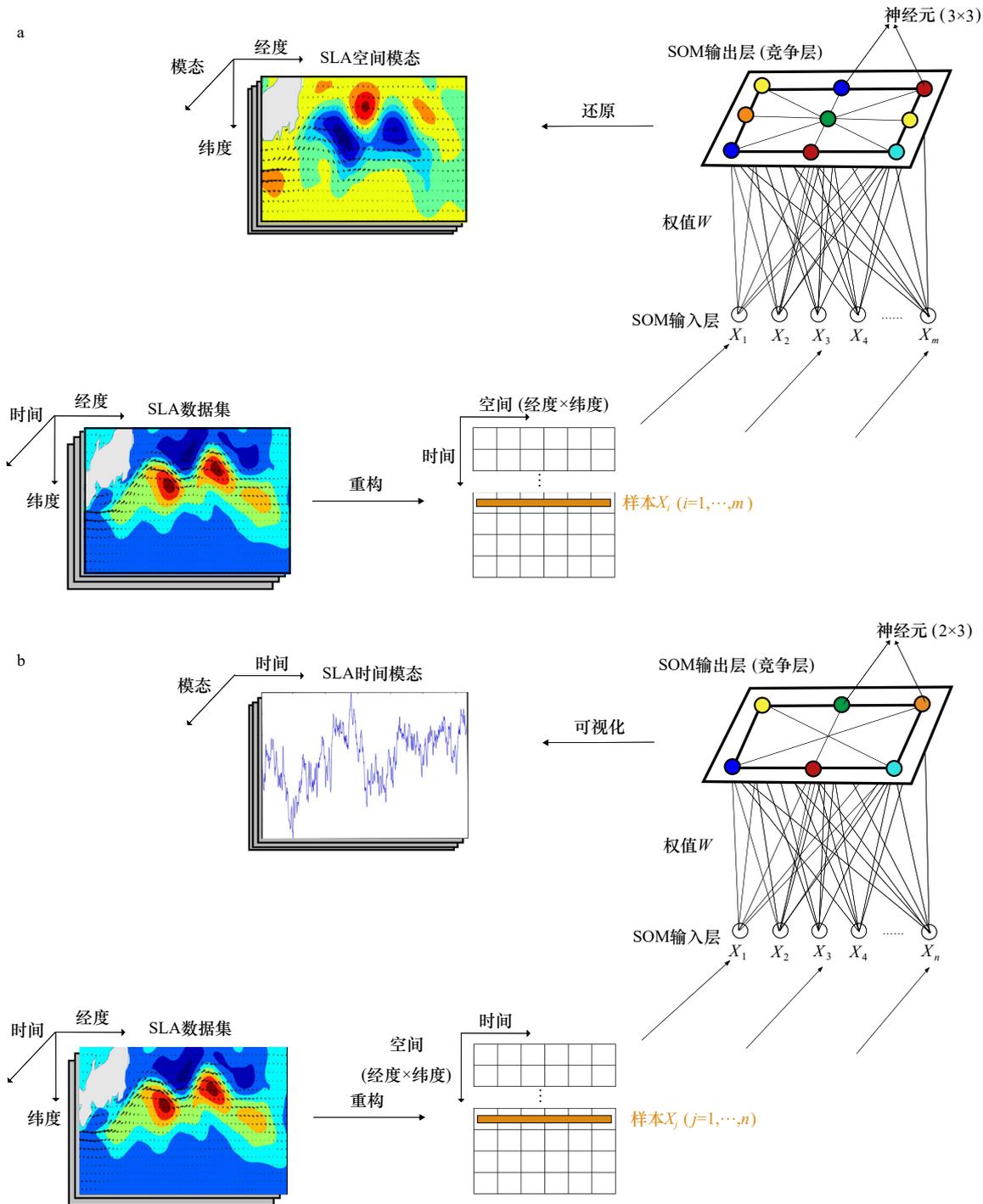


图3 用于提取空间模态(3×3, a)和时间模态(2×3, b)的自组织映射(SOM)训练流程示意图

Fig. 3 Schematic of the (3×3) self-organizing map (SOM) for the spatial pattern extraction (a), and the temporal pattern extraction (b)

a 和 b 的样本数据为海表面高度距平(SLA)的空间序列和时间序列

The sample vectors are the sea level anomaly (SLA) spatial series and temporal series in a and b respectively

近海岸平直流动,属于 nNLM 路径。同样,考虑到 MP3 和 MP9 的发展更加成熟,本文认为它们分别代表成熟的 oNLM 路径和 nNLM 路径。比较这 3 个成熟路径在所有模态间的出现频率,我们发现在 1993–2018 年期间, NLM 路径的发生频率远高于 LM 路径,其中 nNLM (MP9) 路径达到 22%,而

LM (MP7) 路径仅有 9%。剩余的两个模态 MP5 和 MP8 不符合 3 种经典路径的标准,是黑潮典型路径转变过程中常出现的两种过渡态。其中 MP8 捕捉到了诱导弯曲的东传,这一小弯曲在 MP9 中的九州南部已经初具雏形,如果在往下游传播途中它的强度不减反增,则可能成为大弯曲路径的诱因。

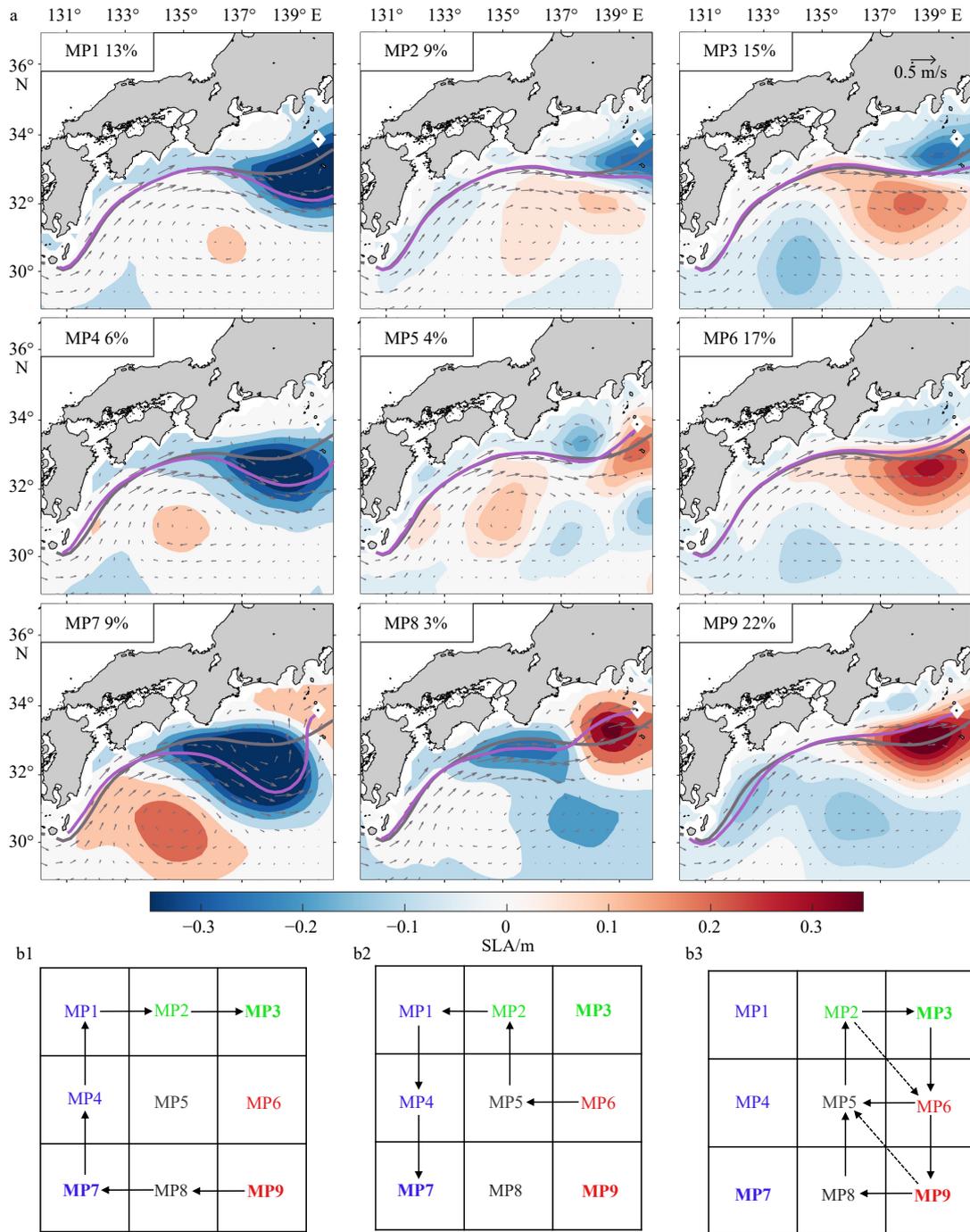


图 4 基于 3 d 间隔的海表面高度距平 (SLA) 数据的 (3×3) 自组织映射分析提取的 9 组特征模式 (MP1–MP9) (a) 和最佳匹配单元移动轨迹 (b)

