

# 基于卫星地转流线的表层黑潮入侵南海的 年际与年代际变化

杜小彤<sup>1</sup>, 梁朋<sup>1,2,3,4\*</sup>, 杨丽娜<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 广东海洋大学海洋与气象学院, 广东 湛江 524088;

2. 广东海洋大学近海海洋变化与灾害预警技术实验室, 广东 湛江 524088;

3. 广东海洋大学陆架及深远海气候、资源与环境广东普通高校重点实验室, 广东 湛江 524088;

4. 广东海洋大学自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室, 广东 湛江 524088)

**摘要:** 黑潮入侵对南海的动力和生态环境变化有重要影响, 为研究其年际和年代际变异规律, 本文基于卫星高度计数据和黑潮地转流线形态, 量化了黑潮流套和分支入侵南海的时空变化, 并统计分析二者流量的年际、年代际变异与太平洋年代际振荡 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 和厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 的关系。研究结果表明: ①在年际尺度上, 当 PDO 指数处于负位相时, Niño3.4 指数与流套入侵流量呈负相关, 相关系数达到 $-0.55$  (90% 显著性检验为 0.352), 即当 Niño3.4 指数增大时, 流套入侵减弱, Niño3.4 指数减小时, 流套入侵增强, 这与 ENSO 对吕宋海峡处纬向风应力的调控作用有关, 而当 PDO 指数处于正位相时, Niño3.4 指数与黑潮流套入侵流量的相关系数仅为 $-0.07$  (90% 显著性检验为 0.549), 两者之间不存在显著相关; PDO 指数与黑潮分支入侵流量呈正相关, 相关系数为 0.50 (90% 显著性检验为 0.296), 这与 PDO 对副热带海区风应力旋度调控引起的北赤道流分叉点位置变化有关。②在年代际尺度上, 在 PDO 指数暖(冷)位相期间, 流套入侵流量与分支入侵流量均增大(减弱), 两类入侵流量与 PDO 指数的相关系数分别为 0.57 和 0.72 (90% 显著性检验为 0.296), 这与 PDO 造成的副热带海区风应力旋度的年代际变化造成的北赤道流分叉点位置变化密切相关。本研究量化并统计了不同黑潮入侵形态的流量及其年际和年代际变化规律, 对于进一步理解黑潮入侵南海的时空演变和动力机制, 提升黑潮入侵南海的可预报性具有一定的促进作用。

**关键词:** 黑潮入侵; 厄尔尼诺-南方涛动; 太平洋年代际振荡; 年际变异; 年代际变异

中图分类号: P731.21

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2025)02-0294-14

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20240614001

**引用格式:** 杜小彤, 梁朋, 杨丽娜, 2025. 基于卫星地转流线的表层黑潮入侵南海的年际与年代际变化[J]. 海洋科学进展, 43(2): 294-307. DU X T, LIANG P, YANG L N, 2025. Interannual and decadal variation of the surface Kuroshio intrusion into the South China Sea based on satellite geostrophic streamlines[J]. Advances in Marine Science, 43(2): 294-307.

黑潮是源自太平洋北赤道流的一支流速强劲的西边界流, 它携带高温高盐的太平洋副热带水向北流动。当黑潮流经吕宋海峡时, 由于失去陆地的支撑, 部分黑潮水向西穿过海峡进入南海, 形成黑潮入侵南海 (Nitani, 1972)。在吕宋海峡处黑潮可能存在流套入侵、分支入侵等多种入侵形式 (Nan

收稿日期: 2024-06-14

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42006023 和 41706033); 国家重点基础研究发展计划项目 (2022YFC3103104-01); 广东海洋大学博士启动项目 (R20020 和 R20023)

作者简介: 杜小彤 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事大洋环流时空演变及动力机制方面研究。

E-mail: dxt\_1999@163.com

\*通信作者: 梁朋 (1988—), 男, 讲师, 博士, 硕士生导师, 主要从事西北太平洋和南海海区数值模拟及可预报性、环流时空变化及动力机制方面研究. E-mail: liangpeng0405@gmail.com

(责任编辑 李燕)

et al, 2011, 2015; Huang et al, 2016; 宋星林, 2020), 而黑潮入侵的形式与强度变化对于南海东北部的局地混合(Yang et al, 2013)、温盐平衡(Yang et al, 2019; Wang et al, 2021)、内波传播(Park et al, 2013; Li et al, 2016; Yu et al, 2023)、中尺度涡活动(Li et al, 1998; Qian et al, 2018; Liu et al, 2019; Feng et al, 2020; Wang et al, 2020a; Sun et al, 2021)、大尺度环流(Chern et al, 2010; Cai et al, 2019; Jiang et al, 2020; Wang et al, 2020b; Quan et al, 2021; Wang et al, 2023)以及海洋浮游植物和叶绿素(Guo et al, 2017; Li et al, 2017; Chang et al, 2022; Ding et al, 2022)分布等海洋动力和生态过程具有很强的调制作用。考虑到黑潮入侵对于南海环境的重要影响, 学者对其变化规律和动力机制开展过大量研究。在季节尺度上, 大量观测和数值模拟结果表明, 黑潮入侵南海大多发生于冬季, 而在夏季黑潮入侵程度一般较弱或没有入侵发生(Shaw et al, 1994; Farris et al, 1996; Qu et al, 2000; Gan et al, 2006; Liang et al, 2008; Liu et al, 2016; 孙豪为, 2016; Guo et al, 2019; Zhong et al, 2021; 刘玉民等, 2023)。在年际尺度上, 部分研究认为黑潮入侵南海主要受到厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)的控制, 具体表现为当厄尔尼诺发生时, 黑潮入侵增强, 当拉尼娜发生时, 黑潮入侵减弱(Chen et al, 2010; Yuan et al, 2014; Huang et al, 2015; Lin et al, 2024), 然而也有研究发现黑潮入侵的强度在厄尔尼诺年较弱, 在拉尼娜年较强(Ho et al, 2004); 此外, 除去 ENSO 的影响, 太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)对于黑潮入侵南海的年际变化也有一定的调控作用(Wu, 2013)。受观测数据时间长度的限制, 当前对黑潮入侵年代际尺度变异的研究较少, 现有的研究表明黑潮入侵南海的年代际变化可能与南海内部和吕宋海峡以东风场异常(刘钦燕等, 2007)、吕宋海峡两侧压强梯度(Nan et al, 2015)及 PDO(Yu et al, 2013; 杨龙奇等, 2014)的年代际变化有关。

综上所述, 前人针对黑潮入侵南海的研究很大程度上提高了人们关于黑潮入侵时空变化规律和动力机制的认识。然而, 由于对黑潮入侵的定义方法和使用数据等的不同, 前人在黑潮入侵的年际和年代际变化规律仍然存在一些争议, 且过往研究往往只关注一种入侵形式, 未能给出黑潮多种入侵路径的变化规律。本研究基于卫星遥感观测数据, 在 Zhong 等(2021)提出的基于流线量化不同形式黑潮入侵流量的方法基础上, 量化不同形式黑潮入侵南海的强度, 统计其年际和年代际变化规律, 并对其变化机制进行讨论。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

本文所用的卫星数据为法国国家空间研究中心卫星海洋学存档数据中心(Archiving Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic, AVISO)提供的 1993 年至 2023 年的海流观测数据(<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/sea-surface-height-products/global.html>), 覆盖范围为 82°S~82°N, 空间分辨率为 0.25°×0.25°, 时间分辨率为 1 d。该数据已完成潮汐与大气压修正, 还对仪器测量误差进行了更精确的处理, 变量包括海表面动力高度和海表面地转流速, 是到目前为止唯一能够精确地把多颗卫星高度计资料融合在一起的数据, 为海洋表层以及次表层的研究提供了有价值、大范围、长时间序列的卫星测高数据(Le Traon et al, 2001)。本文主要使用其中的地转流数据用于确定每日黑潮入侵南海的流线类型及流量。

