

# 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\*

刘玉民<sup>1</sup> 张志伟<sup>1,2</sup> 张新城<sup>2</sup> 孙忠斌<sup>2</sup> 商 玗<sup>2</sup> 赵 玮<sup>1,2</sup>

(1. 中国海洋大学三亚海洋研究院南海海洋立体观测与信息重点实验室 海南三亚 572024; 2. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室/深海圈层与地球系统前沿科学中心 山东青岛 266100)

**摘要** 黑潮入侵南海对南海的温盐平衡、环流、涡旋和局地气候等具有重要作用。基于吕宋海峡处黑潮不同流径的识别方法,对 1993~2021 年的卫星高度计资料进行识别,获取黑潮不同流径的发生时间,探究黑潮入侵南海流径的时间变化规律。结果表明:(1)黑潮主要以流套(Looping)和分支(Leaking)两种流径入侵南海,Leaking 流径发生的时长(710 周)和概率(46.9%)要远高于 Looping 流径(时长 218 周,概率 14.4%)。(2)Looping 流径和 Leaking 流径均可将高温高盐的西北太平洋水带入南海,Looping 流径下的平均吕宋海峡上层通量( $6.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ )略大于 Leaking 流径( $5.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ),Looping 和 Leaking 流径在  $4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s} \sim 6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  区间发生时间最长。(3)季节变化上,Looping 流径主要发生在冬季,Leaking 流径在冬半年均较强,夏季二者发生概率均较低。(4)Looping 流径和 Leaking 流径均具有显著的年际变化特征,Looping 流径在 1996 年发生时间最长,多达 26 周,在 2001 年几乎没有发生;Leaking 流径在 2005 年发生时间最长,多达 40 周,在 2013 年发生时间最短。(5)Looping 流径发生时长呈现 0.15 周/年上升的长期变化趋势,而 Leaking 流径则呈现-0.17 周/年下降的长期变化趋势,对于整个黑潮入侵时长则呈现下降的变化趋势。(6)Looping 流径在季节和年际变化上均受到局地风场的调控,与台湾西南的风应力旋度有着很好的对应关系;而 Leaking 流径与北赤道流位置在季节和年际尺度上均有着较好的对应关系。

**关键词** 黑潮入侵;流径;吕宋海峡;季节变化;年际变化

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyhz20221100314

黑潮起源于北赤道流,是北太平洋主要的西边界流,沿着菲律宾东部海岸向北流动(Nitani, 1972)。黑潮将大量的物质与热量输送到中纬度地区,对北太平洋气候变率具有重要的调节作用(Qiu *et al.*, 1996; Lien *et al.*, 2014; Hu *et al.*, 2015)。当向北的黑潮流经吕宋海峡时,由于吕宋海峡有一个 300 多公里的深缺口,往往会顺时针弯曲,并入侵南海东北部(Nitani, 1972; Shaw, 1989; Sheremet, 2001; Nan *et al.*, 2011, 2015; Wu *et al.*, 2016, 2017)。黑潮入侵作为南海贯穿流的重要组成部分(Fang *et al.*, 2005; Qu *et al.*, 2005, 2006),

被认为是驱动南海上层环流的主要因素之一(Xue *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2004, 2008)。黑潮携带的高温高盐太平洋水进入南海,对南海的热盐平衡(Zeng *et al.*, 2014, 2016)、能量、涡旋活动(Qu *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2013, 2017)以及海气相互作用(Qu, 2001)等具有重大影响。因此,开展黑潮入侵南海研究,对于提升南海环流的理解和局地气候的认识具有重要作用。

已有研究指出黑潮在吕宋海峡的流径呈现多样性与复杂性。仇德忠等(1984)发现在夏季发生西南季风时,南海北部存在一支自东向西的海流,海水具有

\* 国家重点研发计划, 2022YFC3105003 号; 国家自然科学基金, 42076004 号, 42222601 号, 42206015 号; 中央高校基本科研业务费, 202041009 号, 202013028 号; “泰山”学者计划, tsqn202103032 号。刘玉民, 硕士研究生, E-mail: liuyumin@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 孙忠斌, 博士后, E-mail: szb@ouc.edu.cn

收稿日期: 2022-11-30, 收修改稿日期: 2023-02-08

高盐的特性,认为这是黑潮的一个分支,便称为“黑潮南海分支”。李立等(1989)对黑潮入侵南海进行了分析,提出了“黑潮流套”的概念,指出黑潮进入南海后可能会以反气旋形式折回从而形成流套,反气旋涡可能从黑潮流套中脱离出来。Hu 等(2000)将黑潮入侵南海北部的环流分为:流环(ring)、延伸(extend)、流套(loop)和分支(direct branch)。Caruso 等(2006)进一步将其分为气旋式环流、反气旋脱落型、反气旋涡旋、分支和平均路径。Nan 等(2011)利用卫星数据和 HYCOM 数据分析了近十几年来海表环流的特征,将吕宋海峡处黑潮的流径总结为 3 类:跨越(Leaping)、流套(Looping)和分支(Leaking),这种基于长时间序列获取的黑潮流径分类得到了广泛的认可。

黑潮以多样化的流径入侵南海,这些流径同样具有显著的季节和年际变化。Nan 等(2015)和宋星林(2020)指出,Looping 流径在冬季发生的概率大于其他季节,Leaping 流径在夏季时发生的概率最大,且是整个夏季的主要形态,在其他季节中,Leaking 流径是主要的形态。在年际变化中,前人多针对黑潮入侵南海强度或吕宋海峡通量开展年际变化研究(Kim *et al.*, 2004; Qu *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006),并指出局地风场和北赤道流分叉点位置的南北移动是调控黑潮入侵南海强度年际变化的两个重要因素。然而,对于黑潮入侵南海的两种具体流径(即 Looping 流径和 Leaking 流径)的发生概率的年际变化及其调控机制的认识目前尚不清晰。仅有南峰(2012)和 Nan 等(2015)给出了 Looping 流径和 Leaping 流径逐年的发生概率分布,并指出 Looping 流径和 Leaping 流径发生概率分别具有下降和上升的趋势。Sun 等(2020)基于高度计和风场资料指出,局地风场是影响 Looping 流径强度年际变化的重要因素。

本文利用近 30 a 的卫星观测资料,统计了黑潮入侵南海不同流径的发生概率,探究了不同流径的基本特征,分析了其在季节和年际尺度的变化特征和影响因素。以上研究进一步厘清了黑潮入侵南海不同流径的时间变化特征和调控机理,对提高南海和西北太平洋水交换的认识和未来开展黑潮入侵南海流径的预报研究具有重要意义,对海上船舶运输和军事活动安全等具有重要影响。

## 1 数据及方法

### 1.1 数据

#### 1.1.1 卫星高度计数据

本文所用卫星高度计资

料通过哥白尼海洋监测服务(Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS)网站下载(<http://marine.copernicus.eu>),包括绝对海面动力高度(absolute dynamic topography, ADT)、纬向地转流( $u$ )和经向地转流( $v$ )等变量,时间分辨率为  $d$ ,空间分辨率为  $1/4^\circ$ 。所用数据时间范围为 1993~2021 年,空间范围为:  $111^\circ\sim 126^\circ\text{E}$ ,  $16^\circ\sim 25^\circ\text{N}$ 。为了研究方便以及能更好地体现海面流场以及动力高度的变化,我们对数据进行了 7 d 的周平均。后文中季节和年际变化研究,对各参数均进行了月平均处理。

