

日本南部黑潮与黑潮延伸体路径状态关联性的定量分析

陈成吉^{1,2}, 王 强^{1,2}

(1. 河海大学 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 海洋学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 日本南部黑潮存在多种路径模态: 近岸非大弯曲路径、离岸非大弯曲路径和大弯曲路径。黑潮延伸体的路径存在两种典型模态: 收缩态和伸展态。从地理位置看, 日本南部黑潮和黑潮延伸体是相邻的, 但它们的路径状态是否存在关联一直存在争议。本文基于卫星观测的海表高度资料和长期的海洋高分辨率再分析资料, 对日本南部黑潮和黑潮延伸体路径状态之间的关联性进行定量分析, 结果表明: 日本南部黑潮和黑潮延伸体的路径状态存在一定的关联。当日本南部黑潮处于近岸非大弯曲和大弯曲路径时, 黑潮延伸体主要处于伸展态; 当日本南部黑潮处于离岸非大弯曲时, 黑潮延伸体处于伸展态和收缩态的比例相当。进一步分析表明, 黑潮流轴处于伊豆海脊的位置部分决定了上述关系, 可能存在其他因素调制了两者的关联性。

关键词: 黑潮; 黑潮延伸体; 关联; 定量分析

中图分类号: P731.21 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2023)4-0001-08

DOI: 10.11759/hyxx20220220002

黑潮(Kuroshio)是北赤道流在菲律宾群岛东岸分叉而形成的一支向北的海流, 其沿吕宋岛东岸一路北上, 越过吕宋海峡, 途径台湾岛和石垣岛之间进入我国东海, 之后受大陆架影响向东北方向流去, 在日本九州岛西南约(29°N, 128°E)附近折向东, 经吐噶喇海峡流出东海, 然后沿日本南部向东北流, 于(35°N, 141°E)附近离开日本海岸向东流去, 成为向东的射流——黑潮延伸体(Kuroshio Extension, KE)。作为全球第二大暖流, 黑潮的年平均流量大约为 25 Sv^[1](1 Sv = 10⁶ m³/s), 将热带的温暖海水向北输运至副热带海域, 进而对流经海域的海洋环流系统、生态系统和区域气候产生重要影响^[2]。

黑潮在流经日本南部海域时, 其路径具有独特的变化特征, Taft^[3]根据路径是否存在弯曲将其分为大弯曲路径(large meander, LM)[图 1 蓝线]和非大弯曲路径(non-large meander)。Kawabe^[4]进一步将非大弯曲路径细分为近岸非大弯曲路径(nearshore non-large meander, nNLM)[图 1 红线]和离岸非大弯曲路径(offshore non-large meander, oNLM)[图 1 紫线]。基于 1993—2015 年间的 AVISO(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data)月平均海面绝对动力地形(Absolute Dynamic Topography, ADT)绘制的日本南部黑潮三种路径状态如图 1 所示, 当黑潮处于大弯曲路径时,

黑潮在日本南部形成一个巨大的“U”型弯曲, 流轴向南偏, 在 140°E 附近的伊豆海脊处, 流轴经过北边的深水区, 当黑潮处于近岸非大弯曲路径时, 其流轴紧贴日本南岸, 并且在伊豆海脊处也经过北边的深水区, 对于黑潮的离岸非大弯曲路径, 其流轴接近日本南岸, 但在伊豆海脊处偏离南岸而流经南边的浅水区。Kawabe^[5]还指出黑潮可以维持非大弯曲路径或大弯曲路径长达几年至十几年, 但是从非大弯曲路径转换为大弯曲路径或者相反的转变过程一般只需要几个月的时间, 该变化对渔业生产、区域环流和气候等有重要影响^[6-8]。

日本南部黑潮的下游——黑潮延伸体的路径存在两种模态: 伸展态(elongation state)和收缩态(contraction state)^[9]。如图 2 所示, 当黑潮延伸体在处于伸展态时, 其在 144°E 和 150°E 处, 存在两个准稳定的弯