本文所用的风场数据来自第五代欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)全球气候大气再分析(ECMWF-ERA5)的月平均 10 m 处的风场(<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=download>)。其水平分辨率为 0.25°×0.25°, 时间范围从 1940 年 1 月到 2023 年 12 月, ERA5 根据自 1979 年以来的历史观测数据, 使用综合预报系统(Integrated Forecasting System, IFS)模型及其数据同化系统对大气进行的最新全球重新分析, 该

数据可用于黑潮流域相关研究。

文章所用的 PDO 指数与 Niño3.4 指数, 均由美国国家海洋和大气管理局地球系统研究实验室 (NOAA ESRL) 发布, 时间范围分别为 1940—2023 年以及 1870—2023 年 ([https://psl.noaa.gov/gcos\\_wgsp/Timeseries/Data/nino34.long.anom.data](https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Data/nino34.long.anom.data))。PDO 指数是北太平洋 (20°N 以北) 区域月平均海表温度异常 (Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA) 使用经验正交函数分析方法得到的第一主分量的标准化序列。PDO 指数的正负值分别反映该主模态的不同位相, 其负值表示北太平洋西部和中部海表温度异常变暖, 而赤道东太平洋和北美西部沿岸海域异常变冷; Niño3.4 指数是一个用来表征 ENSO 现象的气候指数, 是监测 ENSO 现象强度和状态的重要工具, 反映了位于赤道太平洋中东部区域 (170°~120°W, 5°N~5°S) 的海表面温度异常, 其负值则定义为该区域海表温度较气候态平均值偏冷, 通常反映拉尼娜事件的发生, 可用于研究黑潮入侵南海在不同时间尺度上的变异特征 (Huang et al, 2015)。

## 1.2 方法

本文在开展研究时, 选取的时间范围为 1993 年 1 月至 2022 年 12 月。在进行黑潮不同形式路径区分时使用 Zhong 等 (2021) 提出的基于流线的路径分类方法。这种分类方法将源于 (122°~124°E, 19°N) 断面的黑潮各条流线划分为 3 种形态, 分别为: 跨越入侵流线 (Leap), 即不与 120°E 相交, 直接向北到达 22°N 以北的流线 (图 1a); 流套入侵流线 (Loop), 定义为与 120°E 两次相交, 即流入南海后再从海峡北部流出南海的流线 (图 1b); 分支入侵流线 (Leak), 定义为只与 120°E 相交一次且不跨越 22°N, 即流入南海后不再流出南海的流线 (图 1c)。这种基于流线的分类方法可以更好地量化不同路径的黑潮入侵南海的流量, 尤其对黑潮同时存在多种不同形态流线的情景更为有效 (图 1d)。由于跨越路径的黑潮不会进入南海, 因此我们只讨论流套入侵与分支入侵两种形态流线的时空变化特征。

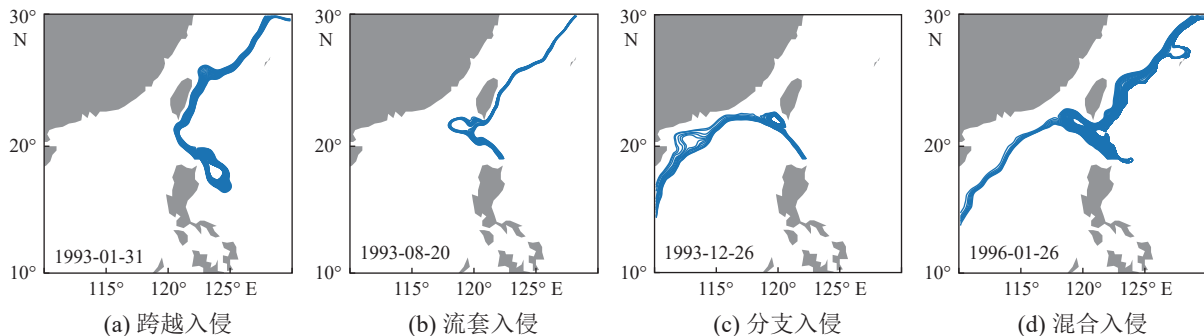


图 1 黑潮入侵不同类型流线的分类结果

Fig. 1 The classification results of the Kuroshio intrusion with different types of streamlines

为了评估黑潮入侵与北赤道流分叉点位置的关系, 本研究利用 AVISO 反演的地转流速数据计算了北赤道流分叉点位置。在具体计算过程中, 将沿西边界 2 个经度带内的平均经向流速为零的纬度定义为分叉点位置。此外, 在计算黑潮入侵南海流量时, 同样使用了 AVISO 地转流数据, 其计算公式如下:

$$\text{INT}_{\text{loop}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{loop}}} v_{\text{loop}}(i) dx, \quad (1)$$

$$\text{INT}_{\text{leak}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{leak}}} v_{\text{leak}}(i) dx, \quad (2)$$

式中:  $\text{INT}_{\text{loop}}$  ( $\text{INT}_{\text{leak}}$ ) 为黑潮流套 (分支) 入侵南海的流量;  $v_{\text{loop}}$  ( $v_{\text{leak}}$ ) 为黑潮流套 (分支) 流线在起点处

的经向流速;  $n_{\text{loop}}(n_{\text{leak}})$  为黑潮流套(分支)流线的流线数量;  $i$  为处于某形态的流线数量;  $dx$  为两条流线在起点处的纬向间距。

风应力  $\tau$  的计算式为:

$$\tau = \rho_{\text{air}} C_d |u_a - u_o| (u_a - u_o) \approx \rho_{\text{air}} C_d |u_a| (u_a - u_o), \quad (3)$$

式中:  $\rho_{\text{air}}$  为空气密度(本文取  $1.23 \text{ kg/m}^3$ );  $C_d$  为风应力拖曳系数;  $u_a$  与  $u_o$  分别为海面  $10 \text{ m}$  高度处风速与海表流速。风应力旋度  $\text{curl}$  的计算式为:

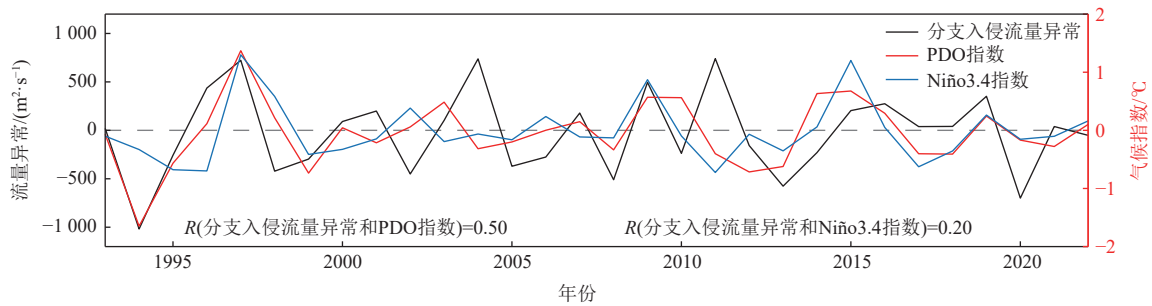
$$\text{curl} = \frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y}, \quad (4)$$

式中:  $x$  与  $y$  则分别为纬向和经向坐标;  $\tau_x$  与  $\tau_y$  分别为纬向与经向风应力。

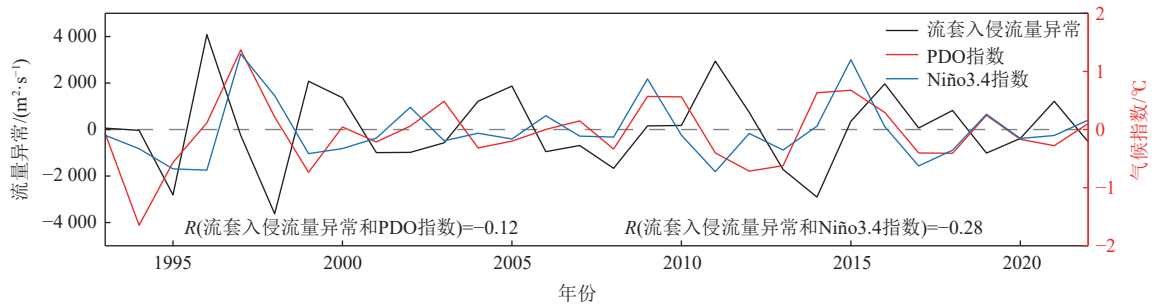
## 2 表层黑潮不同入侵形态的年际变异

### 2.1 表层黑潮不同入侵形态与气候指数的关系

为了研究表层黑潮不同入侵形态的年际变化规律, 本文将 1993—2022 年间黑潮入侵南海流量与气候指数均年平均后, 进行 8 年的高通滤波, 以去除年代际和季节信号, 最终将处理后的入侵流量异常(异常小于气候态平均为负值, 大于气候态平均为正值)与气候指数进行了对比(图 2)。结果表明, 在年际尺度上, 分支入侵流量异常与 PDO 指数之间存在显著相关, 相关系数可达 0.50(90% 显著性检验相关为 0.296), 而与 Niño3.4 指数的相关性不显著, 相关系数仅为 0.20(图 2a)。因此太平洋年代际振荡对分支入侵流量的年际变异具有很强的调节作用, 当 PDO 指数处于暖位相时, 分支入侵流量增大, 反之亦然。