**1.1.2 再分析资料** 本文采用 CMEMS 网站的再分析资料对吕宋海峡处黑潮不同流径的流场和通量进行绘制,数据下载网址为 [https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL\\_MULTIYEAR\\_PHY\\_001\\_030/download](https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/download)。该再分析数据的空间分辨率为  $1/12^\circ$ ,时间分辨率为  $d$ ,垂向共 50 层。该数据同化了卫星沿轨海面高度异常数据、海面温度数据、海冰数据以及现场观测的温盐剖面数据,对于上层流场有较为准确的刻画,因此在本文中用来刻画不同流径的垂向流场结构和通量。本文所用 CMEMS 模式数据的时间和空间范围均与卫星高度计数据一致。

**1.1.3 风场数据** 本文所用风场数据为欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的海表以上 10 m 风场数据,ECMWF 中 ERA5 是全球气候的第五代大气再分析数据。数据下载网址为 <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=form>。再分析数据将模型数据与来自世界各地的观测数据结合起来,形成一个全球完整的、一致的数据集,ERA5 中的风场数据从 1979 年至今,数据时间分辨率为  $h$ ,空间分辨率为  $1/4^\circ$ 。本文所用风场数据时间范围为 1993~2021 年,为了研究方便,对风场数据进行了月平均处理。

### 1.2 方法

基于 Nan 等(2015)的研究,我们将吕宋海峡处黑潮的流径分为三类:流套流径(Looping)、分支流径(Leaking)和跨越流径(Leaping)。图 1 展示了黑潮流经吕宋海峡的三种典型流径,其中 2016 年 12 月为 Looping 流径,2011 年 6 月为 Leaping 流径,2003 年 2 月为 Leaking 流径,以下将对三种流径的识别方法进行具体介绍。

**1.2.1 Looping 流径的识别** 卫星高度计资料(图 1a)表明,当 Looping 流径发生时,黑潮从吕宋海峡中部

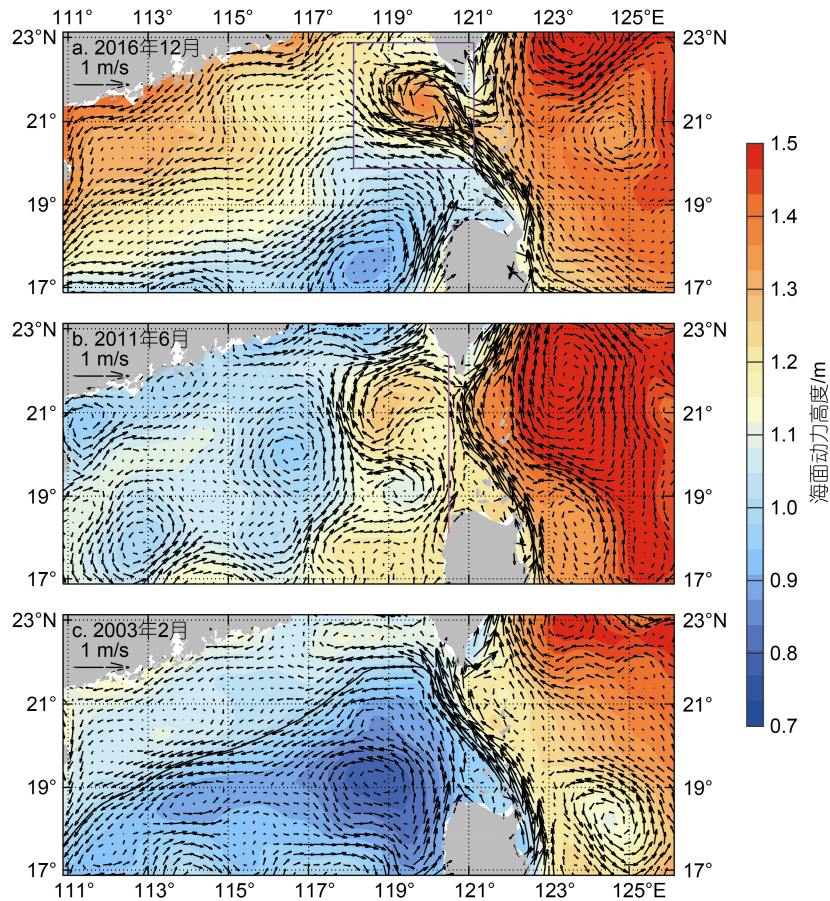


图 1 典型流套流径(Looping, a)、跨越流径(Leaping, b)和分支流径(Leaping, c)对应的海面动力高度(ADT)和海面绝对地转流分布

Fig.1 The distributions of absolute dynamic topography (ADT) and surface absolute geostrophic current of typical Looping (a), Leaping (b), and Leaping (c) paths

注: 黑色实线近似代表黑潮主轴; a 中紫色方框为 Looping 流径区域, 用来计算 Looping 流径的识别指数; b 中紫色直线代表 120.5°E 断面, 用来计算 Leaping 流径的识别指数

入侵南海, 而后在台湾西南反气旋式运动, 并从吕宋海峡北部回到太平洋。在台湾西南区域存在很强的反气旋式环流结构和很强的负涡度, 因此我们将该区域(118.125°~121.125°E, 19.875°~22.875°N, 图 1a 紫色方框)的相对涡度作为指标, 用来识别 Looping 流径的发生。根据格林公式, 该面积积分等于沿区域边界的线积分, 因此得到式(1)的黑潮流套指数  $I_{KL}$ 。继而计算  $I_{KL}$  的平均值( $\mu$ )与标准差( $\sigma$ ), 当  $I_{KL} < (\mu - \sigma)$  时, 判定为 Looping 流径的发生。

$$I_{KL} = \iint \left( -\left( \frac{g}{f} \right) \nabla^2 \eta \right) dA = \iint \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) dx dy = \oint u dx + v dy, \quad (1)$$

其中,  $g$  为重力加速度, 通常取  $9.8 \text{ m/s}^2$ ,  $f$  为科氏参数,  $\eta$  为 ADT,  $u$  为纬向地转流,  $v$  为经向地转流。

**1.2.2 Leaping 流径的识别** 当 Leaping 流径发生

时(图 1b), 黑潮在吕宋海峡内先向西北运动, 而后立即向东北运动到达台湾岛东部, 黑潮几乎不入侵南海, 甚至会有部分南海水流入太平洋。因此我们将穿越 120.5°E 断面(图 1b 紫色直线)的吕宋海峡表层水体通量( $T_{sur}$ )作为指标来识别 Leaping 流径, 当  $T_{sur}$  指数为负时代表 Leaping 流径的发生。值得注意的是 Looping 流径发生时  $T_{sur}$  指标也可能为负, 因此在判别时, 首先识别 Looping 流径的发生时刻, 然后在剩余的时间中再识别 Leaping 流径的发生时刻。 $T_{sur}$  指数计算方法如下:

$$T_{sur} = \int_0^L -u dL, \quad (2)$$

其中,  $L$  为吕宋海峡宽度,  $u$  为吕宋海峡断面纬向地转流。 $T_{sur}$  为正代表太平洋表层水进入南海,  $T_{sur}$  为负代表南海表层水进入太平洋, 即 Leaping 流径的发生。

**1.2.3 Leaping 流径的识别** 图 1c 展示了 Leaping

流径的流场分布, 吕宋海峡处黑潮部分向西入侵南海, 部分继续北上到达台湾岛东部。由于吕宋海峡处流场共分为三种流态, 因此将总的时间去掉 Looping 和 Leaping 流径的发生时间, 即识别为 Leaking 流径的发生时间。