Fig. 4 Nine spatial patterns (MP1–MP9) extracted from the 3-day interval sea level anomaly (SLA) data south of Japan through the (3×3) self-organizing map analysis (a) and trajectory of the best matching unit (b)

a 中各模式的出现频率以百分数的形式标注在左上角, 黑潮路径采用 1 m 的海表面高度等值线表示, 灰色实线为多年平均路径, 紫色实线为当前模式路径, 灰色箭头为当前模式的地转速度场。b 中蓝、绿、红分别代表大弯曲、离岸的非大弯曲、近岸的非大弯曲 3 个路径, 加粗的 MP3、MP7、MP9 为 3 种典型路径的成熟态。b1 和 b2 分别为 2004 年和 2017 年两次大弯曲发生的最佳匹配单元迁移轨迹; b3 为非大弯曲路径时通常的最佳匹配单元轨迹

In a, the frequency of occurrence is given as a percentage number at the upper left corner of each pattern, the Kuroshio axis is denoted by the 1 m sea surface height isoline, with the gray solid line denoting the time-mean axis and the purple solid line representing the axis in the associated self-organizing map pattern. The gray arrows denote the geostrophic velocity. In b, the blue, green and red lines represent the large meander, offshore non-large meander and nearshore non-large meander path, respectively. The MP3, MP7 and MP9 (in bold fonts) represent the mature state for the three typical paths. b1, b2 are the best matching unit migration tracks of large meander path occurring in 2004 and 2017, respectively; b3 is the best matching unit migration track of the non-large meander path

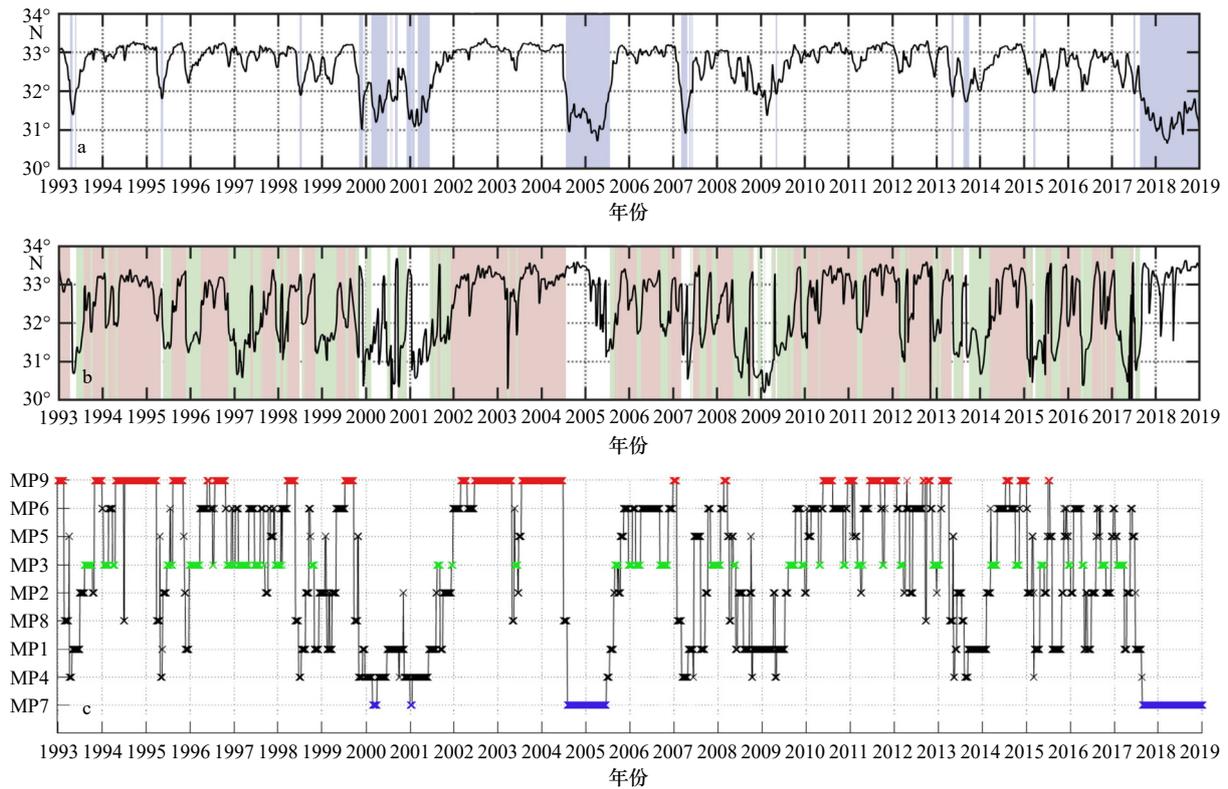


图5 黑潮流轴最南端纬度位置变化的时间序列

Fig. 5 Time series of the southernmost position axis of the Kuroshio axis

a. 流轴在 $136^{\circ}\sim 139^{\circ}\text{E}$ 范围内的位置变化; b. 流轴在 $140^{\circ}\sim 142^{\circ}\text{E}$ 范围内的位置变化; c. 黑潮的最佳匹配单元序列, 时间间隔为 3 d。a、b 中的蓝色、绿色、红色阴影分别表示大弯曲、离岸的非大弯曲、近岸的非大弯曲路径的发生。c 中的蓝叉、绿叉、红叉和黑叉分别标注成熟的大弯曲、离岸的非大弯曲、近岸的非大弯曲路径和一般路径

a. Jet position anomaly between 136°E and 139°E ; b. jet position anomaly between 140°E and 142°E ; c. best matching unit series of the Kuroshio south of Japan. The blue, green and red shading bars denote the period of the large meander, offshore non-large meander and nearshore non-large meander path in a and b, respectively. The blue, green and red cross marks denote the large meander, offshore non-large meander and nearshore non-large meander paths in c, respectively

以往学者们通常根据黑潮流轴的两个指数确定其路径^[4], 指数 1 (图 5a) 为黑潮流轴在 $136^{\circ}\sim 139^{\circ}\text{E}$ 的南北位置变化, 指数 2 (图 5b) 为其在 $140^{\circ}\sim 142^{\circ}\text{E}$ 的南北位置变化。其中流轴定义为量值等于 1 m 的 SSH 等值线, 流轴指数定义为 1 m SSH 等值线在所选经度范围内的最南端纬度值。本文将指数 1 低于 32°N 并且指数 2 高于 33°N 定义为 LM 路径; 相反, 当指数 1 高于 32°N 并且指数 2 低于 33°N 时, 为 oNLM 路径; 当指数 1 高于 32°N 并且指数 2 高于 33°N 时, 为 nNLM 路径。通过比较上述经典的黑潮路径指数和 BMU 时间序列 (图 5), 我们可以看到 SOM 方法能够很好地识别黑潮的流态演变。比如在 1993–2000 年、2001–2004 年、2006–2017 年的长期时间内, 日本南部黑潮几乎以 NLM 路径为主。2000–2001 年初, 发生了两次 LM 路径, 但是都十分短暂。在此之后发生了 2004 年与 2017 年这两次稳定持久的 LM 事件。将 SOM 空间模式与 BMU 序列相结合, 我

们能够总结出 LM 生成的两种典型的模式迁移轨迹, 一种以 2004 年的这次大弯曲事件为例, 由 nNLM 路径通过过渡态 MP8 转变来, 并在 LM 消亡后转为 oNLM 路径, 这是 LM 从生成到消亡的典型轨迹 (图 4b1)。另一种则相反, 如 2017 年开始的这次 LM 事件, 它虽然在 LM 之前短暂地转向 nNLM 路径, 但是最终由 oNLM 路径过渡而成, LM 经历了由弱到强的成长, 并最终保持在成熟的大弯曲路径, 这打破了以往 LM 只能由 nNLM 转来的固有认知 (图 4b2)。在没有 LM 发生的时间里, 黑潮路径借助过渡态 MP5 和 MP8 在 nNLM 和 oNLM 之间不断交替 (图 4b3), 两种路径的切变非常快速, 通常只需要 1 个月时间。模式的转变也并非总是循序渐进的, 有时会发生跳跃, 这种轨迹用虚线在图中 (图 4b3) 标示了出来。综上所述, SOM 方法能够准确地识别出日本南部黑潮路径的变异。相比于前人常用的流轴指数, SOM 方法可以更直观地揭示不同模式之间随时间转换的细节。