收稿日期: 2022-02-20; 修回日期: 2022-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(42076017); 中央高校基本科研业务费项目(B200201011)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42076017; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. B200201011]

作者简介: 陈成吉(1998—), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事黑潮延伸体预报研究, E-mail: 1713010327@hhu.edu.cn; 王强(1981—), 安徽全椒人, 通信作者, 教授, 主要从事海洋大气的非线性动力学、可预报性以及海洋在天气气候系统中的作用等研究, E-mail: wang.qiang1017@163.com

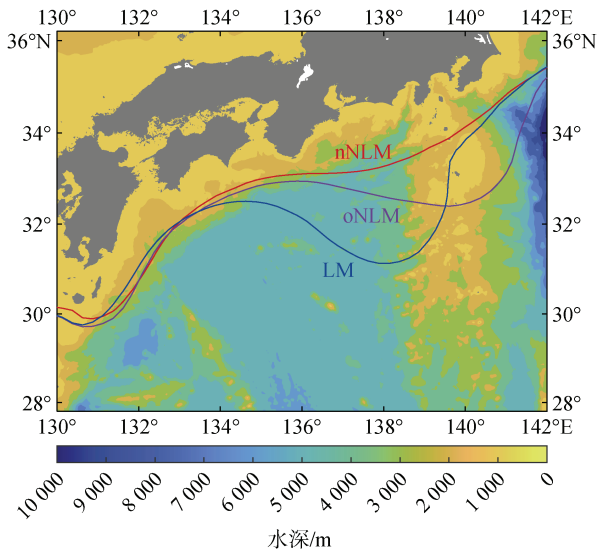


图1 日本南部黑潮三种路径状态
Fig. 1 Three path states of the Kuroshio south of Japan

曲,流轴所在的平均纬度偏北,流轴长度偏短;相反,当其处于收缩态时,准稳定弯曲较弱,流轴紊乱,流轴长度偏长。黑潮延伸体的路径变化不仅影响海洋环境场,还影响区域乃至全球气候变化^[10-13]。

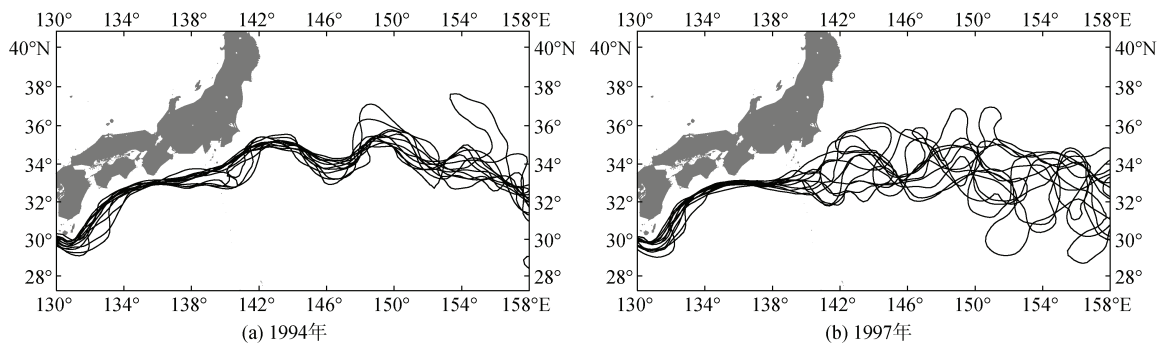


图2 黑潮延伸体状态示意图
Fig. 2 Illustration of the Kuroshio Extension state

注:黑色线代表一个自然月月均的黑潮和黑潮延伸体的流轴位置。1994年为一个伸展态年份,1997年为一个收缩态年份

综上所述,日本南部黑潮和黑潮延伸体路径状态之间可能存在关联,但是前人的研究有一定的局限:要么在个例中寻找关系,要么所用的资料时间太短,很难给出定量的统计结果。本文利用 AVISO 观测资料并结合高分辨率海洋再分析资料,定量分析了日本南部黑潮和黑潮延伸体路径状态的变化特征以及两者之间的关联。