(a) 分支入侵流量异常与气候指数



(b) 流套入侵流量异常与气候指数

注: 数据均进行了 8 年的高通滤波。

图 2 气候指数与分支入侵及流套入侵流量异常的对比

Fig. 2 Comparison between climate indices and the transport anomalies of leak intrusion and loop intrusion

不同于分支入侵流量,流套入侵流量异常与PDO指数和Niño3.4指数的相关均不显著,相关系数仅分别为-0.12和-0.28(图2b)。然而从图2b可以发现,当PDO指数处于不同位相时,流套入侵流量异常与Niño3.4指数之间可能存在不同的关系。为进一步研究流套入侵流量与ENSO之间的关系,本文将PDO指数大于1/8标准差(小于-1/8标准差)的年份划分为正(负)PDO年,基于该标准,所研究时间段内的30年共划分得到21个(8个)负(正)PDO年。然后分别将正、负PDO年的流套入侵流量异常与Niño3.4指数进行对比可以发现,处于PDO指数负位相期间时,流套入侵流量异常与Niño3.4指数的相关系数可达-0.55(90%显著性检验相关为0.352,图3a);而处于PDO指数正位相(大于1/8个PDO标准差)期间时,流套入侵流量异常与Niño3.4指数的相关系数仅为-0.07(90%显著性检验相关为0.549,图3b)。因此,只有在PDO指数负位相期间,ENSO活动对流套入侵流量的年际变异具有明显的调控作用。具体表现为,在PDO指数负位相期间,Niño3.4指数增大造成流套入侵减弱,反之则造成流套入侵增强,这可能是由于在这段时期ENSO对亚洲季风的影响更为明显,由此导致的风应力的变化会对入侵流量产生一定影响(Wu, 2013)。为了测试此结论对PDO正、负年选取标准的敏感性,本文还分别尝试使用1/6和1/4标准差作为判断标准,结果与上述结果类似。但是当标准取为1/2标准差时,处于PDO指数负位相期间的个例减少(14个个例),此时流套入侵流量异常与Niño3.4指数相关无法通过显著性检验(相关系数为-0.33,90%显著性检验相关为0.426),故而在PDO指数负位相期间,ENSO与黑潮流套入侵南海年际变化的关系可能需要更长时间尺度的数据进行进一步验证。

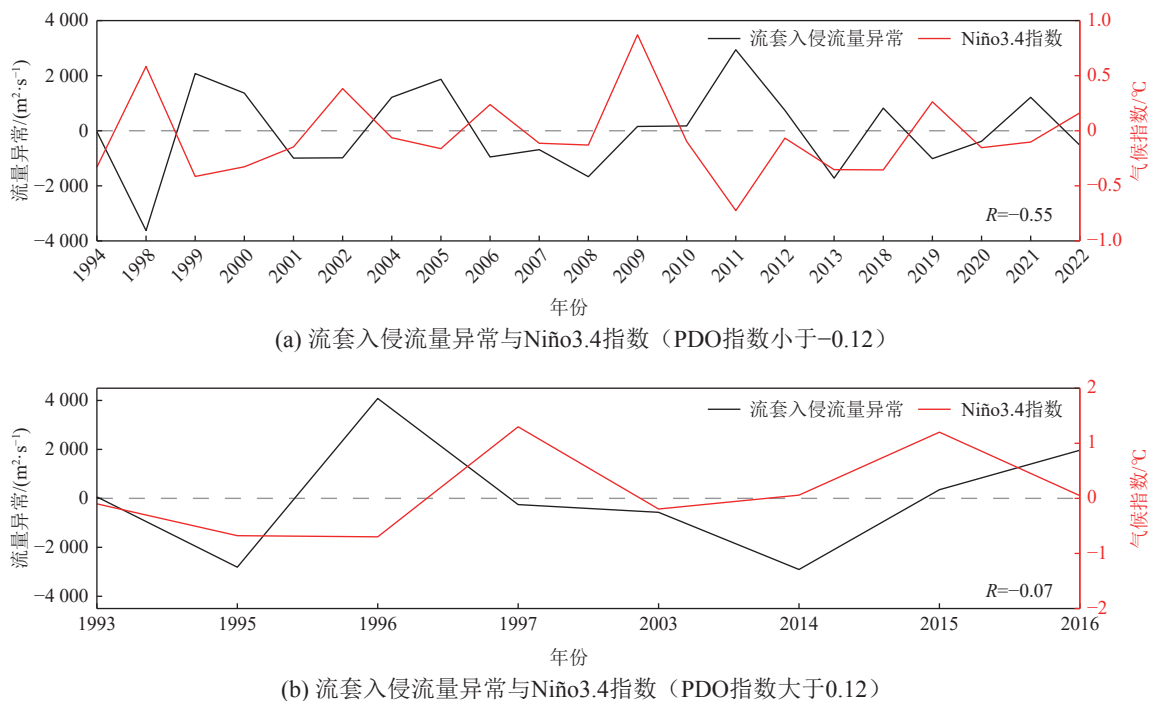
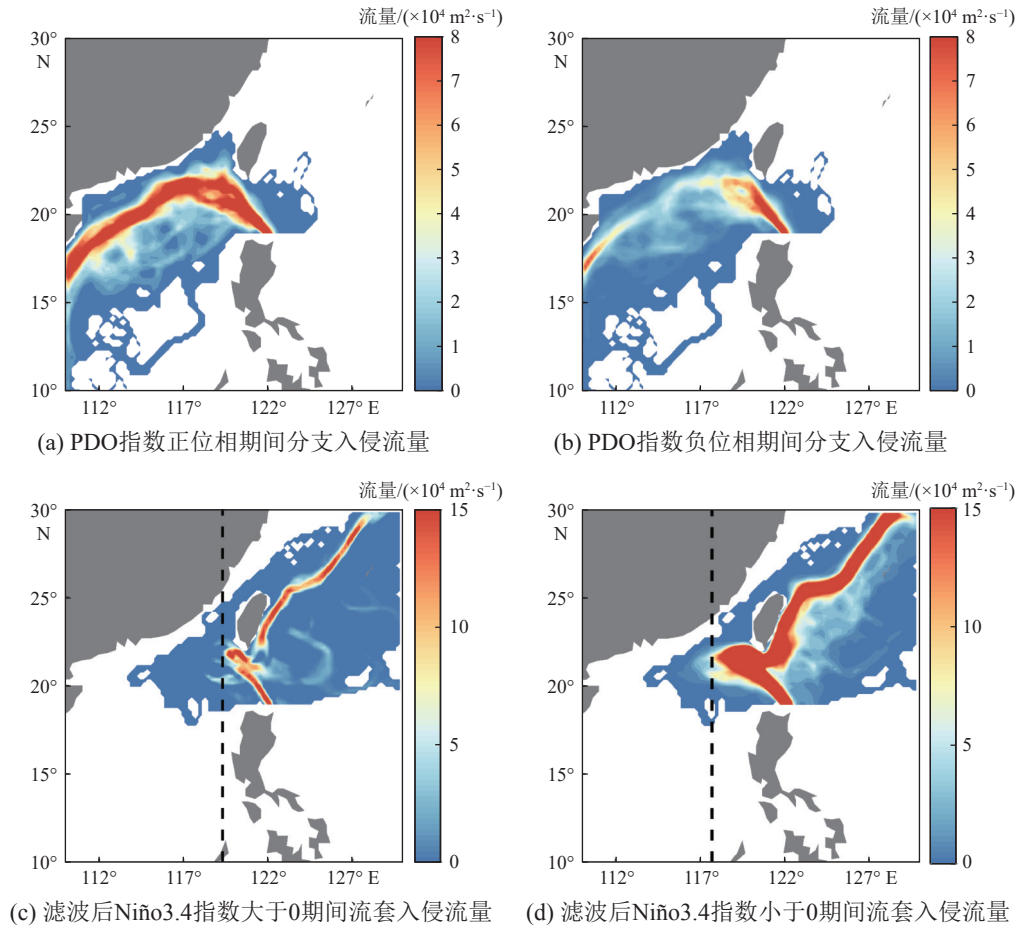