3.2 黑潮延伸体海域

类似 3.1 节, 用同样的方式对 KE 海域的 SLA 数据做训练, 可以提取出 KE 的 9 组空间模式 (KP1–KP9, 图 6a)。比较图 6a 的第 1 列和第 3 列, 前者的 SLA 沿流轴自西向东排列顺序为负–正–负, 此时 KE 流轴被压缩, 路径整体南移, 南部再循环流减弱, 路径趋于不稳定; 后者的 SLA 沿流轴排列顺序为正–负–正, 此时 KE 流轴拉长, 路径北移, 南部再循环流加强, 路径趋于稳定。第 2 列的 3 个模式属于稳定态和不稳定态之间的过渡态。其中, 特征相差最大的不稳定模式 KP1 和稳定模式 KP9 在 1993–2018 年期间的发生次数在所有模式中占比最大, 二者均为 14%。KP8 出现 144°E 上 SSH 正异常与负异常相对峙的偶极子现象, 使得 KE 急流呈现出南北两支分叉现象, 但北侧路径明显具有更强的流量运输。

依据 Qiu 等^[12]所定义的方法, 本文计算了各模式的 KE 指数, 以衡量各模式的 KE 路径稳定程度 (图 6b)。根据计算结果, KE 的 9 个模式依照稳定程度由弱到

强排列的顺序为 KP7、KP4、KP1、KP5、KP8、KP2、KP9、KP3、KP6。按照这个顺序排列 BMU 序列的纵坐标, 图 6c 展现了 KE 稳定性在 1993–2018 年的变化。从图中可见, KE 在 1993–2001 年、2005–2009 年、2017 年基本处于不稳定态, 在 2002–2004 年、2010–2016、2018 年基本处于稳定态, 这一结果与图 2b 表现基本一致。上述结果再次证明了 SOM 方法能够有效提取 SLA 变化的主要模式。值得注意的是, BMU 序列同时揭示了 KE 在年际尺度的变化, 这些变化与 PDO 关联的年代际变化并不相符, 可能与其他因素有关。除上文已经提到的 KE 路径在 2017 年后半年的异常迁移之外, 在 1999–2002 年间, KE 长期处于偶极子模式 (KP8)。为探究这些 KE 变异的反常现象是否存在日本南部黑潮的作用, 下面我们对此做一个简单的统计分析。

3.3 基于 SOM 空间模式的统计分析

为了探究黑潮上游 (即日本南部黑潮) 与下游 (即 KE) 之间的联系, 本节将日本南部黑潮各模式发生时

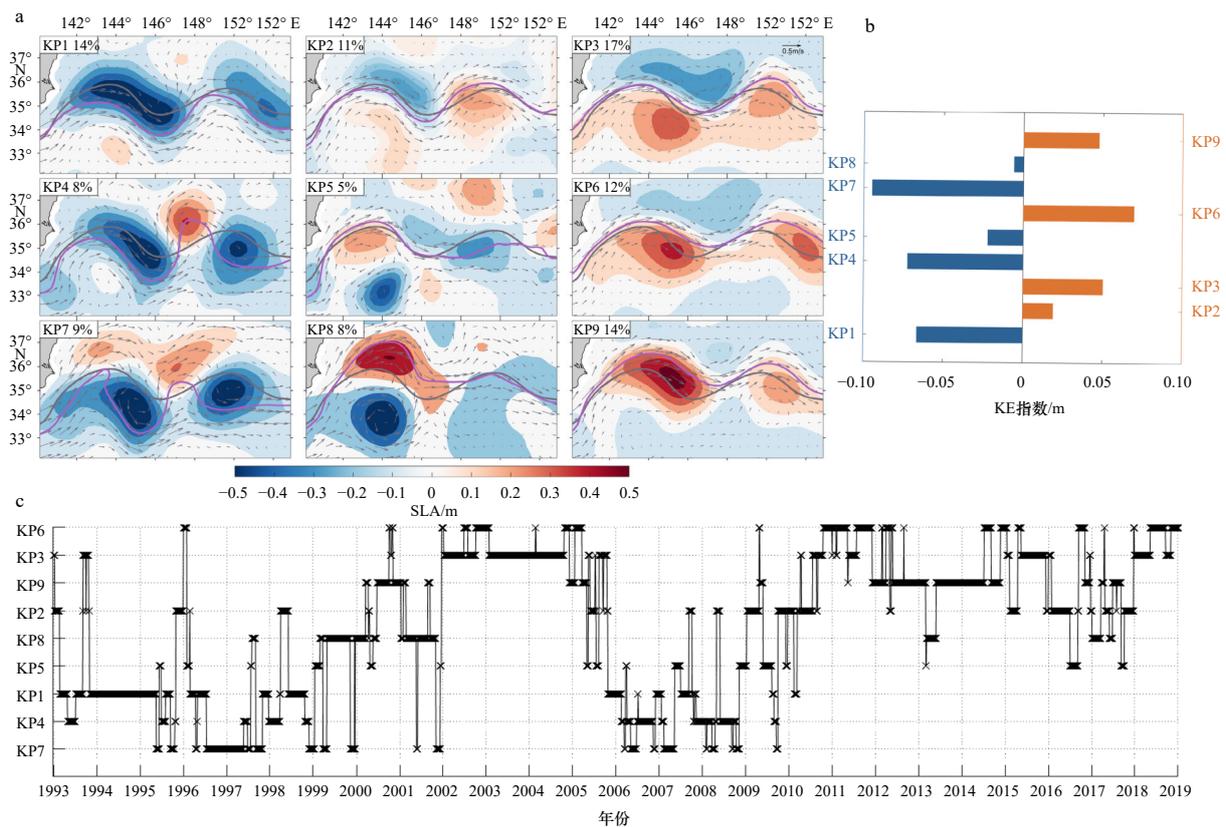


图 6 黑潮延伸体基于 3 d 间隔的海表面高度距平 (SLA) 数据的 (3×3) 自组织映射分析提取的 9 组特征模式 (KP1–KP9) (a); KP1–KP9 各自的 KE 指数大小 (b); KE 的最佳匹配单元序列 (c)

Fig. 6 The nine spatial patterns (KP1–KP9) extracted from the 3-day interval sea level anomaly (SLA) data in the Kuroshio extension region using the (3×3) self-organizing map analysis (a); KE index of KP1–KP9 (b); best matching unit series of the KE (c)

b 中 KE 指数大小用于各模式稳定性的评估; c 中时间间隔为 3 d, 纵坐标上的模式从下至上稳定程度依次提高

In b, KE index is used to evaluate the stability of each pattern; in c, the interval is 3-day, the stability of the patterns (the y-axis) gradually increases from the bottom to the top

所对应的 KE 模态进行了简单的统计(图 7), 其中 KE 稳定态用橙色表示, 不稳定态用蓝色表示, 橙色(蓝色)越深代表稳定(不稳定)程度越强。一个明显的发现是, 当日本南部黑潮处于成熟的 LM 路径时(SOM7), KE 趋于稳定(占 92%); 相反, 当黑潮处于成熟的 oNLM 路径时(SOM3), KE 趋于不稳定(占 59%); 在成熟的 nNLM 路径(SOM9)时, KE 趋于稳定(稳定态占 64%, 不稳定态占 36%), 但是稳定的程

度弱于上游为 LM 路径的情况。这一统计结果表明, 上游黑潮与 KE 路径之间存在影响, 这种影响根据黑潮路径的不同有所区别, LM 路径下, KE 路径稳定的概率更大, oNLM 路径下, KE 路径不稳定的概率更大, 而 nNLM 路径时上游与下游的联系并不清晰。这一结果与前人的发现基本一致^[3], 在下一节中我们将使用一种基于严格物理学基础的定量因果推断工具进一步研究此两者之间的因果关系。