1 资料

1.1 AVISO 资料

卫星高度计能够全天候、大面积获取海洋表面相

对高度,因而被广泛应用于物理海洋学研究。从 1975 年开始,全球多个机构陆续发射多颗高度计卫星,包括 ERS-1, TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Envisat 等。本文使用的卫星观测的海面绝对动力地形(Absolute Dynamic Topography, ADT)数据来自法国国家空间研究中心(Centre National d'Études Spatiales, CNES)的卫星海洋学存档数据中心(AVISO)(<https://www.aviso.altimetry.fr>)。该资料是由 ERS/Envisat, Jason-1, Jason-2, TOPEX/Poseidon 等多颗卫星高度计资料融合而成,覆盖范围为全球,时间分辨率为 1 d,水

由于日本南部黑潮和黑潮延伸体在地理位置上是相邻的,因此它们的路径状态之间是否存在联系,一直是学者们关心的热点问题。已有研究使用的数据资料时间长度较短,尚未形成一致结论,仍存在争议。首先, Qiu 等^[14]发现黑潮延伸体状态的转变主要与风应力的变化有关,与日本南部黑潮没有显著的联系。随后, Pierini^[15]发现黑潮延伸体路径状态的转变与日本南部黑潮的变化可能存在联系。进一步, Sugimoto 等^[16]指出当日本南部黑潮处于近岸非大弯曲路径和大弯曲路径时,黑潮延伸体主要处于伸展模态,而当日本南部黑潮是离岸非大弯曲路径时,黑潮延伸体倾向于处于收缩模态,但是他们所用的资料时间长度较短(仅 16 a),资料中仅发生一次黑潮大弯曲事件,因此他们仅能定性地评估日本南部黑潮与黑潮延伸体路径状态之间联系,无法给出定量结果。此外, Wang 等^[17]在研究黑潮延伸体路径状态转变过程的可预报性时,发现日本南部黑潮路径状态的变异可能对黑潮延伸体路径状态产生影响。最近, Qiu 等^[18]在分析 2017 年左右黑潮延伸体状态转变时指出,日本南部黑潮在 2017 年发生的大弯曲路径会对黑潮延伸体路径状态产生影响。

平网格分辨率为 $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ 。本文使用从 1993 年至 2015 年共计 23 a 的 ADT 资料, 对其做了 7 d 平均预处理, 并将 1.1 m ADT 等值线定义为黑潮和黑潮延伸体流轴。

1.2 海洋高分辨率再分析资料

本文使用的海洋高分辨率再分析资料来自 Usui 等建立的西北太平洋 30 a 的四维变分再分析数据集^[19](Four-dimensional Variational Ocean Re-Analysis for the Western North Pacific over 30 years, FORA, <http://synthesis.jamstec.go.jp/FORA/>)。该资料集是基于日本气象厅 (Japan Meteorological Agency, JMA) 气象研究所 (Meteorological Research Institute, MRI) 开发的四维变分同化系统^[20]构建的, 其同化了 1 500 m 以浅的温度和盐度剖面数据、网格化的海表面温度数据、高度计衍生的海面高度数据以及海冰密集度。FORA 数据集覆盖了西北太平洋 ($117^\circ\text{E} \sim 160^\circ\text{W}$, $15^\circ\text{N} \sim 65^\circ\text{N}$), 水平网格分辨率是可变的, 在 $117^\circ\text{E} \sim 160^\circ\text{E}$, $15^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}$ 区域内为 $1/10^\circ \times 1/10^\circ$, 在 $160^\circ\text{E} \sim 160^\circ\text{W}$, $50^\circ\text{N} \sim 65^\circ\text{N}$ 区域内为 $1/6^\circ \times 1/6^\circ$, 垂直分为 54 层, 最浅为 1 m, 最深为 6 300 m。本文使用该数据集的海表高度 (sea surface height, SSH) 数据, 时间从 1982 年至 2015 年, 共计 34 a, 时间分辨率为 1 d。