图3 PDO指数不同位相期间流套入侵流量异常与Niño3.4指数的对比

Fig. 3 Comparison of loop intrusion transport anomaly with the Niño3.4 index during different phases of the PDO

为了探究PDO和ENSO对于黑潮入侵空间结构的影响,计算得出1993—2022年PDO指数正位相和负位相期间分支入侵流量的合成结果如图4a和图4b所示。合成结果表明,PDO指数正位相期间分支入侵流量异常明显大于PDO指数负位相期间的分支入侵流量,这是由于当PDO指数处于正位相时,更多的黑潮携带太平洋的水体向西穿过吕宋海峡进入南海内部,汇入南海西边界流,增大了南海西边界流的流量。由于黑潮流套入侵年际变化主要在负PDO年时受到ENSO活动的控制,

因此仅在 PDO 指数负位相期间,对 Niño3.4 指数为正值和负值时的流套入侵流量进行了合成(图 4c 和图 4d)。合成结果表明,当年际 Niño3.4 指数为正值时,黑潮流套入侵的流量较小,进入吕宋海峡后入流角度较小,在 20°N 左右向西穿过海峡,西伸至约 119°18'E 后,发生回流流出海峡;而当年际 Niño3.4 指数为负值时,流套入侵流量和入流角度均较大,向西可以延伸至 117°42'E 左右。



注:黑色虚线指示黑潮主体最远延伸的经度。

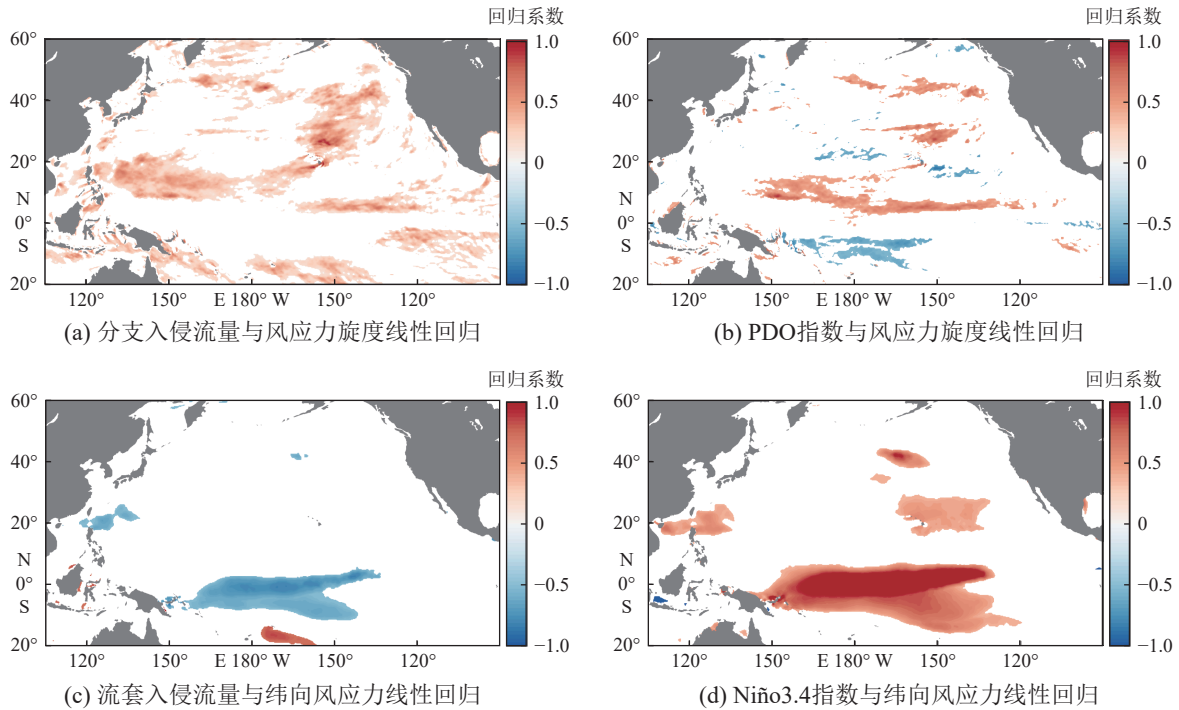
图 4 分支入侵流量与流套入侵流量在不同时期的合成结果

Fig. 4 Composite diagrams of leak intrusion transport and loop intrusion transport in different periods

## 2.2 风强迫对表层黑潮不同入侵形态的作用

刘玉民等(2023)研究表明流套入侵在年际尺度上受到局地风场的调控,北赤道流则与分支入侵在年际尺度上存在明显联系。分析黑潮分支入侵和 PDO 指数与风应力旋度的相关系数可以发现,分支入侵流量和 PDO 指数均与菲律宾以东海区风应力旋度存在显著的正相关关系(图 5a),当 PDO 指数为正时,菲律宾以东海区的风应力旋度产生正异常,正的风应力旋度引发负的海表面高度向西传播,造成了北赤道流分叉点位置向北移动,黑潮流量减少,最终使得黑潮分支入侵增强,这与 Wu(2013)的结论相似。黑潮流套入侵流量与吕宋海峡流域及赤道太平洋海区纬向风应力呈现显著负相关(图 5c),Niño3.4 指数则与这些海区的风应力呈现正相关(图 5d)。在年际尺度上,当 Niño3.4 指数增大时,吕宋海峡海区冬季的西向风应力减弱,流套入侵减弱,反之亦然。这与 Liang 等(2019)基于 ROMS 模式和条件非线性最优扰动方法发现黑潮流套入侵与吕宋海峡的纬向风应力呈强相关,

且流套入侵的前期征兆同样表现为吕宋海峡的局地信号的结论可以相互印证。综上所述，黑潮分支入侵和流套入侵的年际变化分别受到 PDO 引起的菲律宾以东海区风应力旋度和 ENSO 造成的吕宋海峡局地纬向风应力变化的控制。