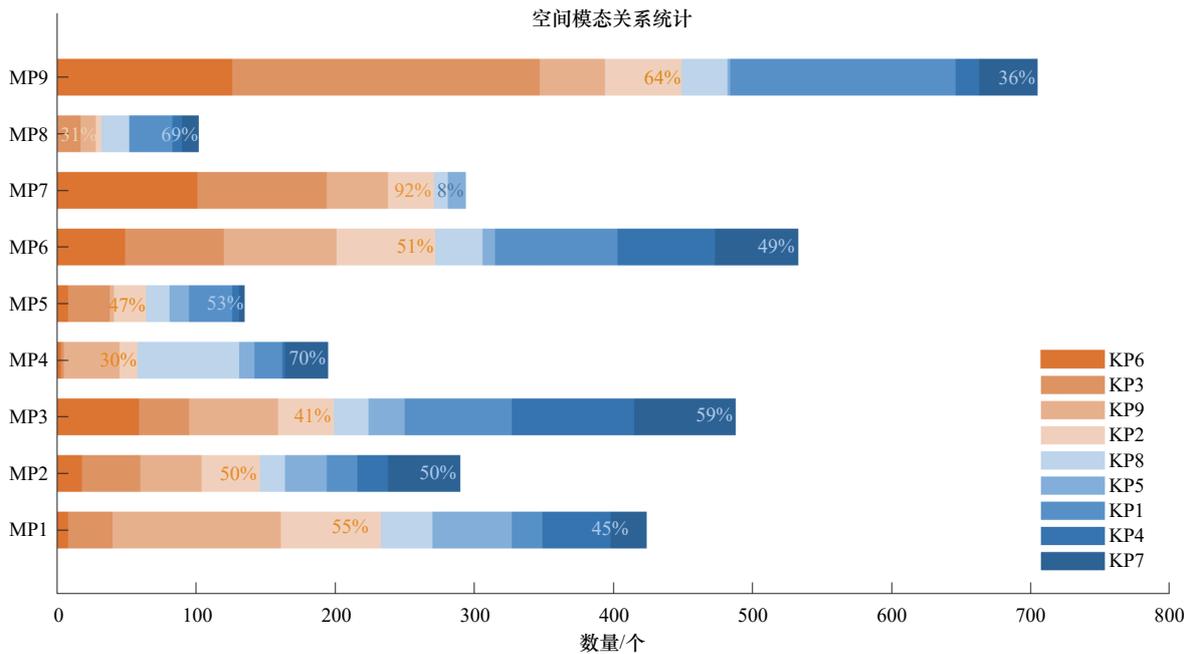


图 7 黑潮各模态(MP1–MP9)下的黑潮延伸体模态(KP1–KP9)数量的柱状统计

Fig. 7 Histogram of the occurrences of the Kuroshio extension patterns (KP1–KP9) under each Kuroshio pattern (MP1–MP9)

橙(蓝)色为稳定(不稳定)态, 黑潮延伸体(KE)模态的颜色越深越稳定(不稳定), KE 稳定(不稳定)态在各黑潮模态中所占的比例做了标注
The orange (blue) bars denote stable (unstable) Kuroshio extension (KE) patterns. Darker orange (blue) represents more stable (unstable) KE patterns. The proportions of the stable and unstable patterns during each Kuroshio pattern are marked in the bars

4 SOM 时间模态

本节采用 2.2 节中提出的第 2 种方法对两个海域的 SLA 数据进行 SOM 训练。不同于上一节, 这里我们将数据矩阵的时空维度转置, 得到 6 个时间优势模态和 BMU 特征区域空间分布。我们测试过 9 个模态下的结果中有一些时间模态之间非常接近, 6 个模态已经足够表征两个区域里 SLA 的时间变化。其中的时间模态序列为我们进一步分析黑潮路径与 KE 路径的因果关系打下基础。

4.1 日本南部黑潮和 KE 海区 SLA 典型时间模态及其特征区域

图 8a 和图 8c 分别给出了日本南部黑潮区域 SLA 变化的 6 个特征区域, 以及各区域的 SLA 时间

序列。结果显示, 日本西南部海域主要被 MR6(再循环流区域)占据。前人的研究发现, 黑潮再循环流对 LM 路径的生成和稳定具有重要影响^[1,5]: 一方面, 再循环流区域生成的正 SLA 对诱导弯曲的推挤能够诱发 LM 的生成; 另一方面, 再循环流的强度变化直接影响着 LM 路径的稳定性。因此, MR6 的 SSH 波动与 LM 路径密切相关。MR1 的范围与 LM 路径时的 SLA 负信号区吻合, 此处的 SLA 变化同时决定了黑潮路径在纪伊半岛南侧的移动趋势, 即近岸为 NLM 路径, 离岸为 LM 路径。MR5 包含了黑潮路径在伊豆海脊的变化区域, 在 LM 路径与 nNLM 路径下, 黑潮流轴在 MR5 处的正 SLA 作用下形成反气旋性弯曲, 由三宅岛北部流出; 而在 oNLM 路径下, 流轴在 MR5 处的 SLA 负信号作用下形成气旋性弯曲, 流

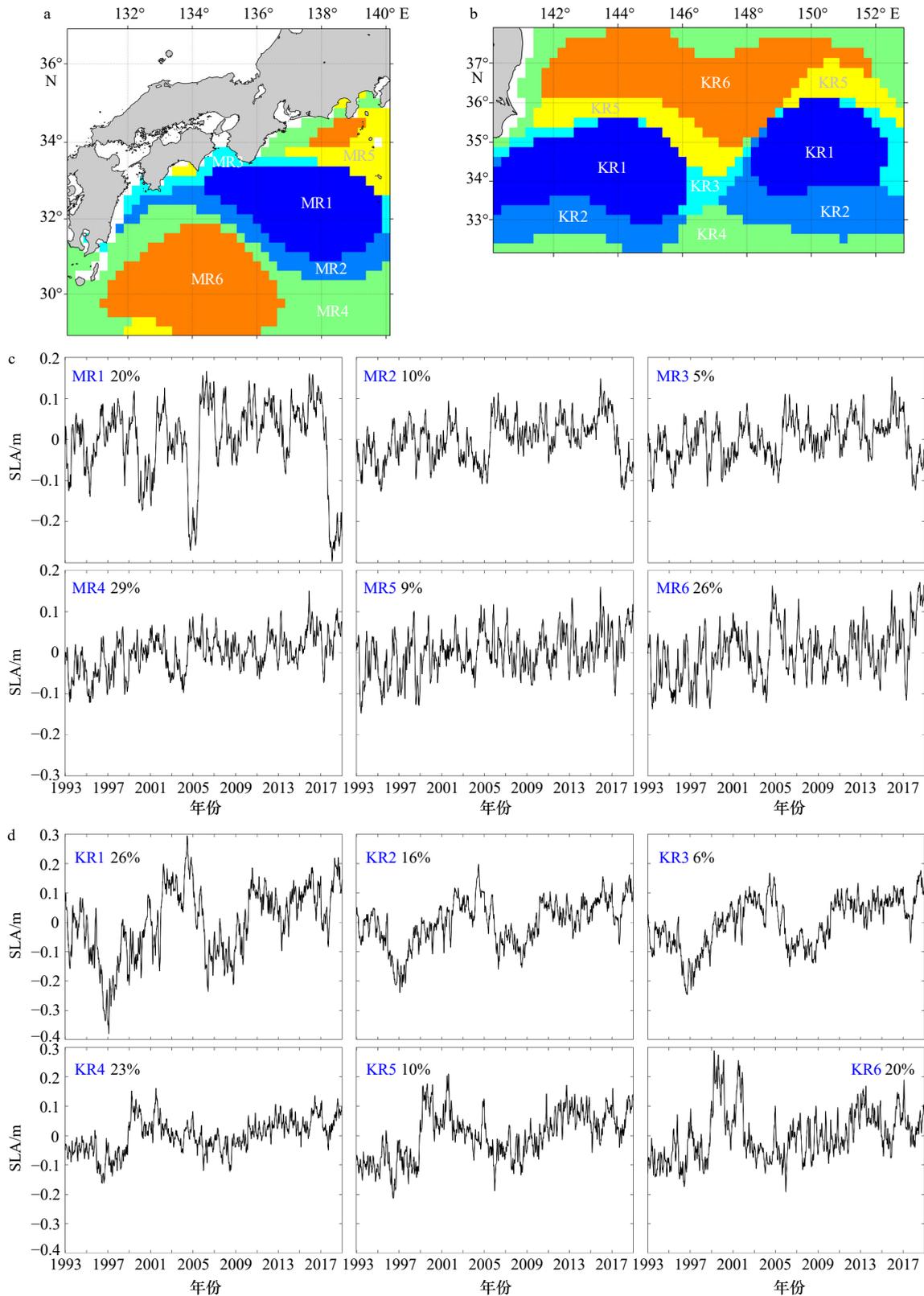


图8 (2×3)自组织映射所识别的日本南部黑潮海域海表面高度距平(SLA)变化特征区域(MR1–MR6)(a), (2×3)自组织映射所识别的黑潮延伸体海域SLA变化特征区域(KR1–KR6)(b), MR1–MR6的SLA时间序列(c), KR1–KR6的SLA时间序列(d)

Fig. 8 Typical regions of sea level anomaly (SLA) variability (MR1–MR6) in the Kuroshio region south of Japan identified with the (2×3) self-organizing map (a), typical regions of SLA variability (KR1–KR6) in the Kuroshio extension region identified with the (2×3) self-organizing map (b), time series of SLA in the six typical regions (MR1–MR6) (c), time series of SLA in the six typical regions (KR1–KR6) (d)

轴越过八丈岛以南进入北太平洋。MR2 和 MR3 处于 MR1 的边缘区, 与 MR1 具有相似的变化特征, 但是振荡幅度更小。海域内剩余的区域基本被归为 MR4, MR4 的 SLA 变化受黑潮路径影响不大, 其时间序列的特征是以小幅振荡缓慢爬升。综上, SOM 提取的黑潮 6 个特征区中, MR1(纪伊半岛东南侧变化区)、MR5(伊豆海脊变化区)、MR6(再循环流区域) 3 个区域的 SLA 特征对于黑潮路径分布具有重要作用, 因此这 3 个区域是下文主要的分析对象。