**1.2.4 吕宋海峡上层水体通量计算** 黑潮主要在上 600 m 入侵南海, 因此, 对 120.5°E 断面上 600 m 纬向流积分, 获取吕宋海峡水体通量( $T_{LS}$ )。计算方法如下:

$$T_{LS} = \int_{-600}^0 \int_0^L -udLdz, \quad (3)$$

其中,  $L$  表示吕宋海峡宽度,  $u$  为纬向地转流,  $z$  为水深。

## 2 结果与讨论

### 2.1 吕宋海峡黑潮流径的提取

基于以上不同流径的识别方法, 对周平均的高

度计资料进行识别, 获取了不同流径的发生时间。通过对 Looping 流径发生指数  $I_{KL}$  的计算, 我们得到了 Looping 流径在近 30 a 的发生时间, 如图 2a 中红色菱形所示。从图 2 可以看出, Looping 流径  $I_{KL}$  指数多呈现负值分布, 其主要发生在冬季, Looping 流径总的发生概率为 14.4%, 共计发生 218 周; 通过对  $T_{sur}$  指数的计算, 获取了 Leaping 流径在近 30 a 的发生时间(图 2b 中绿色菱形所示)。从图 2b 中可以看出, Leaping 流径主要发生在夏季, 其总的发生概率为 38.7%, 共计发生 585 周; 除 Looping 流径和 Leaping 流径外的其他时间, 则判定为 Leaking 流径, Leaking 流径总的发生概率为 46.9%, 共计发生 710 周。综上, 吕宋海峡处黑潮的三种流径中, Leaking 流径发生概率最高, Leaping 流径次之, Looping 流径发生概率最小。

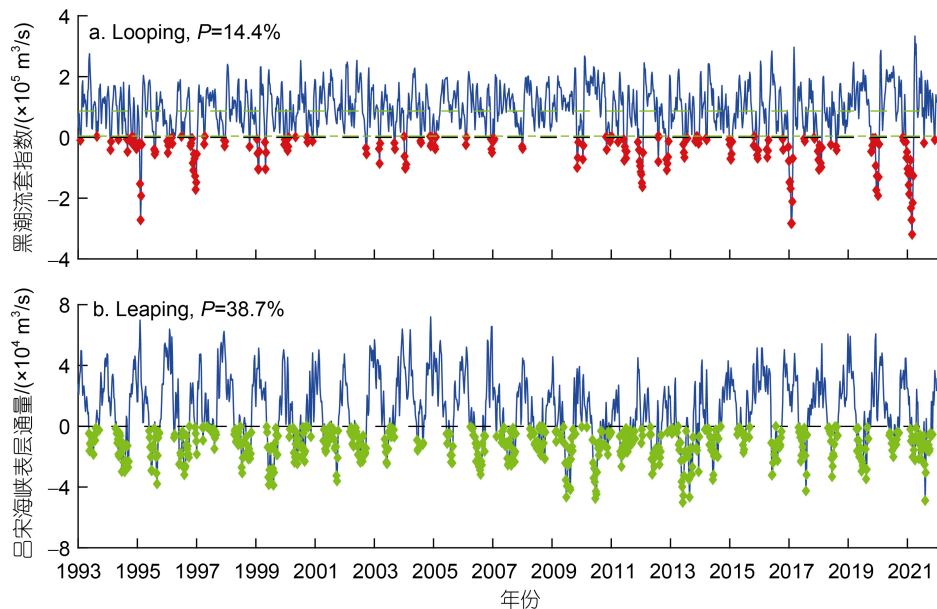


图 2 1993~2021 年逐周的黑潮流套指数(a)和吕宋海峡表层水体通量(b)的时间序列

Fig.2 The weekly time series of Kuroshio loop index (a) and surface transport of Luzon Strait (b) between 1993 and 2021

注: a 中上、下两条绿色虚线分别表示黑潮流套指数的平均值  $\mu$  以及  $\mu-\sigma$ ; 红色实心菱形表示 Looping 流径发生的时间; b 中绿色实心菱形表示 Leaping 流径发生的时间;  $P$  表示 30 年间发生的总概率

### 2.2 吕宋海峡黑潮流径的基本特征

**2.2.1 海表特征** 以上提取了吕宋海峡处黑潮不同流径的发生时间, 通过对不同流径发生时间的合成, 获取了黑潮不同流径的基本运动学特征。图 3 展示了不同流径合成的海表流场、ADT 和 120.5°E 断面纬向流场垂向分布特征。

从图 3a~3c 可以发现, Looping 流径发生时, 台湾西南部存在显著的反气旋式流套结构, 流套向西可延伸至 117°E。对应于黑潮反气旋式入侵, 流套内

部 ADT 较高, 同时也显著高于其他两种流径下的 ADT, 最大 ADT 达到 1.26 m, 位于流套中心处。从地转流分布可以看出, 黑潮从吕宋海峡中部进入南海, 并将西北太平洋的水体带入南海, 而后反气旋式运动, 从吕宋海峡北部离开南海并回到台湾东部; Leaping 流径发生时, 黑潮在吕宋海峡先向西北运动, 而后向东北至台湾东部, 黑潮未入侵南海, 黑潮主轴也未跨越 120.5°E 断面, 吕宋海峡西侧 ADT 较弱, 流速也较弱; Leaking 流径发生时, 黑潮为分支入侵

态, 黑潮向北进入吕宋海峡后, 一个分支在吕宋海峡北部进入南海, 而后气旋式入侵南海并沿着地形向西南方向运动, 另一个分支向东北运动到达台湾岛东部。

**2.2.2 流速垂向分布特征** 为了更好地刻画黑潮不同流径的流速特征, 我们基于 CMEMS 再分析资料给出了三种流径在吕宋海峡 120.5°E 断面的流速垂向分布, 如图 3 d~3f 所示。

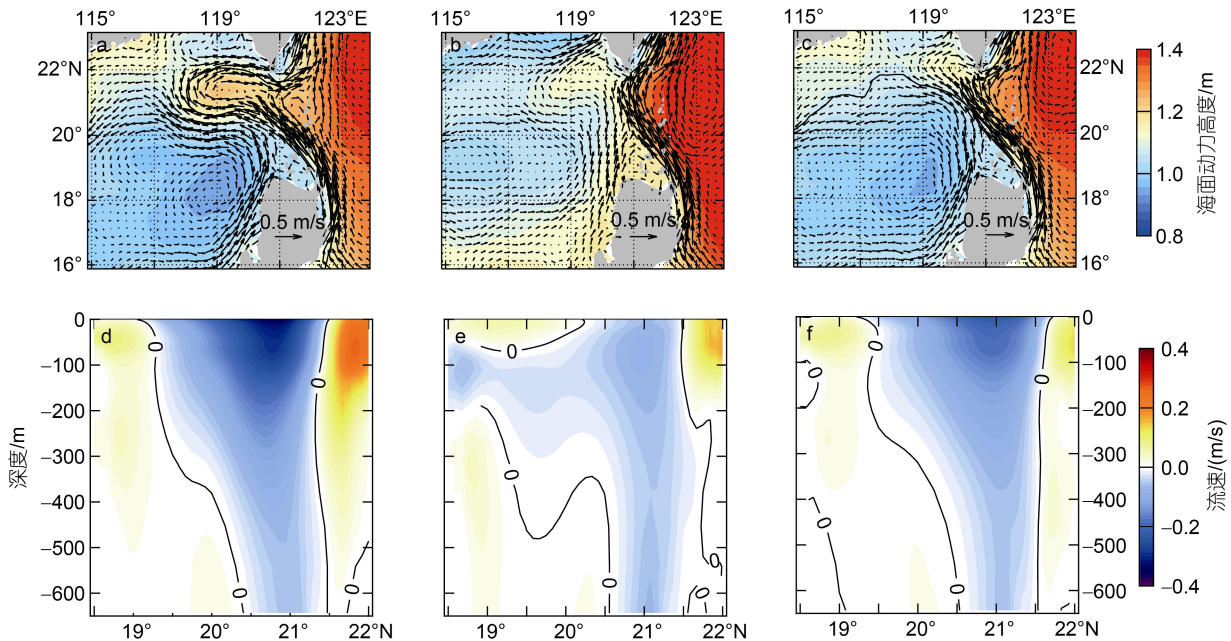


图 3 合成 Looping (a, d)、Leaping (b, e)、Leaking (c, f) 流径对应的 ADT、海面绝对地转流分布, 以及 120.5°E 断面的纬向流分布