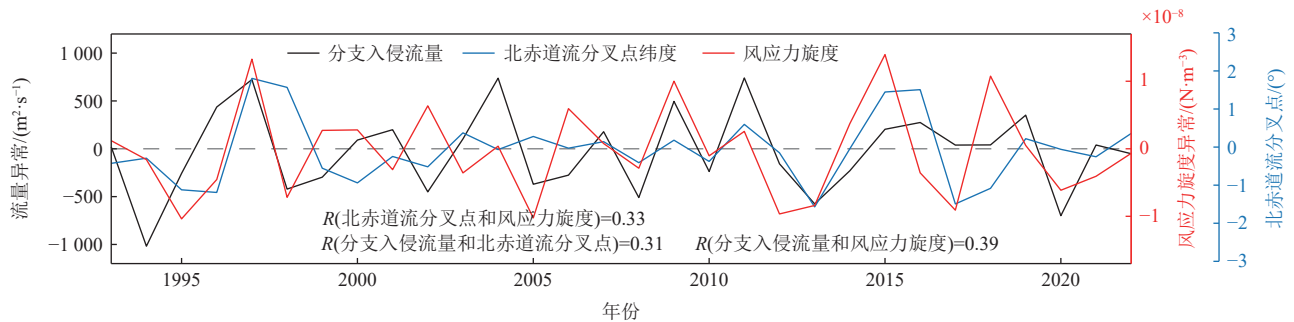


注：图中显示 99% 置信区间的结果。

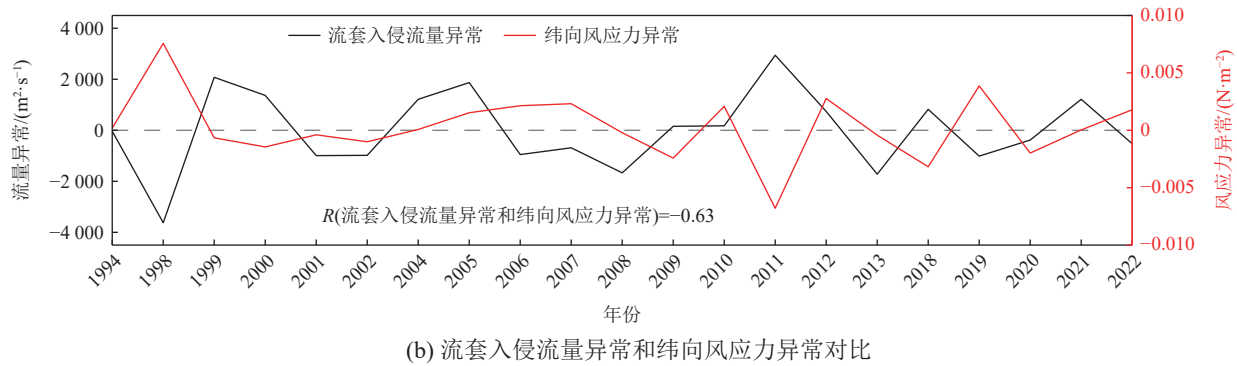
图 5 入侵流量及气候指数与风场的线性回归结果

Fig. 5 Linear regression diagrams of intrusion transport and climate indices against wind field

为了进一步探讨黑潮流套入侵和分支入侵年际变化的动力机制，图 6 分别为黑潮流套入侵和分支入侵年际变化局地纬向风应力和副热带风应力旋度的关系。该结果表明，北赤道流分叉点位置异常与副热带风应力旋度异常和黑潮分支入侵流量异常的相关系数分别为 0.33(90% 显著性检验相关为 0.296)和 0.31。因此，副热带风应力旋度引起北赤道流分叉点位置的南北偏移，进而改变上游段黑潮流量，使得分支入侵流量发生改变(图 6a)。而流套入侵流量异常与吕宋海峡周围纬向风应力异常的相关系数可达-0.63(90% 显著性检验相关为 0.352)，可见对于黑潮流套入侵流量而言，亚洲季风的变化是影响其流量年际变化的重要因素。



(a) 分支入侵流量异常、北赤道流分叉点纬度异常和风应力旋度异常对比



注: 图 a 选取(130°E~180°, 9°~17°N)范围的平均风应力旋度, 图 b 选取(120°~130°E, 18°~21°N)范围的平均纬向风应力与流量进行对比, 相关系数均通过 90% 显著性检验。

图 6 分支入侵流量异常、北赤道流分叉点纬度异常和风应力旋度异常分布及流套入侵流量异常和纬向风应力异常的对比

Fig. 6 Comparison of leak intrusion transport anomaly, latitude anomaly of the North Equatorial Current bifurcation and wind stress anomaly

### 3 表层黑潮不同入侵形态的年代际变异

#### 3.1 表层黑潮不同入侵形态与 PDO 指数的关系

为研究表层黑潮不同入侵形态的年代际变异, 本文将 1993—2022 年间入侵流量与 PDO 指数 (ENSO 周期主要为 2~7 年, 因此本文不考虑 ENSO 在年代际尺度上对入侵流量的影响) 分别进行 8 年的低通滤波并将结果进行对比 (图 7)。在年代际尺度上, 黑潮分支入侵与流套入侵流量异常与 PDO 指数之间存在着显著的正相关, 相关系数分别达到 0.72 和 0.57 (90% 显著性检验相关为 0.296)。因此, 太平洋年代际振荡对分支入侵流量与流套入侵流量的年代际变异都具有很强的调节作用, 具体表现为, 当 PDO 指数处于暖相位时, 入侵流量增大, 反之亦然。

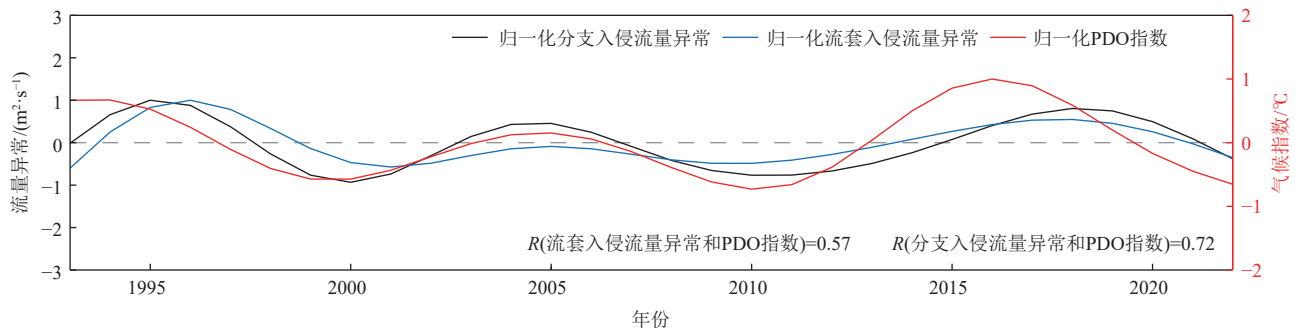


图 7 分支入侵、流套入侵流量异常和 PDO 指数的对比

Fig. 7 Comparison between the transport anomalies of leak intrusion and loop intrusion and the PDO index

将 1993—2022 年 PDO 指数正位相和负位相期间的分支入侵流量以及流套入侵流量进行合成, 并进一步分析 PDO 对黑潮入侵空间结构的影响 (图 8)。合成结果表明: 当 PDO 指数处于正位相时, 分支和流套入侵流量增强, 分支入侵携带更多的水体进入南海, 汇入南海西边界流, 流套入侵可以西伸到 117°42'E 附近, 而当 PDO 指数处于负位相时, 分支和流套入侵流量均呈现明显减弱, 汇入南海西边界流的黑潮水减少, 流套入侵的范围向东缩小。