同理, KE 的 SOM 训练结果如图 8b 和图 8d 所示。这一结果揭示了 KE 路径随再循环流强度变化引起的南北迁移, 展现了其路径形态上“两脊一槽”的特征。其中, KR1、KR2、KR3 具有显著的年代际振荡, 三者振荡程度依次减小。KR6 是与 KR1 变化特征最相异的模态, 它们在地理位置上一北一南, 具有相反的 SLA 变化, 尤其当流态处于偶极子路径(KP8)时这种对立更加明显。在地理位置上, KR5 位于 KR1 和 KR6 之间, 但是 SLA 变化更接近 KR6。海域内其余区域被划分为 KR4, 它的 SLA 时间序列振荡幅度最小。从 KE 平均路径的位置来看, KR1、KR3 位于“两脊一槽”区, KR2 位于南部再循环流区, KR5、KR6 位于北部再循环流区。

4.2 日本南部黑潮和 KE 海区 SLA 典型时间模态之间的因果关系

在 3.3 节中, 我们根据 SOM 空间模态的统计结果, 初步得出黑潮和 KE 的流态之间具有一定联系, 但这种联系究竟是单方面的还是相互的? 孰是因孰是果? 关键因果区又在哪? 这些问题有待进一步研究。过去的研究中, 人们常用相关、回归等分析工具研究两个事件之间的联系, 但是这些方法无法揭示两个事件之间的因果性。下面我们使用基于信息流理论的因果分析来回答上面提出的几个问题。

根据第 3 节中对日本南部黑潮 SLA 的空间聚类结果, 我们将 MP1、MP4、MP7 3 个空间模态定义为 LM 路径模态, 将 MP2、MP3 定义为 oNLM 路径模态, 将 MP6、MP9 定义为 nNLM 路径模态。我们根据 BMU 序列得到这 3 类路径的发生时间, 由此计算 3 类路径下日本南部黑潮 6 个特征区域(MR1–MR6) 与 KE 海域 6 个特定区域(KR1–KR6) 内 SLA 特征时间模态之间的因果关系(表 1), 计算方法见附录中公式(A3)。由于结果已经进行了归一化处理, 所以表中各信息流绝对值可用来比较不同组时间模态之间因果关系的相对大小。下面我们用 $T_{MR_i \rightarrow KR_j}$ ($i, j=1, 2, \dots, 6$) 表示由日本南部黑潮第 i 个特征时间模态向

KE 第 j 个特征时间模态传递的信息流, 反之亦然。

结果表明, 在 LM 路径下, 日本南部黑潮和 KE 之间存在双向因果关系, 但是 KE 对黑潮的影响高于后者对前者。在 MR 向 KR 的 36 个信息流中, 只有 MR1 → KR1 和 MR1 → KR6 的信息流通过了 95% 置信度检验, 信息流的量值分别为 0.347 和 0.244, 对照 LM 路径下的 SLA 合成场(图 9a1) 可见, 当黑潮处于 LM 路径时, KE 处于“两槽一脊”结构明显的稳定态。此时 MR1 为纪伊半岛东南侧的强 SLA 负信号区, KR1 为 KE 的“两脊一槽”区域。上述结果表明, 在 LM 路径下, 黑潮能够通过影响 KE 的“两脊一槽”区域, 使得 KE 趋于稳定。反过来, 在 KR 向 MR 的 36 个信息流中, KR1–KR5 对 MR4–MR6 均有显著的因果性, 尤其是 KR1–KR3 对 MR5–MR6 的信息流超过了 0.5, 如 $T_{KR3 \rightarrow MR6}=0.689$, $T_{KR1 \rightarrow MR5}=0.591$, $T_{KR1 \rightarrow MR6}=0.594$, $T_{KR2 \rightarrow MR5}=0.530$, 因此在 LM 时期, KE 对黑潮的影响更强, 尤其是对黑潮再循环流区域, 并且其余涉及区域更广。对照 LM 路径的 SLA 合成场(图 9a1), KR1–KR3 集中在 KE“两脊一槽”区域与南部再循环流区域, MR5 和 MR6 则分别对应伊豆海脊处的正 SLA 区和黑潮再循环流。前面我们讨论, MR5 和 MR6 是影响 LM 路径的关键区。我们的结果表明 KE 在 LM 期间对这两个关键区的 SLA 具有较强的因果性, 这意味着 KE 通过影响再循环流和伊豆海脊处的黑潮对大弯曲的形成和维持产生作用, 关于其中具体的作用机制, 还有待进一步研究。

不同于 LM 路径情形, $T_{KR_i \rightarrow MR_j}$ 在 oNLM 路径下全部没有过检, 因而在 oNLM 路径下日本南部黑潮与 KE 之间只存在单向因果(即从 MR 向 KR), 其中 $T_{MR5 \rightarrow KR2}=0.400$, $T_{MR6 \rightarrow KR2}=0.389$ 。相比 LM 路径, oNLM 路径下的因果关系存在两点截然不同的情况, 其一是 MR5 和 MR6 区域的 SLA 反过来成为影响 KE 区域 SLA 的因, 其二是 KE 在 oNLM 时期表现为不稳定态, 其再循环流减弱, 引起流轴的压缩和南移(图 9a2)。我们还注意到, SLA 合成场中 MR5 与 KR2 被大范围的 SLA 负信号相连 ($32^\circ \sim 36^\circ \text{N}$, $140^\circ \sim 145^\circ \text{E}$), 这说明二者之间的因果性可能是由 SLA 负信号扰动沿日本海岸南部向 KE 再循环流区域的传播导致的。这些从上游顺流而下的 SLA 负信号减弱了 KE 的南部再循环流, 使其路径趋于不稳定。为了验证这一猜想, 我们选取了一段 oNLM 时期(2001 年 9 月 12 日至 2001 年 11 月 23 日) 内的海域 SLA 变化进行观察(图 9b)。结果显示, 在 oNLM 路径下, 沿黑潮流轴生成的 SLA 负信号在东传过程中并不容易消亡, 其越过伊豆海脊后仍然存在, 直至与 KE 南部再循环流区

表1 黑潮在大弯曲(LM)、离岸的非大弯曲(oNLM)、近岸的非大弯曲(nNLM)路径下黑潮海表面高度距平(SLA)特征区(MR1-MR6)与黑潮延伸体的SLA特征区(KR1-KR6)的因果分析结果

Table 1 Information flow between the Kuroshio sea level anomaly (SLA) typical regions (MR1-MR6) and the Kuroshio extension SLA typical regions (KR1-KR6) during the large meander (LM), offshore non-large meander (oNLM) and nearshore non-large meander (nNLM) path states

路径	LM					
方向	$T_{MR \rightarrow KR}(T_{KR \rightarrow MR})$					
区域	KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6
MR1	0.347 (0.057)	0.111(0.150)	0.159(0.096)	-0.118(0.034)	-0.024(0.002)	0.244 (-0.004)
MR2	0.197(-0.093)	-0.058(0.003)	0.019(-0.066)	-0.018(-0.004)	0.001(0.017)	0.071(0.104)
MR3	0.094(-0.124)	-0.060(-0.079)	-0.018(-0.112)	0.009(0.012)	-0.007(0.070)	-0.077(0.116)
MR4	0.067(0.411)	0.126(0.377)	0.162(0.425)	-0.041(0.352)	-0.067(0.392)	0.003(-0.003)
MR5	0.230(0.591)	0.214(0.530)	0.250(0.571)	-0.070(0.352)	-0.068(0.479)	0.139(-0.094)
MR6	0.240(0.594)	0.209(0.331)	0.284(0.689)	-0.066(0.293)	-0.010(0.388)	0.146(-0.105)
路径	oNLM					
方向	$T_{MR \rightarrow KR}(T_{KR \rightarrow MR})$					
区域	KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6
MR1	-0.086(-0.153)	0.037(-0.110)	0.188(-0.143)	0.180 (-0.036)	0.171 (-0.057)	0.106 (0.001)
MR2	0.006(-0.265)	0.114(-0.202)	0.256(-0.248)	0.229 (-0.046)	0.223 (-0.078)	0.137 (0.025)
MR3	0.108(-0.160)	0.274(-0.103)	0.264(-0.113)	0.227 (0.034)	0.204 (0.017)	0.114(0.046)
MR4	0.161(-0.473)	0.327(-0.487)	0.264(-0.488)	0.245 (-0.298)	0.201 (-0.208)	0.114(-0.070)
MR5	0.250(-0.318)	0.400 (-0.360)	0.270(-0.297)	0.237 (-0.229)	0.123(-0.099)	0.060(-0.075)
MR6	0.191(-0.305)	0.389 (-0.350)	0.200(-0.336)	0.237 (-0.369)	0.106(-0.316)	0.082(-0.298)
路径	nNLM					
方向	$T_{MR \rightarrow KR}(T_{KR \rightarrow MR})$					
区域	KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6
MR1	-0.010(-0.015)	0.005(-0.011)	-0.017(0.045)	-0.095(0.164)	-0.101(0.156)	-0.080(0.106)
MR2	-0.023(-0.019)	0.001(-0.005)	-0.003(0.057)	-0.054(0.218)	-0.048(0.221)	0.005(0.224)
MR3	0.022(0.009)	-0.004(0.023)	0.006(0.064)	-0.025(0.175)	-0.021(0.176)	0.066(0.185)
MR4	0.011(0.000)	0.009(0.004)	0.017(0.026)	0.047(0.122)	0.029(0.121)	0.128(0.157)
MR5	0.073(-0.006)	0.040(0.002)	0.051(0.025)	0.096(0.089)	0.057(0.083)	0.147 (0.103)
MR6	0.026(-0.009)	0.028(-0.016)	0.023(0.008)	0.090(0.052)	0.039(0.060)	0.138 (0.088)