Fig. 3 The distributions of composited ADT, surface absolute geostrophic current and zonal velocity at 120.5°E section of Looping (a, d), Leaping (b, e), and Leaking (c, f) paths

注: a~c 中黑色实线近似代表黑潮主轴; d~f 为 CMEMS 再分析数据的结果, 黑色实线表示纬向流速的零线

从图 3d 中可以看出, 在 Looping 流径发生时, 纬向流速在整个垂向断面均呈现显著的南进北出的结构, 纬度带 19.0°~21.5°N 处, 纬向流速为负, 以西向流为主, 最大流速可达 0.4 m/s, 影响深度可达 600 m, 随深度增加流速迅速减小, 西向流的经向尺度约为 250 km。纬度为 21.4°~22.0°N 处, 纬向流速为正, 以东向流为主, 最大流速可达 0.3 m/s, 影响深度可达 600 m, 随深度增加流速迅速减小, 经向尺度约为 60 km。纬向流速零点位于 21.5°N 附近。Looping 流径发生时, 东西向流速均显著大于其他两种流径下的速度。在 Leaping 流径发生时, 表层纬向流速在吕宋海峡南侧和北侧为正, 中间为负, 表层净通量为东向, 说明在表层附近为南海水进入西北太平洋, 黑潮几乎不入侵南海。而在海洋内部, 同样在南侧和北侧为正, 中间为负, 整个断面的净通量为南海进入太平洋。在 Leaking 流径发生时, 纬向流速多呈现负值分布, 西向流经向范围为 19.5°~21.6°N, 垂向影响深度可达 600 m, 但流速弱于 Looping 流径下的流速, 最

大流速为 0.3 m/s, 发生在海表。在断面北侧, 同样出现了正值分布, 但量值和经向尺度均较弱。

**2.2.3 温盐分布特征** 南海和西北太平洋具有不同属性的水体, 南海上层为低温低盐的南海局地水, 最大盐度为 34.6, 而西北太平洋上层为高温高盐的黑潮水, 最大盐度可达 34.8 以上, 最大盐度发生在次表层等密面 24.82 $\sigma$  (位势密度)附近(Zhang *et al*, 2016, 2017)。由于南海和西北太平洋具有显著差异的水体属性, 黑潮在吕宋海峡处的不同流径必然会引起南海北部水团特性不同程度的变化。

图 4 展示了不同流径下 24.82 $\sigma$  等密面处(约 150 m)温度和盐度的分布。在 Looping 流径中, 黑潮流套内存在显著的高温高盐的太平洋黑潮水, 最大盐度可达 34.78, 最高温度可达 18 °C, 向西可延伸至 117°E, 说明黑潮流套卷挟着高温高盐的黑潮水进入南海, 从而显著影响了南海北部的水团特性和温盐平衡。在 Leaping 流径中, 高温高盐的太平洋水并未进入南海, 吕宋海峡西侧呈现显著的低温低盐的南海局地水的

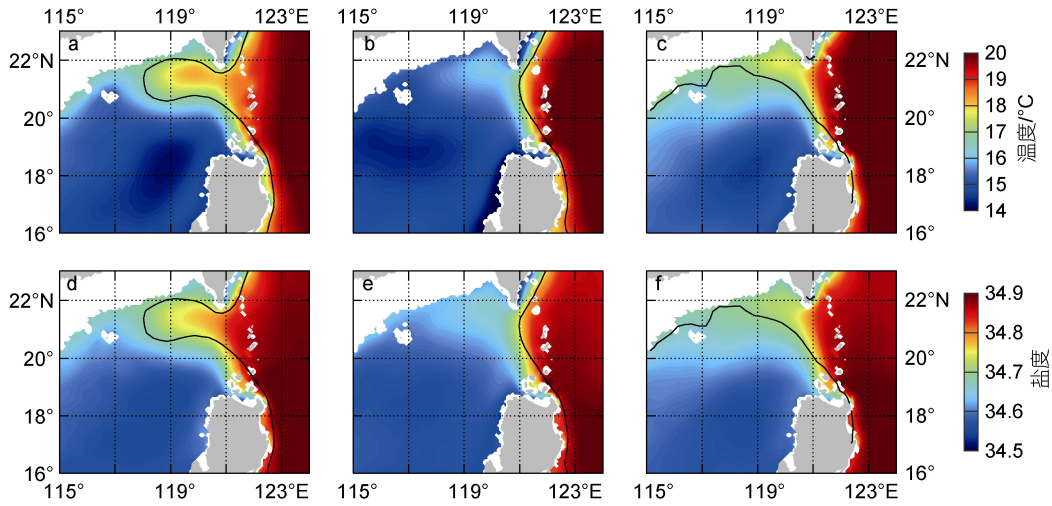


图 4 合成 Looping (a, d)、Leaping (b, e)、Leaking (c, f)流径对应的 24.82σ 等密度面上的温度以及盐度分布

Fig.4 The distributions of composited temperature and salinity on the 24.82σ isopycnic surface of typical Looping (a, d), Leaping (b, e), and Leaking (c, f) paths

注: 黑色实线近似代表黑潮主轴

特征, 温度为 17 °C 左右, 盐度为 34.64 左右; 在 Leaking 流径中, 南海北部沿着黑潮气旋式入侵的路径, 温度和盐度要略高于周围的水体, 说明 Leaking 流径同样可以将高温高盐太平洋黑潮水带入南海。虽然其温度和盐度均小于 Looping 流径, 但向西可延伸至南海更中心处(115°E 及以西)。综上, Looping 流径和 Leaking 流径均可将高温高盐的西北太平洋水带入南海, 前者的温度和盐度更高, 强度更大, 后者向西延伸距离更远。

**2.2.4 吕宋海峡通量统计特征** 我们借助于公式(3), 计算出 CMEMS 模式中上 600 m 积分的吕宋海峡通量 (Luzon Strait transport,  $T_{LS}$ ), 再结合不同流径的发生时间, 统计出不同流径下  $T_{LS}$  的分布特征(图 5)。

从图 5 中可以看出, 与吕宋海峡海表通量稍有不同, Looping 流径和 Leaking 流径发生时,  $T_{LS}$  主要为正值, 但 Leaping 流径发生时,  $T_{LS}$  既有正值也有负值, 气候态平均的  $T_{LS}$  为  $3.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。Looping 流径发生时, 最大  $T_{LS}$  达到  $12.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 平均  $T_{LS}$  为  $6.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $T_{LS}$  在  $4 \times 10^6 \sim 6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  区间内发生时间最长, 达到 52 周; Leaping 流径发生时, 在  $-2 \times 10^6 \sim 0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  区间内发生时间最长, 达到 164 周, Leaping 流径下平均  $T_{LS}$  为  $-0.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Leaking 流径发生时, 最大  $T_{LS}$  达到  $13.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 在  $4 \times 10^6 \sim 6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  区间内发生时间最长, 达到 169 周, Leaking 流径下平均  $T_{LS}$  为  $5.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 小于 Looping 流径。综上, 黑潮主要以 Looping 和 Leaking 两种流径入侵南海, Looping 流径