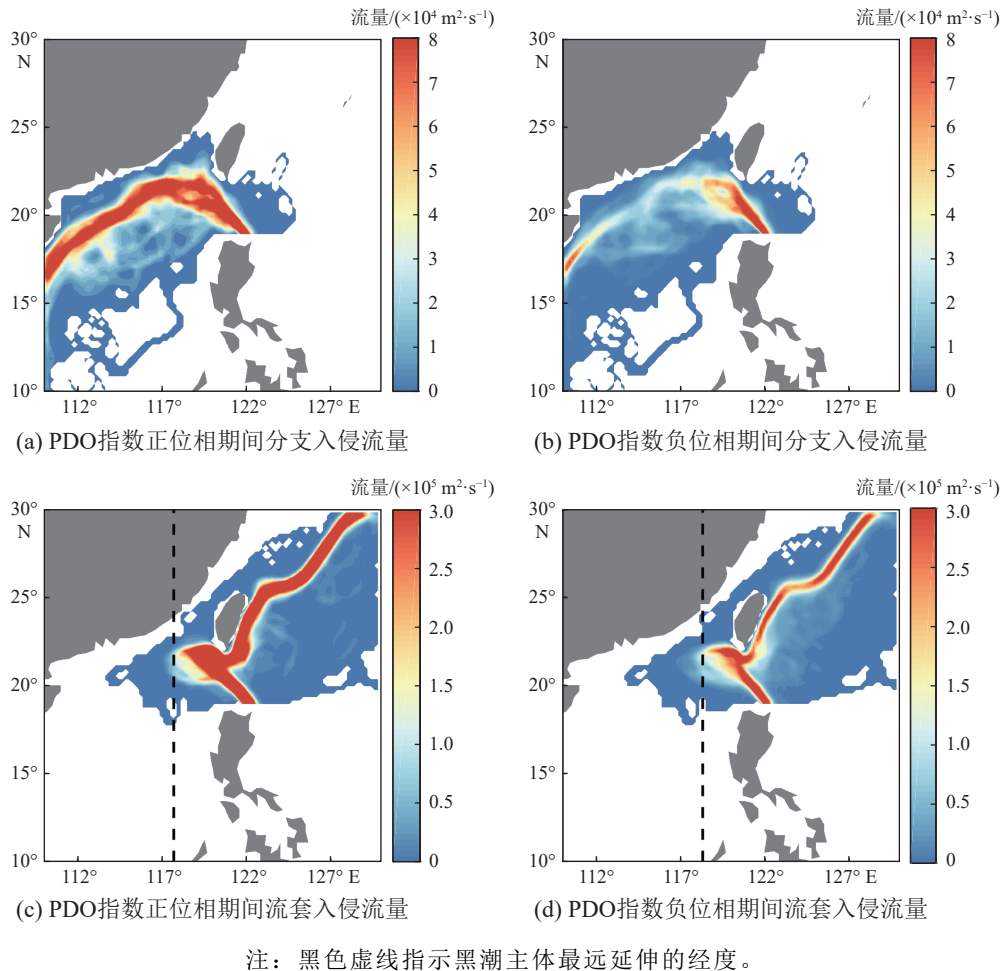


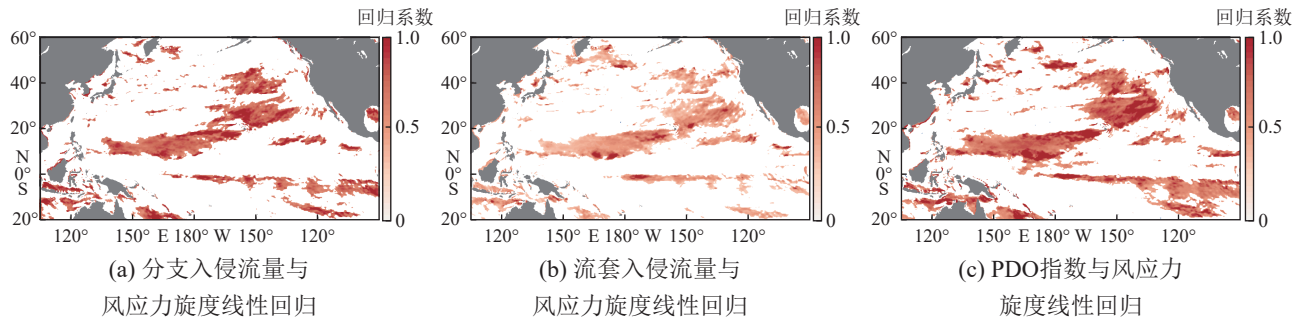
图 8 分支入侵流量与流套入侵流量在 PDO 不同位相时期的合成结果

Fig. 8 Composite diagrams of leak intrusion transport and loop intrusion transport in different phases of the PDO

### 3.2 风应力旋度对表层黑潮不同入侵形态的影响

Chen 等(2012)研究认为北赤道流分叉点位置的长期变化与  $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$  热带太平洋海区风应力旋度的变化有关。从线性回归图中可看出分支和流套入侵流量以及 PDO 指数均与西北太平洋  $5^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$  风应力旋度的变化呈正相关(图 9a 和图 9c)。因此当 PDO 指数处于正(负)位相时,该区域正(负)风应力旋度的变化造成的负(正)海表面高度异常,引起北赤道流分叉点位置的向北(南)移动,进而改变黑潮流量的大小并影响黑潮入侵的幅度。

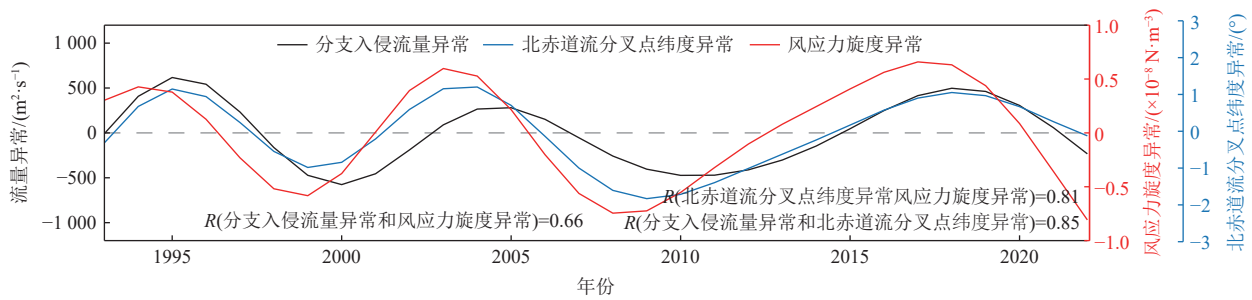
为进一步研究黑潮入侵年代际变化的动力机制,图 10 中展示了黑潮分支和流套入侵南海的年代际变化与风应力旋度和北赤道流分叉点位置的关系,结果表明副热带风应力旋度异常与北赤道流分叉点位置异常的相关系数为 0.81(90% 显著性检验相关为 0.296),与此同时北赤道流分叉点位置异常与分支入侵和流套入侵流量异常的相关系数分别为 0.85 和 0.62,均呈显著的正相关。因此对于黑潮入侵流量的年代际变化而言,副热带风应力旋度引起北赤道流分叉点位置的南北偏移,进而改变上游段黑潮流量,使得入侵流量发生改变。



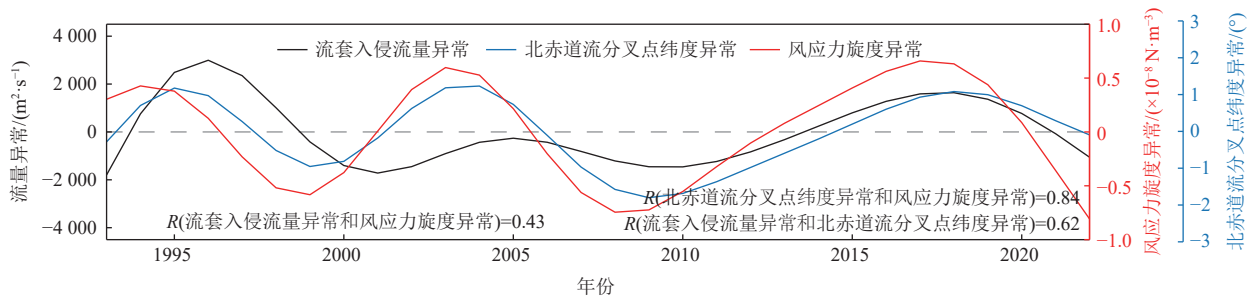
注: 图中显示 99% 置信区间的结果。

图 9 流套入侵流量、分支入侵流量及 PDO 指数与风应力旋度的线性回归结果

Fig. 9 Linear regression diagrams of loop intrusion transport, leak intrusion transport and PDO index against wind stress curl



(a) 分支入侵流量异常、北赤道流分叉点纬度异常及风应力旋度异常对比



(b) 流套入侵流量异常、北赤道流分叉点纬度异常及风应力旋度异常对比

注: 图中选取 ( $130^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}$ ,  $9^{\circ} \sim 18^{\circ}\text{N}$ ) 范围的平均风应力旋度, 相关系数均通过 90% 显著性检验。

图 10 分支入侵和流套入侵流量异常分别与北赤道流分叉点纬度异常及风应力旋度异常的对比

Fig. 10 Comparison of the transport anomalies of leak intrusion and loop intrusion with latitude anomaly of the North Equatorial Current bifurcation and wind stress curl anomaly