总体而言, FORA 很好地再现了北太平洋西部海洋环流的基本特征, 而且在 20 世纪 80 年代没有高度计数据的情况下, FORA 成功地再现了诸如黑潮大弯曲和黑潮延伸体的年代际变化^[19], 与其他再分析数据集相比, FORA 的空间分辨率更高, 时间长度更长, 使用的同化系统更先进^[19-20], 该再分析数据集已被应用于研究西北太平洋环流和海气相互作用^[21-26], 这促使我们利用该资料探讨日本南部黑潮和黑潮延伸体路径状态之间的关联性。类似 AVISO 资料, 我们使用 FORA 资料时, 也对其做了 7 d 平均预处理, 并将 0.2 m SSH 等值线定义为黑潮和黑潮延伸体流轴。

2 结果

图 3 给出了 AVISO 和 FORA 的海表高度气候平均态分布图, 它们具有相似的空间分布特征, 黑潮的流轴紧贴日本南部海岸, 黑潮延伸体有两个分别位于 144°E 和 150°E 的准稳定弯曲, 且流轴长度较短, 表明日本南部黑潮更多时间处于非大弯曲路径, 黑潮延伸体倾向处于伸展模态。

为探究日本南部黑潮与黑潮延伸体状态变化的关系, 我们分别绘制了 AVISO 和 FORA 的日本南部黑潮路径指数[图 4(a)]和黑潮延伸体路径长度指数[图 4(b)]。日本南部黑潮路径指数定义为在 138°E , 日本南部黑潮流轴所处的纬度值, 它能够很好地刻画日本南部黑潮的路径状态。当路径指数较小时, 黑潮处于大弯曲路径[图 4 灰色带], 当路径指数在 33 附近, 黑潮处于近岸非大弯曲路径, 而当路径指数处于中间水平[约 31.5(图 4(a)紫色虚线)~32.5(图 4(a)黑色虚线)]时, 黑潮处于离岸非大弯曲路径。黑潮延伸体路径长度指数定义为 141°E 至 153°E 范围内, 黑潮延伸体流轴的长度。它能够区分黑潮延伸体的伸展模态和收缩模态: 较小的路径长度指数对应伸展模态[小于 1 628 km(图 4(b)紫色虚线($\bar{p}-0.1\delta$))], 较大的指数对应收缩模态[大于 1 713 km(图 4(b)黑色虚线($\bar{p}+0.1\delta$))]