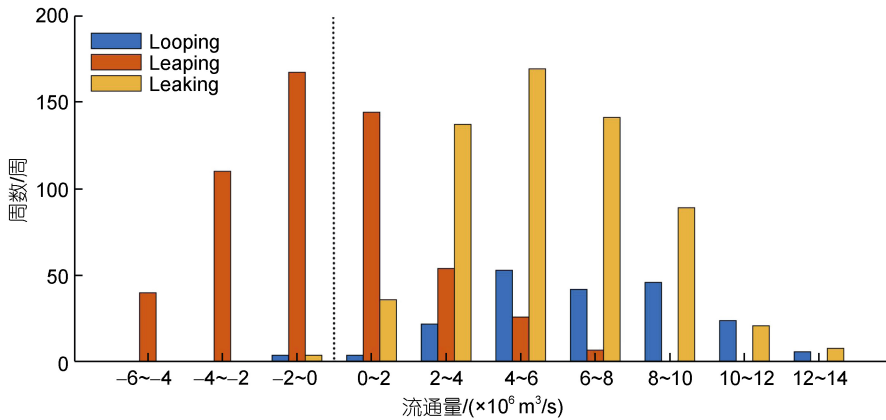


图 5 三种黑潮流径在不同  $T_{LS}$  区间内发生的时间(周数)

Fig.5 The occurrence time (weeks) of three Kuroshio paths in different transport of Luzon Strait ranges

注: 黑色虚线代表  $T_{LS}$  为 0;  $T_{LS}$  为正表示太平洋水进入南海,  $T_{LS}$  为负表示南海水进入太平洋

下的平均  $T_{LS}$  大于 Leaking 流径, 两种流径下最大  $T_{LS}$  均可达  $12 \times 10^6 \sim 14 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , Looping 流径和 Leaking 流径在  $4 \times 10^6 \sim 6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  区间发生时间最长。

### 2.3 吕宋海峡黑潮流径的时间变化特征

#### 2.3.1 季节变化

为了探究吕宋海峡处黑潮流径的季节变化, 我们将 1993~2021 年的数据按照逐月的发生概率进行统计, 并得到气候态月平均结果, 如图 6 所示。

统计结果表明, Looping 流径主要发生在冬季, 在其他季节发生概率较低, 最大概率发生在 1 月份, 可以达到 37%, 其次在 12 月份, 可以达到 35%, 这与前人针对黑潮流套季节变化的认识一致(Wu *et al.*, 2007; Nan *et al.*, 2011, 2015); 对于 Leaping 流径, 其主要发生在夏季, 冬季发生概率较低, 最大概率发生

在 6 月份, 可以达到 85%; 对于 Leaking 流径, 其在冬半年发生概率均较高(10 月至次年 4 月), 夏季发生概率较低, 其发生概率存在 2 个高值月份, 一个峰值发生在春季的 3 月份, 可以达到 79%, 另一个峰值发生在秋季的 11 月份, 可以达到 73%。综合以上特征, 可以得到结论如下: 吕宋海峡处黑潮以 Leaping 流径和 Leaking 流径为主, 冬半年(10 月至次年 4 月) Leaking 流径占据主导地位, 夏季 Leaping 流径占据主导地位, 同时, Looping 流径主要发生在冬季。综合黑潮入侵南海的两种流径(Leaking 流径和 Looping 流径, 图 6 中绿线), 同样呈现显著的季节变化, 冬季强夏季弱, 最大和最小概率出现在 12 月和 6 月, 分别为 98% 和 15%, 表明黑潮主要在冬季入侵南海。

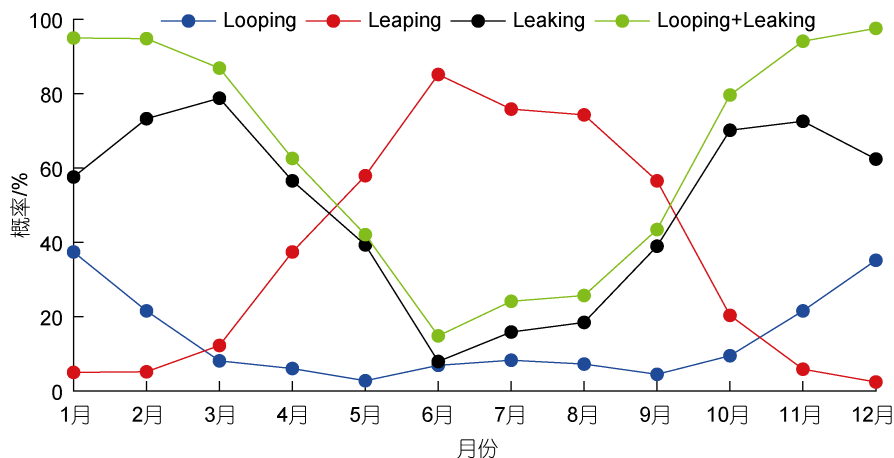


图 6 1993~2021 年气候态月平均的 Looping、Leaping、Leaking 发生概率以及 Looping 和 Leaking 流径发生概率之和的时间序列

Fig.6 Climatological monthly mean occurrence probabilities of the Looping, Leaping, Leaking and the sum of Looping and Leaking paths averaged between 1993~2021

#### 2.3.2 年际变化

吕宋海峡处黑潮主要以 Looping 和 Leaking 两种流径入侵南海, 因此对 Looping 和 Leaking 两种流径进行逐年的统计, 以探究黑潮入侵南海流径的年际变化, 如图 7 所示。从图 7 中可以看出, Looping 和 Leaking 两种流径的发生概率均具有显著的年际变化特征。其中, Looping 流径在 1996 年发生时间最长, 可达 17 周, 发生概率为 32%。此外, 1994 年、1999 年、2004 年、2011~2013 年、2017 年和 2021 年发生概率也较高; 而在 1993 年、1998 年、2001 年、2008 年发生概率较低, 其中 2001 年几乎没有出现 Looping 流径。与 Looping 流径相比, Leaking 流径呈现略微相反的年际变化, 其在 2005 年发生时间较长, 可达 40 周, 发生概率为 75%, 同时, 1993 年、1997 年、2003 年、2004 年和 2020 年发生时间也较

长; 而在 2013 年发生时间最短, 仅达到 4 周, 2021 年次之, 持续了 7 周。对于整个黑潮入侵(二者之和), 由于 Leaking 流径发生概率约为 Looping 流径的 3 倍, 其年际变化主要受到 Leaking 流径的调控, 发生概率最高值出现在 2004 年, 最大概率可以达到 90%, 发生概率最低值出现在 2013 年, 最低概率仅为 34%。

除了显著的年际变化, 黑潮入侵南海的发生概率同样具有显著的长期变化趋势。其中 Looping 流径的发生时长呈现上升的长期变化趋势, 其变率为 0.15 周/年。与之相反, Leaking 流径的发生时长呈现下降的长期变化趋势, 其变率为 -0.17 周/年。整个黑潮入侵南海的发生时长则呈现下降的长期变化趋势。综上, 黑潮 Looping 流态入侵南海的时间逐年增加, Leaking 流态入侵南海的时间逐年降低, 总的黑潮入