注: 加粗数字表示通过了显著性水平为5%的信度检验。

域的SLA负信号汇合,使KE愈发不稳定,有时甚至会引发KE流轴南北两侧正SLA负信号“对峙”的偶极子路径(KP8)的出现。这说明,oNLM路径的SLA负信号确实会由伊豆海脊传向KE再循环流,使KE路径趋于不稳定,这一现象同时解释了该时期内KP8模态长期维持的原因。

在nNLM路径下,日本南部黑潮与KE之间也存在相互的因果关系,但KE对日本南部黑潮的影响略

强。并且,nNLM路径下二者的信息流较弱,且所涉及关键区域也有所不同。在MR向KR的36个信息流中,仅有 $T_{MR5 \rightarrow KR6}=0.147$ 和 $T_{MR6 \rightarrow KR6}=0.138$ 通过了显著性检验。因此在nNLM路径下,日本南部黑潮影响KE的两个关键性源区是MR5和MR6,这点与oNLM路径的情形类似,但是oNLM路径下黑潮对KE的影响要远强于nNLM路径。从合成场可见,当日本南部黑潮处于nNLM路径时,KE的稳定性弱于

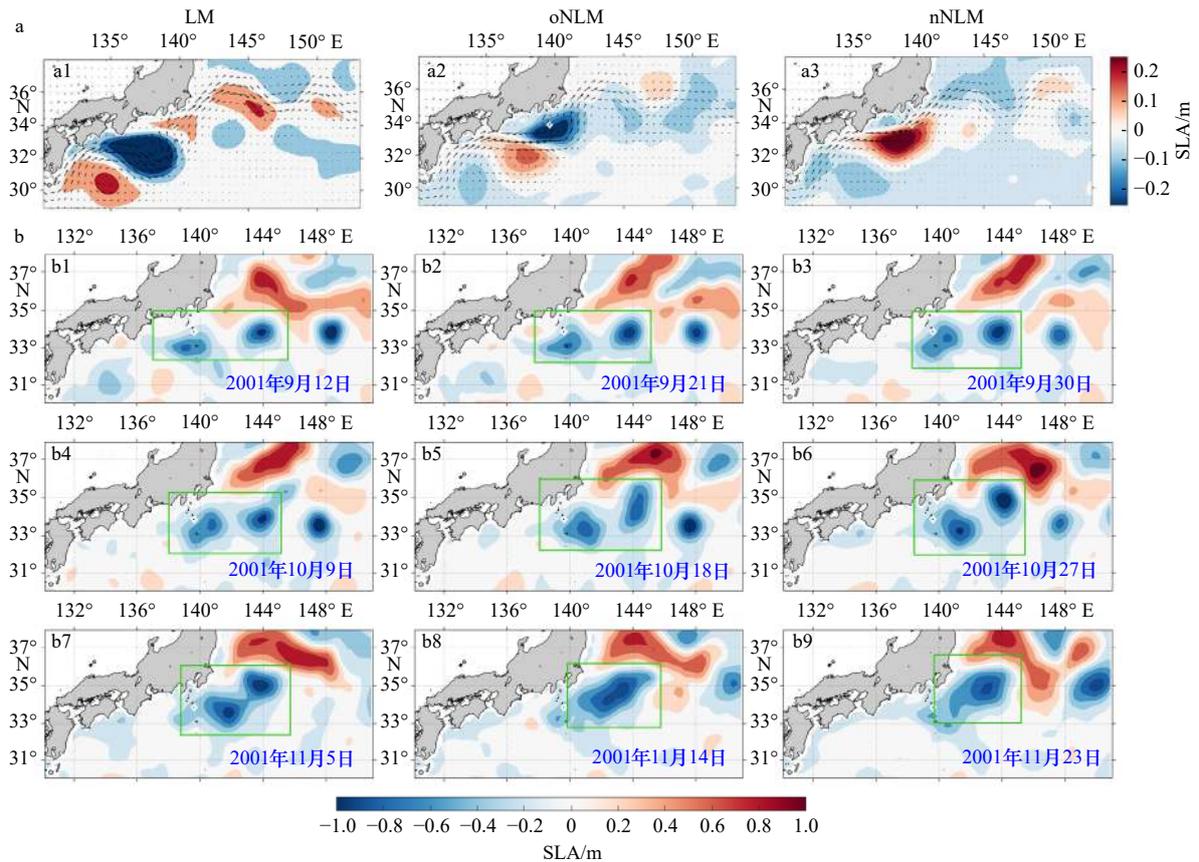


图9 黑潮大弯曲(LM)、离岸的非大弯曲(oNLM)、近岸的非大弯曲(nNLM)路径的海表面高度距平(SLA)合成场与流场(a);黑潮oNLM路径下,MR5的SLA负信号向KR2传递,逐步与黑潮延伸体南部再循环流合并,减弱KE路径的稳定性(矩形框)(b)

Fig. 9 Composites sea level anomaly (SLA) and velocity maps during the large meander (LM), offshore non-large meander (oNLM) and nearshore non-large meander (nNLM) path states (a); snapshots in a case when the Kuroshio is in the offshore non-large meander (oNLM) path state. In the rectangle box, negative SLA signals move from MR5 to KR2 which later gradually merge into the southern recirculation gyre of the Kuroshio extension, and weaken the stability of the Kuroshio extension SLA (b)

LM 路径但强于 oNLM 路径(图 9a3), 此时的 KR6 对应 KE 主轴以北的再循环流区域。从 KR 向 MR 的信息流略强, 其中量值较大的有 $T_{KR4 \rightarrow MR2} = 0.218$ 和 $T_{KR5 \rightarrow MR2} = 0.221$, 但相比其他两种路径仍然较小。从作用区域来看, 黑潮受影响的关键区 MR2 相对 LM 路径的情况(MR1)更加南移, 而 KE 的源区主要有两个, 一个是背景场 KR4, 另一个是偏北的再循环流 KR5。总体来看, 在 nNLM 路径下, 黑潮与 KE 之间的因果关系较弱, 作用机制不清晰。

综上所述, 显然黑潮与 KE 的流态之间存在密切的联系, 并且黑潮处于不同流态时, 二者之间因果性的方向和强度不同, 涉及的关键区也有所不同。在方向上, LM 路径与 nNLM 路径时, 黑潮和 KE 存在不对等的相互因果关系, KE 对黑潮的影响更强; 而 oNLM 路径下, 只存在黑潮对 KE 的单向因果。在涉及区域上, 黑潮海域的关键区为纪伊半岛东南侧区域(MR1), 伊豆海脊区域(MR5), 再循环流区域(MR6), 而

KE 海域的关键区主要为“两脊一槽”区域(KR1、KR3)以及南部再循环流区域(KR2)。在 LM 路径时, MR5 和 MR6 受 KR1 的作用而变化, 但是在 NLM 路径时, 它们反而成为影响源区, 通过影响 KR2 和 KR6 改变 KE 路径的稳定性。在因果性的强度上, KE 指向黑潮的因果性在 LM 路径下最强, 黑潮指向 KE 的因果性在 oNLM 路径下最强。从作用效果来看, oNLM 路径下, 黑潮使 KE 趋于不稳定; LM 路径下, 黑潮使 KE 趋于稳定, 并且 KE 对黑潮路径具有更强的反作用; 而 nNLM 路径时, 二者的因果联系较弱, 相互作用不显著。

5 总结和讨论

黑潮流系作为太平洋海域最大的西边界流体系, 对北太平洋海域的气候变化具有举足轻重的影响, 本文使用一种深度学习方法——自组织映射(SOM)方法, 分别对日本南部黑潮和黑潮延伸体(KE)展开分