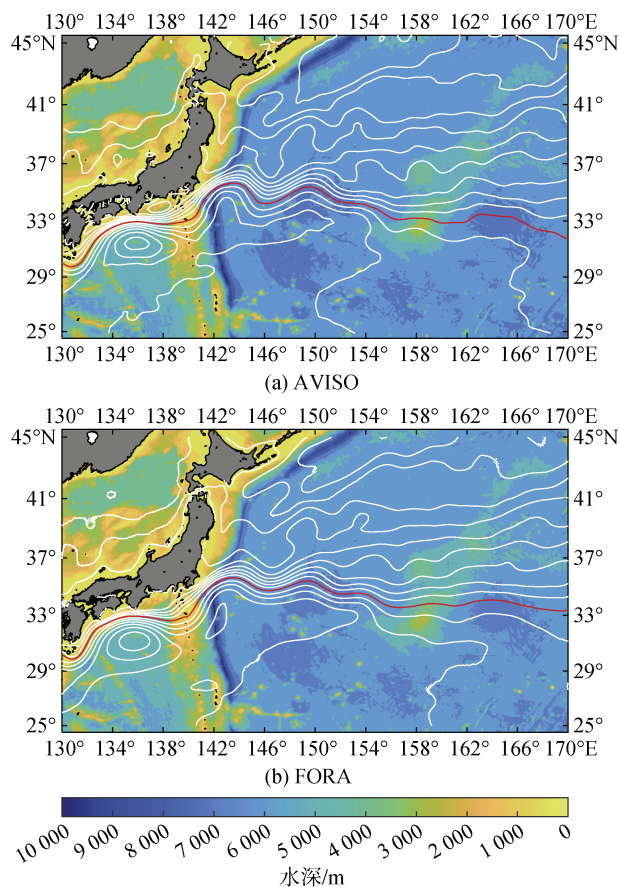


图 3 黑潮流轴的气候态

Fig. 3 Climatologies of the Kuroshio current axis
注: 白色线代表海面高度或海面动力地形等值线, 等值线间隔为 0.1 m。对 AVISO 资料, 1.1 m ADT 等值线对应黑潮流轴[图 3(a)红线]。对 FORA 资料, 0.2 m SSH 等值线对应黑潮流轴[图 3(b)红线]

比较两个指数,发现当日本南部黑潮路径指数显著偏小时,黑潮延伸体路径长度指数也偏小,如日本南部黑潮处于大弯曲路径时(图中灰色阴影范围),这种对应关系十分明显。当日本南部黑潮路径指数偏大,此时处于离岸非大弯曲,黑潮延伸体路径长度偏长,表明黑潮延伸体处于收缩模态。然而,这种对应关系

也有例外的情况,例如1996—1997年,日本南部黑潮路径指数偏大,但此时黑潮延伸体路径指数偏小,表明日本南部黑潮与黑潮延伸体路径状态之间的关系复杂,需要更加量化地分析。此外,AVISO与FORA两套资料的两种指数十分接近,因此可以用更长时间的FORA资料代替AVISO资料进行定量分析。