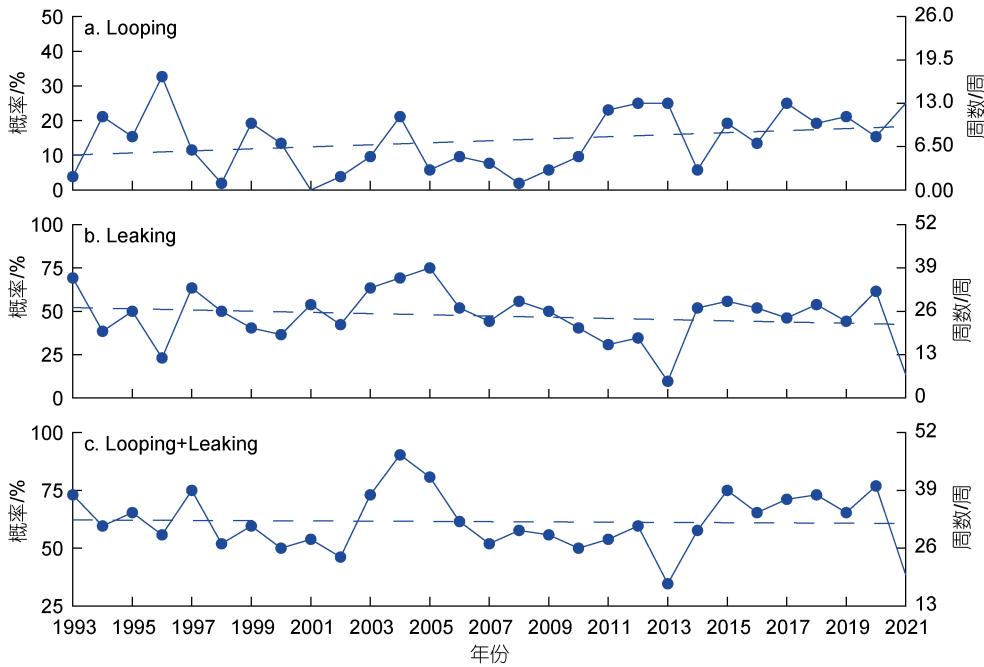


图 7 1993~2021 年逐年的 Looping(a), Leaking(b)流径和二者之和(c)的发生概率和周数时间序列

Fig.7 The yearly occurrence probabilities and weeks of the Looping (a), Leaking (b) paths and their sum (c) between 1993 and 2021

注: 蓝色虚线表示发生概率长期变化趋势

侵南海的时间呈减少趋势, 黑潮不入侵南海的 Leaping 流态的时间呈增加趋势, 这与前人发现的黑潮入侵南海强度呈降低趋势的结论一致(Nan *et al*, 2013)。

### 3 讨论

#### 3.1 局地风场对黑潮路径的影响

前人研究发现南海北部局地风场是黑潮入侵南海路径和强度变化的重要调控因素之一(Farris *et al*, 1996; Wu *et al*, 2012; Nan *et al*, 2013; Sun *et al*, 2020), 那么局地风场对黑潮入侵流径持续时间的季节和年际变化有何影响呢? 为了探究这一问题, 我们利用海表 10 m 的风场数据, 计算了图 1a 中紫色框中的风应力旋度, 计算公式为

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

风应力的计算公式为

$$\vec{\tau} = \rho_{air} C_D |\overline{U}_{10} - \overline{U}_0| (\overline{U}_{10} - \overline{U}_0), \quad (5)$$

其中,  $\rho_{air}$  为空气密度, 此处取值  $1.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_D$  为拖曳系数,  $\overline{U}_{10}$  为海面 10 m 处的风速,  $\overline{U}_0$  为海表地转流。

图 8 展示了风应力旋度和 Looping 流径发生概率在季节和年际上的分布。从图 8 可以看出, 季节

尺度上, 二者具有很好的对应关系, 相关系数达到 0.67, 超过 95%置信检验( $R_0=0.56$ ), 均存在冬强夏弱的季节变化特征, 冬季南海东北风增强, 台湾西南呈现较强的负的风应力旋度, 更有利于黑潮以 Looping 流径入侵南海, 夏季则为西南风, 不利于黑潮 Looping 流径的发生。黑潮 Looping 流径主要发生在冬季(1月、2月、11月、12月), 因此将逐年的风应力旋度与 Looping 流径发生概率进行对比。从图 8b 可以看出, Looping 流径发生概率与风应力旋度存在较好的正相关关系, 二者的相关系数达到 0.49, 超过 95%置信检验( $R_0=0.36$ ), 说明 Looping 流径发生概率的年际变化受到局地风场的调控, 台湾西南负的风应力旋度越强, 越有利于黑潮以 Looping 流径的形式入侵南海, 这与前人研究结果较为一致(Sun *et al*, 2020)。与此同时, 台湾西南负的风应力旋度和 Looping 流径发生概率均存在增强的长期变化趋势, 说明台湾西南负的风应力旋度的增强促进着黑潮 Looping 流径发生时间的增长。与 Looping 流径相比, 冬季台湾西南负的风应力旋度并不支持形成 Leaking 流径, Leaking 流径的发生概率与风应力旋度在年际尺度上相关性较差, 且长期变化趋势相反(图片未展示), 说明局地风场不是 Leaking 流径发生概率年际变化的主控因素。



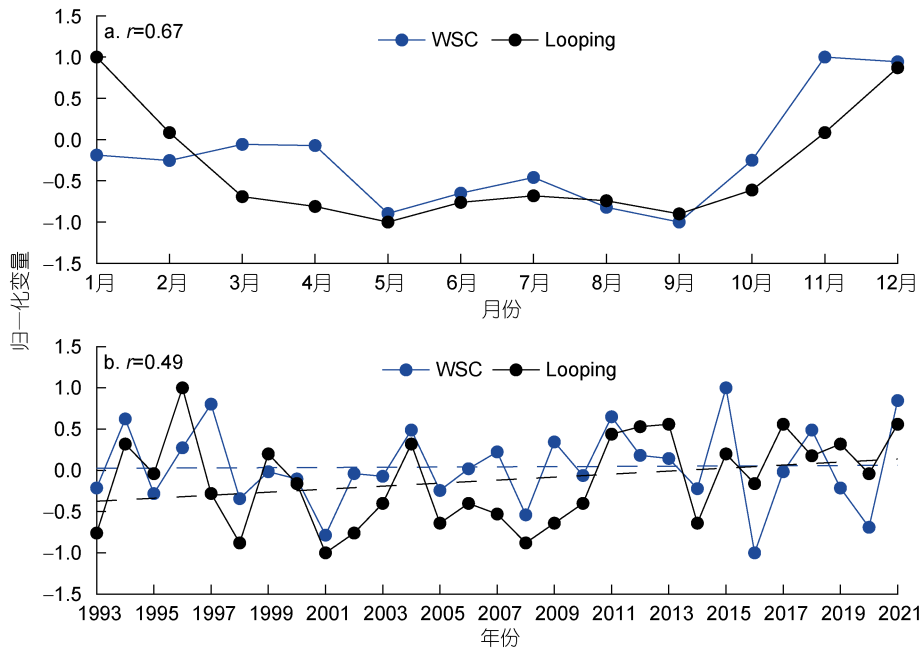


图 8 风应力旋度(WSC, 蓝线)与 Looping 流径发生概率(黑线)的气候态月平均(a)和逐年冬季平均(b)时间序列

Fig.8 Time series of wind stress curl (WSC, blue line) and probability of Looping path (black line) in climatologically monthly mean (a) and annual winter mean (b)

注:  $r$  表示相关系数; 蓝色虚线表示风应力旋度的长期变化趋势, 黑色虚线表示 Looping 流径发生概率的长期变化趋势; 风应力旋度与 Looping 流径发生概率已利用各自的最大值进行归一化, 所有时间序列均经过归一化处理

### 3.2 北赤道流对黑潮路径的影响

除局地风场外, 北赤道流变化也是黑潮入侵南海路径和强度的另一个重要调控因素, 北赤道流变化伴随北赤道流分叉点位置显著变化, 北赤道流分叉点的南北移动会改变上游黑潮的强度, 进而调控黑潮入侵南海的强度(Sheremet, 2001; Qu *et al*, 2004; Yuan *et al*, 2011; Sun *et al*, 2016)。杨龙奇等(2014)表示, 北赤道分叉点的位置变化可以代替黑潮入侵南海的强弱变化。因此本文借助于北赤道流分叉点的位置变化来探究其对黑潮入侵流径的影响, 北赤道流分叉点的计算方法参考 Qiu 等(2010), 计算公式如下:

$$Y(t) = 11.9 - 0.13 \times h'(t), \quad (6)$$

其中:  $h'$  为海面高度异常, 选取的区域为:  $127^{\circ} \sim 130^{\circ}E$ ,  $12^{\circ} \sim 14^{\circ}N$ 。