析。为保证 SOM 的训练能够基于足够容量的样本展开,我们使用了 26 年跨度的 3 d 间隔的海表面高度距平(SLA)数据集,根据 SLA 在 26 年间的分布特征提取出典型的时空模态。结果表明,对于充斥着复杂非线性变化的黑潮和 KE 海域,用 SOM 方法进行 SLA 的特征识别和聚类分析是十分有效的。将 SLA 空间序列作为样本输入 SOM 进行训练后,我们分别得到了两块海域的 9 组空间模态(MP1-MP9, KP1-KP9)和 BMU 序列。MP1-MP9 成功捕捉到了黑潮的 3 个经典路径: LM 路径(MP7)、oNLM 路径(MP3)和 nNLM 路径(MP9)。结合 BMU 序列,我们发现 2005 年与 2017 年的两次 LM 路径的形成过程有不同的模态轨迹,前者由 nNLM 路径生成,后者则由 oNLM 路径生成,这也意味着这两次 LM 路径的生成机制可能并不相同。KP1-KP9 揭示了 KE 流轴随稳定性变化的拉长压缩与南北迁移,其 BMU 序列同时还还原了 KE 路径稳定性在 26 年间的年际变化与年代际震荡,其中一些 KE 路径稳定性与 PDO 信号明显不相符的变化引起了我们的注意,这些变化可能与上游日本南部黑潮的路径有关。两块海域的模态统计结果显示,黑潮与 KE 的空间模态之间存在一定的联系,黑潮处于 LM 路径时,KE 趋于稳定,相反,黑潮处于 oNLM 路径时,KE 趋于不稳定。

为了进一步探究这种联系,我们继续借助 SOM 的特征提取优势,对 SLA 的时间序列进行训练,得到了两块海域 SLA 变化的 6 组特征区域(MR1-MR6, KR1-KR6)与各区域的时间模态。我们使用一种基于信息流概念的因果分析法对各时间模态展开因果分析,进一步证明了二者路径之间存在相互作用,但是这种作用的强弱与关键区因黑潮所处路径而异。结果表明,LM 路径下,黑潮与 KE 之间存在相互因果关系,黑潮在纪伊半岛南部的特征区对 KE 的“两脊一槽”区域存在较强的作用,同时,KE“两脊一槽”区域对黑潮再循环流的信息流更强,因而 LM 路径下,在黑潮使 KE 趋于稳定的同时,KE 也会通过调制黑潮再循环流和伊豆海脊区域的 SLA 影响黑潮路径。oNLM 路径下,仅存在黑潮对 KE 的因果性,这一因果

性与 SLA 负信号从伊豆海脊沿日本海岸向下游 KE 南部再循环流的输运有关,使 KE 路径趋于不稳定。nNLM 路径下,两块海域也存在相互因果关系,并且 KE 对日本南部黑潮的影响更强,但是此时二者的因果性偏弱。总体来看,两块海域因果关系的关键区域集中在再循环流区、纪伊半岛东南侧、黑潮延伸体“两脊一槽”区域以及伊豆海脊。

伊豆海脊是连接黑潮与 KE 的通道,也是传递二者变异信息的重要途径,伊豆海脊的存在使二者的路径在南北方向上趋于同向移动。Qiu 等^[1]指出 2017 年的这次 KE 异常路径也可以由此解释: LM 路径发生时,黑潮水从三宅岛以北的深海峡流出,引起 KE 路径的北移,致使其由不稳定态转为稳定态。由于在过去 30 年间,仅有 2017 年这次 LM 事件恰好在 KE 处于向不稳定态转变的情况下发生,改变了 KE 的路径,因此相关的研究仍然欠缺。虽然这次 LM 事件尚未结束,我们还无法预测这次 KE 路径的变异将对整个北太平洋海域带来怎样的影响,但是由于 LM 与 PDO 引起的 KE 变异具有一致的大气响应,有研究认为这次 LM 事件结束后, PDO 会恢复对 KE 路径的年代际调制^[2]。考虑到伊豆海脊的作用,我们也研究了 KE 路径的改变对上游黑潮的影响,我们发现:当 KE 处于稳定态时,黑潮趋于 nNLM 路径; KE 处于不稳定态时,黑潮趋于 oNLM 路径。例如在 2002-2004 年,KE 居于稳定态时,黑潮几乎被 nNLM 路径占据,直到被 LM 的生成所打破,LM 消亡后的 2005-2009 年,KE 转向不稳定态,这时 oNLM 路径出现频率陡增,而 nNLM 路径的出现频率下降。但是,在 2012-2016 年,黑潮路径没有完全遵循这个规律,即使在 KE 居于稳定态时,oNLM 路径仍然大量出现。因果分析的结果也表明,KE 在不同路径下时(稳定或不稳定),二者的信息流较弱($T_{\max}=0.216$),因此关于这一点,还需要进一步探究。本文将 SOM 方法与因果分析方法相结合,计算了日本南部黑潮与 KE 特征区域之间的因果性,证明了二者流态之间存在直接的因果联系,但是,本文未做深入的机制探究,如何将因果分析结果与动力机制解释相结合,也是今后需要完善的工作。

参考文献:

- [1] Qiu Bo, Chen Shuiming, Schneider N, et al. On the reset of the wind-forced decadal Kuroshio extension variability in late 2017[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(24): 10813-10828.
- [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] 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(1): 219–225.
- [4] Yang Yang, Liang X S. New perspectives on the generation and maintenance of the Kuroshio large meander[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2019, 49(8): 2095–2113.
- [5] Usui N, Tsujino H, Nakano H, et al. Formation process of the Kuroshio large meander in 2004[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C8): C08047.
- [6] Miyazawa Y, Guo Xinyu, Yamagata T. Roles of mesoscale eddies in the Kuroshio paths[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 34(10): 2203–2222.
- [7] Qiu Bo, Chen Shuiming. 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.
- [8] Qiu Bo, Chen Shuiming. Eddy-mean flow interaction in the decadal modulating Kuroshio extension system[J]. *Deep-Sea Research Part II: topical Studies in Oceanography*, 2010, 57(13/14): 1098–1110.
- [9] Yang Yang, Liang X S. The instabilities and multiscale energetics underlying the mean-interannual-eddy interactions in the Kuroshio extension region[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(5): 1477–1494.
- [10] Qiu Bo. The Kuroshio extension system: its large-scale variability and role in the midlatitude ocean-atmosphere interaction[J]. *Journal of Oceanography*, 2002, 58(1): 57–75.
- [11] Yang Haiyuan, Qiu Bo, Chang Ping, et al. Decadal variability of eddy characteristics and energetics in the Kuroshio extension: unstable versus stable states[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(9): 6653–6669.
- [12] Qiu Bo, Chen Shuiming, 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.
- [13] Qiu Bo. Kuroshio extension variability and forcing of the Pacific decadal oscillations: responses and potential feedback[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2003, 33(12): 2465–2482.
- [14] Liu Yonggang, Weisberg R H. Ocean currents and sea surface heights estimated across the West Florida Shelf[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2007, 37(6): 1697–1713.
- [15] Jin Baogang, Wang Guihua, Liu Yonggang, et al. Interaction between the East China Sea Kuroshio and the Ryukyu current as revealed by the self-organizing map[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C12): C12047.
- [16] Liu Yonggang, Weisberg R H, Vignudelli S, et al. Patterns of the loop current system and regions of sea surface height variability in the eastern Gulf of Mexico revealed by the self-organizing maps[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(4): 2347–2366.
- [17] Ma Fang, Diao Yi'na, Luo Dehai. Spatiotemporal characteristics of the sea level anomaly in the Kuroshio extension using a self-organizing map[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2016, 9(6): 471–478.
- [18] Dong Zibo, Yang Dazhi, Reindl T, et al. Satellite image analysis And a hybrid ESSS/ANN model to forecast solar irradiance in the tropics[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 79: 66–73.
- [19] 白玫, 吴辉. 利用SOM神经网络研究长江口邻近海域海表温度特征[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2018(4): 184–194.
Bai Mei, Wu Hui. Characteristics of sea surface temperature in the Changjiang Estuary and adjacent waters based on a self-organizing map[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2018(4): 184–194.
- [20] 罗未萌, 钱维宏, 蒋宁, 等. SOM方法在中国东部夏季降水分型中的应用[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(5): 970–982.
Luo Weimeng, Qian Weihong, Jiang Ning, et al. Application of SOM method in summer precipitation patterns in eastern China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2018, 54(5): 970–982.
- [21] 吴胜男, 江志红. 基于自组织映射的长江中下游夏季天气分型及其降水特征[J]. *气象科学*, 2019, 39(5): 588–598.
Wu Shengnan, Jiang Zhihong. Synoptic classification and precipitation characteristics in summer over the Yangtze River Basin based on self-organizing map[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2019, 39(5): 588–598.
- [22] Richardson A J, Risien C, Shillington F A. Using self-organizing maps to identify patterns in satellite imagery[J]. *Progress in Oceanography*, 2003, 59(2/3): 223–239.
- [23] Liu Yonggang, Weisberg R H, Mooers C N K. Performance evaluation of the self-organizing map for feature extraction[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2006, 111(C5): C05018.
- [24] Liang X S. Information flow and causality as rigorous notions *ab initio*[J]. *Physical Review E*, 2016, 94(5): 052201.
- [25] Liang X S. Unraveling the cause-effect relation between time series[J]. *Physical Review E*, 2014, 90(5): 052150.
- [26] Stips A. On the causal structure between CO₂ and global temperature[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21691.
- [27] Xiao Haixia, Zhang Feng, Miao Lijuan, et al. Long-term trends in Arctic surface temperature and potential causality over the last 100 years[J]. *Climate Dynamics*, 2020, 55(5/6): 1443–1456.
- [28] Granger C W J. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods[J]. *Econometrica*, 1969, 37(3): 424–438.
- [29] Liang X S. Information flow within stochastic dynamical systems[J]. *Physical Review E*, 2008, 78(3): 031113.
- [30] Liang X S. Normalizing the causality between time series[J]. *Physical Review E*, 2015, 92(2): 022126.
- [31] Rong Yineng, Liang X S. Panel data causal inference using a rigorous information flow analysis for homogeneous, independent and identically distributed datasets[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 47266–47274.