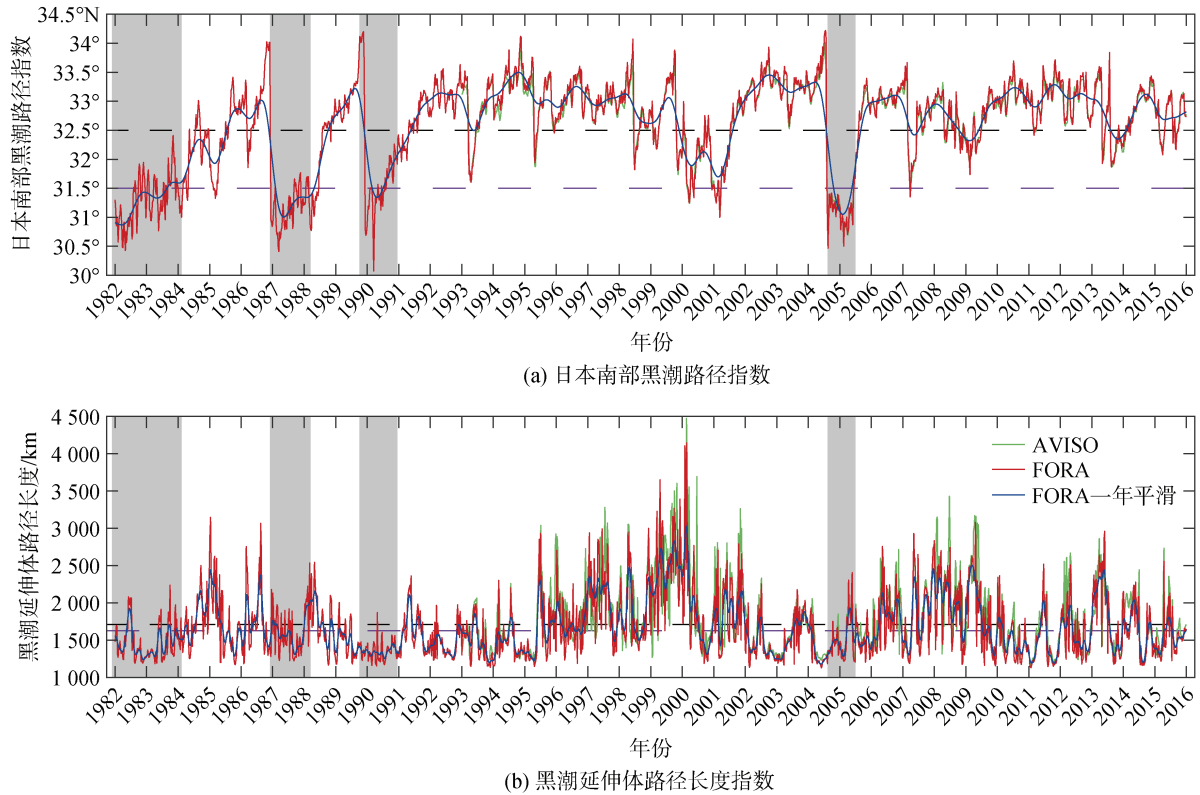


图4 黑潮指数

Fig. 4 Path indices of the Kuroshio

为了进行定量分析,本文参考 Sugimoto 等^[16]给出的方法,对黑潮的3种典型路径进行分类:当黑潮流轴位于(32°N, 136°E), (33°N, 138°E)和(34°N, 140°E)以北时,黑潮处于近岸非大弯曲路径;当流轴位于(32°N, 136°E)以北和(33.5°N, 140°E)以南时,路径被分类为离岸非大弯曲路径;当流轴分布在136°E~137°E的区域的32°N以南时,路径状态为大弯曲路径,如果不属于这3种路径的,将其分为“其他”类。图5给出了上述分类方法得到的不同类型黑潮路径,可见,分类得到的3种路径状态的特征与前文所述一致,表明本文所用的分类方法能够很好地区分其路径状态。利用FORA资料,我们得到了日本南部黑潮处于三种不同路径状态的比例,如表1所示,日本南部黑潮处于近岸非大弯曲路径、离岸非大

弯曲路径和大弯曲路径的比例分别为14%, 49%和9%,不难看出日本南部黑潮倾向处于离岸非大弯曲状态。

对于黑潮延伸体,根据其路径长度指数所展现的特征,我们作如下分类:

伸展态:

$$p < \bar{p} - 0.1\delta, \quad (1)$$

收缩态:

$$p > \bar{p} + 0.1\delta, \quad (2)$$

其中, p 为141°E~153°E范围内的黑潮延伸体路径长度, \bar{p} 为路径长度均值, δ 为路径长度标准差。不属于伸展态和收缩态的路径被分为“其他”类。分类结果(表2)显示黑潮延伸体处于伸展态和收缩态的比例分别为57%和36%,黑潮延伸体倾向处于伸展态。