### 4 结 论

本研究利用 1993—2022 年期间的 AVISO 卫星数据, 将源自 ( $122^{\circ} \sim 124^{\circ}\text{E}$ ,  $19^{\circ}\text{N}$ ) 范围内的黑潮流线划分为跨越入侵、流套入侵以及分支入侵流线, 并统计分析了流套和分支入侵南海流量的年际和年代际变化, 得到以下主要结论。

1) 在年际尺度上: ① PDO 对分支入侵流量的年际变异具有显著影响, 具体表现为, 当 PDO 暖(冷)位相期间, 分支入侵流量增大(减小), PDO 对分支入侵年际变化的影响主要通过调节菲律宾

以东海区风应力变化实现, 可通过副热带风应力旋度引起北赤道流分叉点的南北偏移, 使得上游段黑潮流量发生变化, 进而改变分支入侵流量; ②对于黑潮流套入侵, ENSO 活动仅在 PDO 指数负位相期间对其流量的年际变异具有显著影响, 具体表现为, 当 Niño3.4 指数增大(减小)时, 流套入侵流量减小(增大); 但是在 PDO 指数正位相时, ENSO 对流套入侵几乎没有影响, 流套入侵的年际变化主要与 PDO 负位相时 ENSO 对吕宋海峡周围纬向风应力的影响有关, 受 ENSO 影响的亚洲季风变化导致流套入侵流量的变化。PDO 指数处于不同位相时 ENSO 对流套入侵南海的调控作用不同的具体机制并非本文研究的主要内容, 因此, 文中并未对其进行详细讨论, 此结论和机制需要更长时间尺度的数据进行验证和细致研究。

2)在年代际尺度上, 当 PDO 处于暖(冷)位相时, 流套入侵流量与分支入侵流量均增大(减弱), 黑潮入侵南海增强(减弱)。黑潮入侵南海的年代际变化主要受到 PDO 引起的菲律宾以东海区风应力旋度的控制, 该流域风应力旋度引起北赤道流分叉点的南北偏移, 进而改变上游段黑潮流量, 使得入侵流量发生改变。

Sheremet(2001)研究结果表明, 西边界流流经陆地裂口时, 其入侵强度与本身的流量密切相关, 具体表现为西边界流流量增强(减弱)时, 西边界流通过裂口的入侵减弱(增强)。因此除本文重点关注的大气强迫外, 黑潮上游段流量对黑潮入侵南海的强度也存在潜在影响, 本文以(122°~124°E, 16°N)表层经向地转速度的积分近似评估了上游段黑潮流量并初步统计了其黑潮入侵南海的影响, 统计结果表明, 在年际尺度上黑潮上游段流量与流套分支和流套入侵的相关系数分别为-0.551和-0.116(90%显著性检验为0.296), 而在年代际尺度上与二者的相关系数分别达到-0.751和-0.443, 即黑潮入侵(尤其是黑潮的分支入侵)强度与黑潮上游段流量呈现负相关, 这与 Sheremet(2001)的结论类似。然而, 需要特别指出的是, 此处所使用的数据忽略了风生埃克曼流过程, 且无法刻画流速的垂向变化。基于此数据无法准确量化上游段黑潮的流量, 因此, 关于黑潮强度变化对吕宋海峡处黑潮路径的影响及其动力机制的研究, 未来仍需使用三维的、结合多要素海洋观测的数据加以验证和讨论。

## 参考文献 (References):

- 刘钦燕, 王东晓, 谢强, 等, 2007. 印尼贯穿流与南海贯穿流的时代际变化特征及机制[J]. *热带海洋学报*, 26(6): 6. LIU Q Y, WANG D X, XIE Q, et al, 2007. Decadal variability of Indonesian throughflow and South China Sea throughflow and its mechanism[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 26(6): 6.
- 刘玉民, 张志伟, 张新城, 等, 2023. 基于卫星高度计资料的黑潮入侵南海流径的时间变化规律研究[J]. *海洋与湖沼*, 54(4): 951-962. LIU Y M, ZHANG Z W, ZHANG X C, et al, 2023. Temporal variation of the Kuroshio intrusion path into the South China Sea based on satellite altimeter data[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 54(4): 951-962.
- 宋星林, 2020. 吕宋海峡水动力过程及其对黑潮入侵路径变化响应的数值模拟研究[D]. 北京: 国家海洋环境预报中心. SONG X L, 2020. Numerical simulation of the hydrodynamic process of the Luzon Strait and its response to the Kuroshio invasion path[D]. Beijing: National Marine Environment Forecasting Center.
- 孙豪为, 2016. 黑潮入侵台湾海峡的季节和年际变化及其物理机制研究[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所. SUN H W, 2016. Seasonal and inter-annual variation of Kuroshio intrusion into the Taiwan Strait and its physical mechanisms[D]. Xiamen: Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration.
- 杨龙奇, 许东峰, 徐鸣泉, 等, 2014. 黑潮入侵南海的强弱与太平洋年代际变化及厄尔尼诺-南方涛动现象的关系[J]. *海洋学报*, 36(7): 17-26. YANG Q L, XU D F, XU M Q, et al, 2014. A study of correlation between Pacific Decadal Oscillation and El Niño-Southern Oscillation and the strength of Kuroshio intrusion into the South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 36(7): 17-26.
- CAI Z, GAN J, 2019. Coupled external-internal dynamics of layered circulation in the South China Sea: a modeling

- study[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(7): 5039-5053.
- CHANG Y, SHIH Y Y, TSAI Y C, et al, 2022. Decreasing trend of Kuroshio intrusion and its effect on the chlorophyll-*a* concentration in the Luzon Strait, South China Sea[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 59(1): 633-647.
- CHEN C T A, JAN S, HUANG T H, et al, 2010. Spring of no Kuroshio intrusion in the southern Taiwan Strait[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C8): C08011.
- CHEN Z, WU L, 2012. Long-term change of the Pacific North Equatorial Current bifurcation in SODA[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C6): C06016.
- CHERN C S, JAN S, WANG J, 2010. Numerical study of mean flow patterns in the South China Sea and the Luzon Strait[J]. *Ocean Dynamics*, 60(5): 1047-1059.
- DING X, LIU J, ZHANG H, et al, 2022. Phytoplankton community patterns in the northeastern South China Sea: implications of intensified Kuroshio intrusion during the 2015/16 El Niño[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(2): e2021JC017998.
- FARRIS A, WIMBUSH M, 1996. Wind-induced Kuroshio intrusion into the South China Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 52(6): 771-784.
- FENG B, LIU H, LIN P, 2020. Effects of Kuroshio intrusion optimization on the simulation of mesoscale eddies in the northern South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 39(3): 12-24.
- GAN J, LI H, CURCHITSER E N, et al, 2006. Modeling South China Sea circulation: response to seasonal forcing regimes[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C6): C06034.
- GUO L, XIU P, CHAI F, et al, 2017. Enhanced chlorophyll concentrations induced by Kuroshio intrusion fronts in the northern South China Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 44(22): 11565-11572.
- GUO J, ZHANG Z, XIA C, et al, 2019. Seasonal characteristics and forcing mechanisms of the surface Kuroshio branch intrusion into the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 38(1): 13-21.
- HO C R, ZHENG Q, KUO N J, et al, 2004. Observation of the Kuroshio intrusion region in the South China Sea from AVHRR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 25(21): 4583-4591.
- HUANG T H, CHEN C-T A, ZHANG W Z, et al, 2015. Varying intensity of Kuroshio intrusion into southeast Taiwan Strait during ENSO events[J]. *Continental Shelf Research*, 103: 79-87.
- HUANG Z, LIU H, HU J, et al, 2016. A double-index method to classify Kuroshio intrusion paths in the Luzon Strait[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 33(6): 715-729.
- LE TRAON P Y, DIBARBOURE G, DUCET N, 2001. Use of a high-resolution model to analyze the mapping capabilities of multiple-altimeter missions[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(7): 1277-1288.
- LI L, NOWLIN W D, JILAN S, 1998. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 45(9): 1469-1482.
- LI Q, WANG B, CHEN X, et al, 2016. Variability of nonlinear internal waves in the South China Sea affected by the Kuroshio and mesoscale eddies[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(4): 2098-2118.
- LI J, JIANG X, LI G, et al, 2017. Distribution of picoplankton in the northeastern South China Sea with special reference to the effects of the Kuroshio intrusion and the associated mesoscale eddies[J]. *Science of the Total Environment*, 589: 1-10.
- LIANG W D, YANG Y J, TANG T Y, et al, 2008. Kuroshio in the Luzon Strait[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C8): C08048.
- LIANG P, MU M, WANG Q, et al, 2019. Optimal precursors triggering the Kuroshio intrusion into the South China Sea obtained by the Conditional Nonlinear Optimal Perturbation approach[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(6), 3941-3962.
- LIN K, HAN T, ZHANG Y, et al, 2024. Influences of east Asian winter monsoon and El Niño-Southern Oscillation variability on the Kuroshio intrusion to the South China Sea over the past 60 years[J]. *Geophysical Research Letters*, 51(2): e2023GL104155.
- LIU T, XU J, HE Y, et al, 2016. Numerical simulation of the Kuroshio intrusion into the South China Sea by a passive