图 9 展示了北赤道流分叉点纬度和 Leaking 流径发生概率在季节和年际上的分布。从图 9 可以看出, 季节尺度上, 二者具有很好的对应关系, 相关系数达到 0.82, 超过 95%置信度检验( $R_0=0.56$ ), 均存在冬半年强夏半年弱的季节变化特征, 冬半年北赤道流分叉点北移, 吕宋岛东侧黑潮减弱, 弱的黑潮更有利于入侵南海(Sheremet, 2001; Qu *et al*, 2004), 从而 Leaking 流径发生概率更高。而在年际尺度上, 二者

同样具有较好的相关性, 相关系数为 0.56, 超过 95%置信检验( $R_0=0.36$ ), 说明 Leaking 流径发生概率的年际变化受到北赤道流分叉点南北移动的调控, 北赤道流分叉点越靠北, 越有利于黑潮以 Leaking 流径的形式入侵南海。与此同时, 北赤道流分叉点纬度和 Leaking 流径发生概率均存在减小的长期变化趋势, 说明北赤道流分叉点长期的南移会增强上游黑潮, 从而阻碍 Leaking 流径的发生。与 Leaking 流径相比, 北赤道流分叉点纬度在冬季的北移同样会有利于 Looping 流径的产生, 但 Looping 流径的发生概率与北赤道流分叉点纬度在年际尺度上相关性较差, 且长期变化趋势相反(图片未展示), 说明北赤道流分叉点的南北移动不是 Looping 流径发生概率年际变化的主控因素。

## 4 总结

本文从黑潮入侵南海的流径出发, 基于不同流径的识别方法对 1993~2021 年的高度计资料进行识别, 获取不同流径的发生时间, 分析了不同流径在时间变化上的规律, 从而得到以下结论:

(1) 黑潮主要以 Looping 和 Leaking 两种流径入侵南海, 两种流径均会将高温、高盐的太平洋水带到

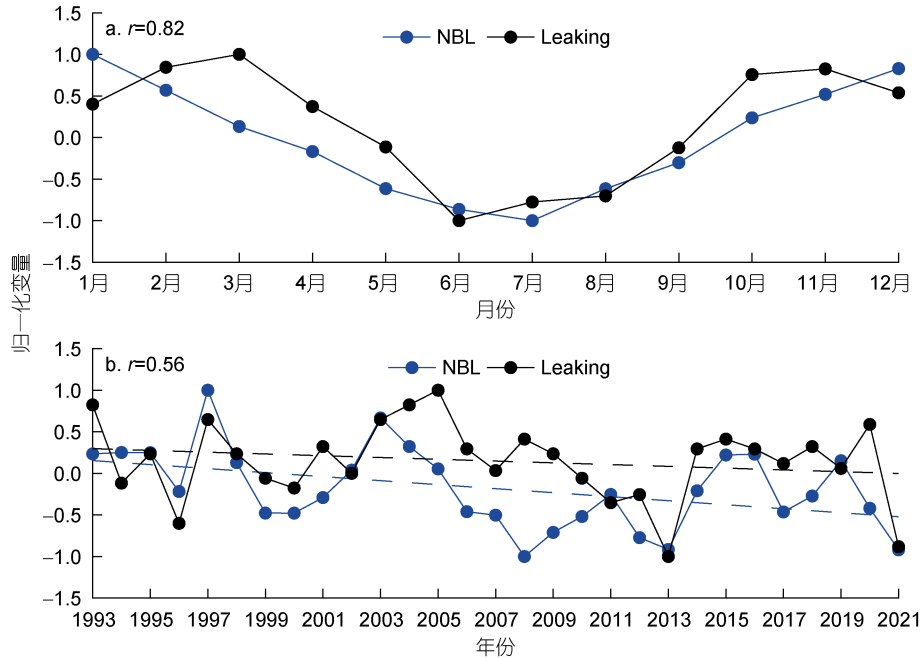


图9 北赤道流分叉点纬度(NBL, 蓝线)与 Leaking 流径发生概率(黑线)的气候态月平均(a)、逐年平均(b)时间序列

Fig.9 Time series of North Equatorial Current bifurcation latitude (NBL, blue line) and probability of Leaking path (black line) in climatologically monthly mean (a) and annual winter mean (b)

注:  $r$  表示相关系数; 蓝色虚线表示北赤道流分叉点纬度的长期变化趋势; 黑色虚线表示 Leaking 流径发生概率的长期变化趋势; 所有时间序列均经过归一化处理

南海, 前者的温度和盐度更高, 强度更大, 后者向西延伸距离更远。Looping 流径下的平均吕宋海峡上层通量  $T_{LS}$  略大于 Leaking 流径, 两种流径下最大  $T_{LS}$  均可达  $12 \times 10^6 \sim 14 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , Looping 流径和 Leaking 流径在  $4 \times 10^6 \sim 6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  区间发生时间最长。

(2) Looping 流径主要发生在冬季, Leaking 流径在冬半年均较强, 二者在夏季均较弱, Leaking 流径的发生时长(710 周)和概率(46.9%)要远高于 Looping 流径(时长 218 周, 概率 14.4%)。

(3) Looping 和 Leaking 两种流径均具有显著的年际变化, Looping 流径在 1996 年发生的时间最长, 多达 26 周时间, 而在 2001 年几乎没有发生; Leaking 流径在 2005 年发生的时间最长, 可达 40 周时间, 在 2013 年发生时间最短, 仅为 4 周时间; 同时, Looping 流径发生时间呈现 0.15 周/年上升的长期变化趋势, 而 Leaking 流径则呈现 -0.17 周/年下降的长期变化趋势, 对于整个黑潮入侵则有着下降的变化趋势。

(4) 对于黑潮入侵南海的两种流径, Looping 流径在季节和年际上均受到台湾西南局地风应力旋度的调控, Leaking 流径在季节和年际上均受到北赤道流变化的调控。

## 参 考 文 献

- 仇德忠, 杨天鸿, 郭忠信, 1984. 夏季南海北部一支向西流动的海流[J]. 热带海洋, 3(4): 65-73.
- 李立, 伍伯瑜, 1989. 黑潮的南海流套?——南海东北部环流结构探讨[J]. 台湾海峡, 8(1): 89-95.
- 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.
- 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: 35-37.
- 南峰, 2012. 台湾西南部海域流一涡结构及其演变规律研究[D]. 青岛: 中国海洋大学: 14-15.
- CARUSO M J, GAWARKIEWICZ G G, BEARDSLEY R C, 2006. Interannual variability of the Kuroshio intrusion in the South China Sea [J]. Journal of Oceanography, 62(4): 559-575.
- FANG G H, SUSANTO D, SOESILO I, *et al*, 2005. A note on the South China Sea shallow interocean circulation [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 22(6): 946-954.
- FARRIS A, WIMBUSH M, 1996. Wind-induced Kuroshio intrusion into the South China Sea [J]. Journal of Oceanography, 52(6): 771-784.
- HU D X, WU L X, CAI W J, *et al*, 2015. Pacific western boundary currents and their roles in climate [J]. Nature, 522(7556): 299-308.
- HU J Y, KAWAMURA H, HONG H S, *et al*, 2000. A review on the currents in the South China sea: seasonal circulation,