附录

SOM 神经网络

SOM 的网络结构非常简洁, 仅由输入层和输出层组成, 输出层同时又是竞争层, 两者通过权值 W 双向连接。竞争层的神经元个数即为最终获得的特征模态的个数, 需要在训练前根据实际情况确定。输入层将 m 个样本的数据向量 $X_i (i=1, 2, \dots, n, n$ 为变量个数) 依次传递给竞争层, 引起竞争层神经元对样本向量的竞争, 竞争获胜的神经元会根据算法更新自己与优胜领域内神经元的权值 W_i 并且调整神经元的位置, 以获得更有利的竞争条件。通过这种迭代过程, 特征相似的神经元逐渐靠近, 而差异越大的神经元彼此远离, 最终获胜的神经元 (Best Matching Unit, BMU) 即为优势模态。本文使用适用于 MATLAB 环境的 SOM Toolbox 2.0 工具包 (<http://www.cis.hut.fi/projects/somtoolbox>) 进行数据集的 SOM 训练。

SOM 分型的质量可由平均量化误差 (Quantization Error, QE) 和拓扑误差 (Topographic Error, TE) 两个指标评估, 其中 QE 的值代表模态内各对应样本与 BMU 的平均欧氏距离, TE 的值则表示竞争层神经元的不相邻百分比。QE 与 TE 越小, 代表此次 SOM 训练下同一模态下各样本的差异更小, 各优势模态的差异更大, 即实现了对于数据集更好的特征分类。本文 SOM 训练结果的误差指数见表 A1。

表 A1 自组织映射训练结果的量化误差 (QE) 与拓扑误差 (TE)

Table A1 Quantified error (QE) and topological error (TE) of the self-organizing map trained result

误差指数	空间模态		时间模态	
	QE	TE	QE	TE
黑潮	3.827	0.005	7.832	0.001
KE	8.475	0	13.738	0

信息流理论

传统的相关、回归等分析工具无法直接用来确定两个事件之间的因果关系。而传统的因果分析工具 (如 Granger 因果检验^[28]) 大都是经验性或半经验性的, 而且回答的只是“有”抑或“无”因果性。Liang^[24] 发现因果性与信息流在逻辑上一致, 而后者是真实的物理概念, 能从第一性原理在严格意义上推导出来, 而且所得结果最后可通过最大似然估计转化为简便的公式^[25], 为我们衡量事件间的因果关系提供了定量的研究手段。

考虑一个二维动力系统, 公式为

$$\frac{dX_1}{dt} = F_1(X_1, X_2, t) + b_{11}\dot{W}_1 + b_{12}\dot{W}_2, \quad (\text{A1})$$

$$\frac{dX_2}{dt} = F_2(X_1, X_2, t) + b_{21}\dot{W}_1 + b_{22}\dot{W}_2, \quad (\text{A2})$$

式中, \dot{W}_1 、 \dot{W}_2 为白噪声; F_1 、 F_2 为变量 X_1 、 X_2 、 t 的可微函数。Liang^[29] 证明, 从 X_2 流向 X_1 的信息流为

$$T_{2 \rightarrow 1} = -E \left[\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial (F_1 \rho_1)}{\partial x_1} \right] + \frac{1}{2} E \left[\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial^2 (b_{11}^2 + b_{12}^2) \rho_1}{\partial x_1^2} \right], \quad (\text{A3})$$

式中, ρ_1 为 X_1 的边际概率密度函数; E 为数学期望。这个公式给出了信息从 X_2 流向 X_1 的速率。如果 $T_{2 \rightarrow 1}$ 为 0, 则 X_2 不是 X_1 的因, 即 X_1 的变化是独立于 X_2 的; 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。当然在实际应用过程中需要进行显著性检验——检验所得结果是否显著地异于 0。

考虑到这一公式在实际中不便应用, Liang^[25] 给出了在线性模型假设下, 由 X_2 到 X_1 信息流速率的最大似然估计为

$$T_{2 \rightarrow 1} = \frac{C_{11}C_{12}C_{2,d_1} - C_{12}^2C_{1,d_1}}{C_{11}^2C_{22} - C_{11}C_{12}^2}, \quad (\text{A4})$$

式中, C_{ij} 为 X_i 和 X_j 的协方差; C_{i,d_j} 为 X_i 和另一个导出序列 $\frac{X_{j,m+1} - X_{j,m}}{\Delta t}$ 的协方差; Δt 为时间步长。式 (A3) 给出了计算两个时间序列之间因果关系的快捷算法。这一方法已经被运用于分析海洋与大气相关的因果性实际问题, 如

厄尔尼诺现象和印度洋偶极子的关系、二氧化碳对全球地表温度异常的贡献、北极平均地表温度异常的潜在影响因素等^[25-27]。为了揭示不同序列之间因果关系的相对大小, Liang^[30]对式(A3)做了归一化。本文所计算得到的信息流均为归一化后的结果。此外, 本文针对日本南部黑潮3种路径分别计算了日本南部黑潮与KE区域SLA之间的因果关系, 涉及到的时间序列并不是连续的, 式(A3)中的 C 应为样本协方差^[31]。最后, 实际应用中还需对计算得到的信息流进行显著性检验, 用来验证所得的因果性是否显著地异于0。

Typical spatiotemporal patterns of the Kuroshio south of Japan and the Kuroshio extension using self-organizing maps and their causal relationship

Wu Youting^{1,2}, Yang Yang³, Liang Xiangsan^{4,5}

(1. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 2. School of Marine Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 4. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China; 5. IRDR ICoE on Risk Interconnectivity and Governance on Weather/Climate Extremes Impact and Public Health, Fudan University, Shanghai 200438, China; 6. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China)

Abstract: Previous studies have shown that the decadal modulation of the Kuroshio extension (KE) system is controlled by the Pacific decadal oscillation-associated forcing from downstream. However, recent observation reveals that this mechanism ceases to function after August 2017. Meanwhile, a large meander is under development in the KE's upstream, i.e., south of Japan. Using the self-organizing map (SOM), we investigate the characteristic spatial and temporal patterns of the Kuroshio south of Japan and the KE and their causal relations, based on the 26-year (1993–2018) satellite altimetry data of sea level anomaly (SLA). The typical spatial patterns are well extracted, and their temporal trajectories indicate that the KE tends to be stable (unstable) when the upstream Kuroshio takes a large meander (an offshore nonlarge meander) path. To further unravel the underlying cause-and-effect relation between the two systems, we apply the information flow-based causality analysis to the typical regions of SLA and its associated temporal modes identified with the SOM. It is found that during the large meander event, the Kuroshio south of Japan and the KE are mutually causal, but have different hotspots. The information flows from the former to the latter mainly occur in the southeastern area off the Kii Peninsula and the time-mean ridge and trough of the KE jet, while those from the latter to the former are mainly concentrated in the time-mean ridge and trough of the KE jet, and the recirculation gyre of the Kuroshio. These results indicate that the Kuroshio large meander is an important factor influencing the KE's stability, while the KE affects its upstream Kuroshio via modulating the associated recirculation gyres. In contrast, when the offshore nonlarge meander path is taken, a one-way causality is identified from the Kuroshio to the KE, mainly occurring over the Izu-Ogasawara Ridge and in the recirculation gyres. This may be attributed to the constantly downstream transport of negative SLAs into the KE's recirculation gyre, which leads to an unstable KE.

Key words: Kuroshio large meandering; Kuroshio extension; self-organizing map (SOM); causality analysis; information flow