- tracer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 35(9): 1-12.
- LIU Z, CHEN X, YU J, et al, 2019. Kuroshio intrusion into the South China Sea with an anticyclonic eddy: evidence from underwater glider observation[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 37(5): 1469-1480.
- JIANG Y, ZHANG S, TIAN J, et al, 2020. An examination of circulation characteristics in the Luzon Strait and the South China Sea using high-resolution regional atmosphere-ocean coupled models[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(6): e2020JC016253.
- NAN F, XUE H, CHAI F, et al, 2011. Identification of different types of Kuroshio intrusion into the South China Sea[J]. *Ocean Dynamics*, 61: 1291-1304.
- NAN F, XUE H, YU F, 2015. Kuroshio intrusion into the South China Sea: a review[J]. *Progress in Oceanography*, 137: 314-333.
- NITANI H, 1972. Beginning of the Kuroshio[M]//STOMMEL H, YOSHIDA K. Kuroshio, its physical aspects. Tokyo: University of Tokyo Press, 129-163.
- PARK J H, FARMER D, 2013. Effects of Kuroshio intrusions on nonlinear internal waves in the South China Sea during winter[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(12): 7081-7094.
- QIAN S, WEI H, XIAO J G, et al, 2018. Impacts of the Kuroshio intrusion on the two eddies in the northern South China Sea in late spring 2016[J]. *Ocean Dynamics*, 68(12): 1695-1709.
- QU T, MITSUDERA H, YAMAGATA T, 2000. Intrusion of the North Pacific waters into the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C3): 6415-6424.
- QUAN Q, LIU Z, SUN S, et al, 2021. Influence of the Kuroshio intrusion on deep flow intraseasonal variability in the Northern South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(7): e2021JC017429.
- SHAW P T, CHAO S Y, 1994. Surface circulation in the South China Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 41(11): 1663-1683.
- SHEREMET V A, 2001. Hysteresis of a western boundary current leaping across a gap[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 31(5): 1247-1259.
- SUN Z, HU J, CHEN Z, et al, 2021. A strong Kuroshio intrusion into the South China Sea and its accompanying cold-core anticyclonic eddy in winter 2020-2021[J]. *Remote Sensing*, 13(14): 2645.
- WANG Q, ZENG L, CHEN J, et al, 2020a. The linkage of Kuroshio intrusion and mesoscale eddy variability in the Northern South China Sea: subsurface speed maximum[J]. *Geophysical Research Letters*, 47(11): e2020GL087034.
- WANG X, WEI Y, WU C, et al, 2020b. The profound influence of Kuroshio intrusion on microphytoplankton community in the northeastern South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 39(8): 79-87.
- WANG G, SUN S, TAN E, et al, 2021. A strong summer intrusion of the Kuroshio and residence time in the northern South China Sea revealed by radium isotopes[J]. *Progress in Oceanography*, 197: 102619.
- WANG Q, ZENG L, CHEN J, et al, 2023. Phase shift of the winter South China Sea western boundary current over the past two decades and its drivers[J]. *Geophysical Research Letters*, 50(10): e2023GL103145.
- WU C R, 2013. Interannual modulation of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) on the low-latitude western North Pacific[J]. *Progress in Oceanography*, 110: 49-58.
- YANG Q, ZHOU L, TIAN J, et al, 2013. The roles of Kuroshio intrusion and mesoscale eddy in upper mixing in the northern South China Sea[J]. *Journal of Coastal Research*, 30(1): 192-198.
- YANG Y, WANG D, WANG Q, et al, 2019. Eddy-induced transport of saline Kuroshio water into the northern South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(9): 6673-6687.
- YU K, QU T, 2013. Imprint of the Pacific Decadal Oscillation on the South China Sea throughflow variability[J]. *Journal of Climate*, 26(24): 9797-9805.
- YU Y, CHEN X, CAO A, et al, 2023. Modulation of internal solitary waves by the Kuroshio in the northern South China Sea[J]. *Scientific Reports*, 13(1): 6070.
- YUAN Y, TSENG Y H, YANG C, et al, 2014. Variation in the Kuroshio intrusion: modeling and interpretation of observations collected around the Luzon Strait from July 2009 to March 2011[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*,

119(6): 3447-3463.

ZHONG Y, ZHOU M, WANIEK J J, et al, 2021. Seasonal variation of the surface Kuroshio intrusion into the South China Sea evidenced by satellite geostrophic streamlines[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 51(8): 2705-2718.

## Interannual and Decadal Variation of the Surface Kuroshio Intrusion Into the South China Sea Based on Satellite Geostrophic Streamlines

DU Xiaotong<sup>1</sup>, LIANG Peng<sup>1,2,3,4</sup>, YANG Lina<sup>1,2,3,4</sup>

(1. *College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;*

2. *Laboratory for Coastal Ocean Variation and Disaster Prediction, College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;*

3. *Key Laboratory of Climate, Resources and Environment in Continental Shelf Sea and Deep Ocean (LCRE), Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;*

4. *Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, MNR, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China*)

**Abstract:** The Kuroshio intrusion (KI) has significant implications for the dynamics and ecological environment of the South China Sea (SCS). This study employs the satellite altimetry data and geostrophic streamline morphology of the Kuroshio to quantify the spatiotemporal changes of the looping and leaking intrusion transport of the Kuroshio into the SCS. The study also uses statistical methods to analyze the interannual and decadal variability of the KI in relation to the Pacific Decadal Oscillation (PDO) and the El Niño-Southern Oscillation (ENSO). The result indicates that: ①On the interannual timescale, when the PDO is in its negative phase, the ENSO activity is negatively correlated with the volume of the looping intrusion, and the correlation coefficient was  $-0.55$ , which means that as Niño3.4 index increases (decreases), the looping intrusion weakens (enhances). This is due to the regulatory role of ENSO on the zonal wind stress at the Luzon Strait, the change of the invasion transport is caused by the change of the Asian monsoon. When the PDO is in positive phase, there is no significant correlation between the ENSO and the looping intrusion, the correlation coefficient between them is merely  $-0.07$ . The PDO is positively correlated with the transport of the leaking intrusion, the correlation coefficient was  $0.5$ , which may be related to the position changes of the North Equatorial Current bifurcation caused by the influence of PDO on the wind stress curl over the subtropical gyre. ②On the decadal timescale, during the warm (cold) phase of PDO, both the transport of looping and leaking intrusion increase (decrease), the correlation coefficients with PDO were  $0.57$  and  $0.72$ , respectively, leading to an enhancement (weakening) of the KI into the SCS. This is closely related to the decadal changes in the wind stress curl caused by the PDO in subtropical region, which affects the location of the North Equatorial Current bifurcation, and then affects the change of the KI. The study quantifies and statistically analyzes the transports of the KI with different forms and their interannual and decadal variability, which can promote a better understanding of the mechanisms of the KI into the SCS and improve the predictability of such events.

**Keywords:** Kuroshio intrusion; interannual variation; decadal variation; El Niño-Southern Oscillation; Pacific Decadal Oscillation

**Received:** June 14, 2024