- South China Sea warm current and Kuroshio intrusion [J]. *Journal of Oceanography*, 56(6): 607-624.
- KIM Y Y, QU T D, JENSEN T, *et al*, 2004. Seasonal and interannual variations of the north Equatorial current bifurcation in a high-resolution OGCM [J]. *Journal of Geophysical Research*, 109(C3): C03040.
- LIEN R C, MA B, CHENG Y H, *et al*, 2014. Modulation of Kuroshio transport by mesoscale eddies at the Luzon Strait entrance [J]. *Journal of Geophysical Research*, 119(4): 2129-2142.
- LIU Q Y, JIANG X, XIE S P, *et al*, 2004. A gap in the Indo-Pacific warm pool over the South China Sea in boreal winter: seasonal development and interannual variability [J]. *Journal of Geophysical Research*, 109(C7): C07012.
- LIU Q Y, KANEKO A, SU J L, 2008. Recent progress in studies of the South China Sea circulation [J]. *Journal of Oceanography*, 64(5): 753-762.
- NAN F, XUE H J, CHAI F, *et al*, 2011. Identification of different types of Kuroshio intrusion into the South China Sea [J]. *Ocean Dynamics*, 61(9): 1291-1304.
- NAN F, XUE H J, CHAI F, *et al*, 2013. Weakening of the Kuroshio intrusion into the South China Sea over the past two decades [J]. *Journal of Climate*, 26(20): 8097-8110.
- NAN F, XUE H J, 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, YASHIDA K. *Kuroshio: Physical Aspects of the Japan Current*. Seattle, WA, USA: University of Washington Press: 129-163.
- QIU B, CHEN S M, 2010. Interannual-to-decadal variability in the bifurcation of the North Equatorial current off the Philippines [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 40(11): 2525-2538.
- QIU B, LUKAS R, 1996. Seasonal and interannual variability of the North Equatorial Current, the Mindanao Current, and the Kuroshio along the Pacific western boundary [J]. *Journal of Geophysical Research*, 101(C5): 12315-12330.
- QU T D, 2001. Role of ocean dynamics in determining the mean seasonal cycle of the South China Sea surface temperature [J]. *Journal of Geophysical Research*, 106(C4): 6943-6955.
- QU T D, DU Y, MEYERS G, *et al*, 2005. Connecting the tropical Pacific with Indian Ocean through South China Sea [J]. *Geophysical Research Letters*, 32(24): L24609.
- QU T D, DU Y, SASAKI H, 2006. South China Sea throughflow: a heat and freshwater conveyor [J]. *Geophysical Research Letters*, 33(23): L23617.
- QU T D, KIM Y Y, YAREMCHUK M, *et al*, 2004. Can Luzon strait transport play a role in conveying the impact of ENSO to the South China Sea? [J]. *Journal of Climate*, 17(18): 3644-3657.
- QU T D, SONG Y T, YAMAGATA T, 2009. An introduction to the South China Sea throughflow: its dynamics, variability, and application for climate [J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 47(1/2/3): 3-14.
- SHAW P T, 1989. The intrusion of water masses into the sea southwest of Taiwan [J]. *Journal of Geophysical Research*, 94(C12): 18213-18226.
- 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 B, ZHANG Z W, QIU B, *et al*, 2020. Three-dimensional structure and interannual variability of the Kuroshio loop Current in the Northeastern South China Sea [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 50(9): 2437-2455.
- SUN Z B, ZHANG Z W, ZHAO W, *et al*, 2016. Interannual modulation of eddy kinetic energy in the northeastern South China Sea as revealed by an eddy-resolving OGCM [J]. *Journal of Geophysical Research*, 121(5): 3190-3201.
- WANG D X, LIU Q Y, HUANG R X, *et al*, 2006. Interannual variability of the South China Sea throughflow inferred from wind data and an ocean data assimilation product [J]. *Geophysical Research Letters*, 33(14): L14605.
- WU C R, CHIANG T L, 2007. Mesoscale eddies in the northern South China Sea [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 54(14/15): 1575-1588.
- WU C R, HSIN Y C, 2012. The forcing mechanism leading to the Kuroshio intrusion into the South China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 117(C7): C07015.
- WU C R, WANG Y L, LIN Y F, *et al*, 2016. Weakening of the Kuroshio intrusion into the South China Sea under the global warming hiatus [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(11): 5064-5070.
- WU C R, WANG Y L, LIN Y F, *et al*, 2017. Intrusion of the Kuroshio into the South and East China Seas [J]. *Scientific Reports*, 7(1): 7895.
- XUE H J, CHAI F, PETTIGREW N, *et al*, 2004. Kuroshio intrusion and the circulation in the South China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 109(C2): C02017.
- YUAN D L, WANG Z, 2011. Hysteresis and dynamics of a western boundary current flowing by a gap forced by impingement of mesoscale eddies [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 41(5): 878-888.
- ZENG L L, LIU W T, XUE H J, *et al*, 2014. Freshening in the South China Sea during 2012 revealed by Aquarius and in situ data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 119(12): 8296-8314.
- ZENG L L, WANG D X, XIU P, *et al*, 2016. Decadal variation and trends in subsurface salinity from 1960 to 2012 in the northern South China Sea [J]. *Geophysical Research Letters*, 43(12): 181-189.
- ZHANG Z W, LI Y R, TIAN J W, 2013. A modified method to estimate eddy diffusivity in the North Pacific using altimeter eddy statistics [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 31(4): 925-933.
- ZHANG Z W, TIAN J W, QIU B, *et al*, 2016. Observed 3D structure, generation, and dissipation of oceanic mesoscale eddies in the South China Sea [J]. *Scientific Reports*, 6: 24349.
- ZHANG Z W, ZHAO W, QIU B, *et al*, 2017. Anticyclonic eddy sheddings from Kuroshio loop and the accompanying cyclonic eddy in the northeastern South China Sea [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 47(6): 1243-1259.

## TEMPORAL VARIATION OF THE KUROSHIO INTRUSION PATH INTO THE SOUTH CHINA SEA BASED ON SATELLITE ALTIMETER DATA

LIU Yu-Min<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin-Cheng<sup>2</sup>, SUN Zhong-Bin<sup>2</sup>,  
SHANG Gong<sup>2</sup>, ZHAO Wei<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ocean Observation and Information of Hainan Province, Sanya Oceanographic Institution, Ocean University of China, Sanya 572024, China; 2. Key Laboratory of Physical Oceanography, MOE, China / Frontiers Science Center for Deep Ocean Multiphases and Earth System, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract** The Kuroshio intrusion plays an important role in the thermohaline balance, circulation, mesoscale eddy, and local climate of the South China Sea. Based on the identification methods of different Kuroshio paths in the Luzon Strait and the altimeter data between 1993 and 2021, the occurrence time of different Kuroshio paths was identified and the temporal variation of the Kuroshio intrusion paths in the Luzon Strait was studied. Results show that (1) the Kuroshio mainly intrudes into the South China Sea in the paths of the Looping and Leaking. Leaking path occurs much longer (710 weeks) and more frequently (46.9%) than Looping paths (218 weeks, 14.4%); (2) both Looping and Leaking paths can carry warmer and saltier northwestern Pacific water into the South China Sea. In addition, the mean upper Luzon Strait flux in the Looping path is a little larger than that in the Leaking path. The Looping path and Leaking path both show longer occurrence time in the range  $4 \times 10^6 \sim 6 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/s, respectively; (3) seasonally, the Looping path occurs mainly in winter and the Leaking path is strong in the whole winter half year, while both paths are weak in summer; (4) both Looping and Leaking paths have significant interannual variations. The Looping path occurred for the longest time in 1996 (up to 26 weeks), but almost disappeared in 2001; the Leaking path occurred for the longest time in 2005 (up to 40 weeks), but shortest in 2013; (5) the occurrence duration of the Looping path shows a long-term increasing trend of 0.15 weeks per year and the Leaking path shows a long-term decreasing trend of  $-0.17$  weeks per year. The total occurrence time of Kuroshio intrusion presents a long-term decreasing trend; (6) The Looping path is modulated mainly by local wind and wind stress curl southwest of Taiwan Island at both seasonal and interannual scales, while the Leaking path is associated with the location of the North Equatorial Current Bifurcation.

**Key words** Kuroshio intrusion; paths; Luzon Strait; seasonal variation; interannual variation