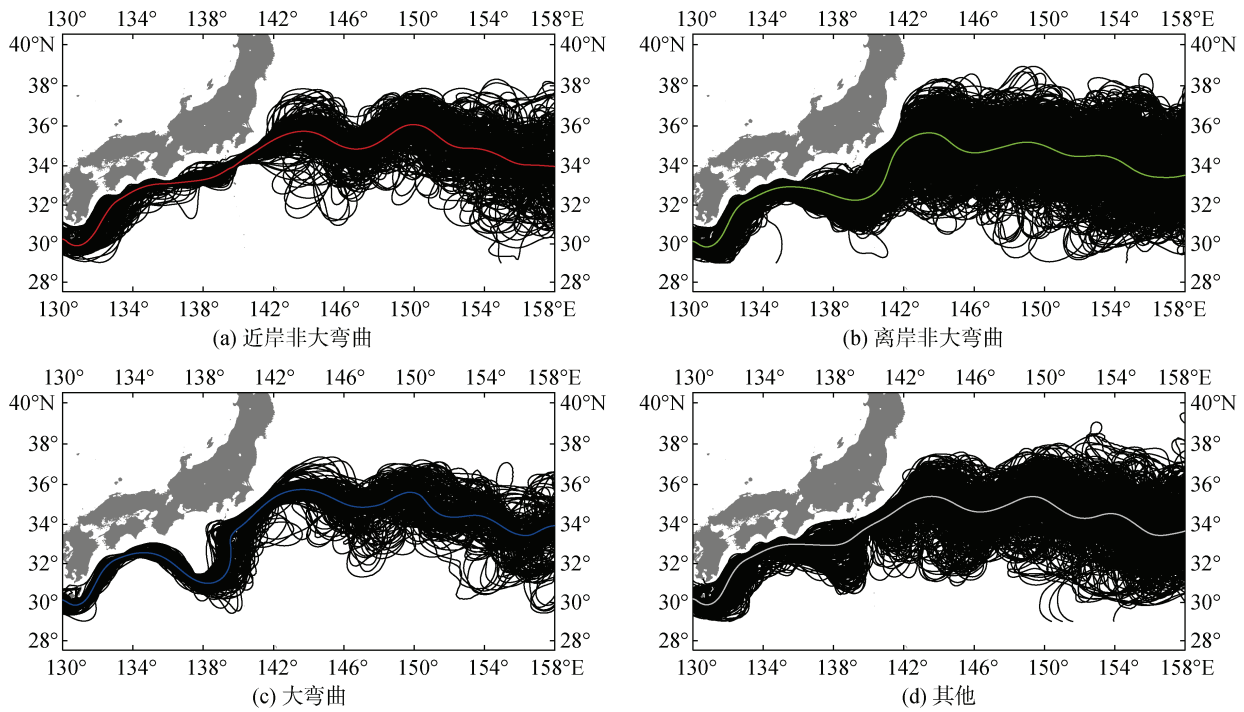


图 5 基于 FORA 资料的日本南部黑潮路径状态分类

Fig. 5 Classification of the path states of the Kuroshio south of Japan based on FORA data

注: 黑线为 7 d 平均的黑潮流轴, 彩线为每类状态的流轴平均

表 1 日本南部黑潮各个路径状态的比例

Tab. 1 Proportion of each path state of the Kuroshio south of Japan

| | 近岸非大弯曲 | 离岸非大弯曲 | 大弯曲 | 其他 |
|------|--------|--------|-----|-----|
| 数量 | 250 | 878 | 166 | 480 |
| 占比/% | 14 | 49 | 9 | 28 |

表 2 黑潮延伸体各个路径状态的比例

Tab. 2 Proportion of each path state of the Kuroshio Extension

| | 伸展态 | 收缩态 | 其他 |
|------|-------|-----|-----|
| 数量 | 1 006 | 638 | 130 |
| 占比/% | 57 | 36 | 7 |

为了定量地得到日本南部黑潮与黑潮延伸体路径状态之间的关系, 我们考察了当日本南部黑潮处于某一状态时, 黑潮延伸体所处的路径状态。统计结果表明, 当日本南部黑潮为近岸非大弯曲和大弯曲时, 黑潮延伸体处于伸展态的比例远大于其处于收缩态的比例, 两者比值约为 2(表 3); 而当日本南部黑潮处于离岸非大弯曲路径时, 黑潮延伸体处于伸展态与收缩态的比例较为接近, 处于收缩态的比例稍大于处于伸展态的比例。

表 3 日本南部黑潮与黑潮延伸体的定量关系

Tab. 3 Quantitative relationship between the Kuroshio south of Japan and Kuroshio Extension

| | 伸展态 | 收缩态 | 其他 |
|--------|----------|----------|----------|
| 近岸非大弯曲 | 110(44%) | 61(24%) | 79(32%) |
| 离岸非大弯曲 | 283(32%) | 388(44%) | 207(24%) |
| 大弯曲 | 87(52%) | 36(22%) | 43(26%) |

注: 括号内为同一黑潮路径状态下, 黑潮延伸体不同状态的占比

进一步, 从空间结构上看(图 6—图 8), 分类得到的黑潮延伸体的模态特征与前文所述一致, 例如, 分类为伸展态路径的两个准稳定弯曲可被清晰地观察到[图 6(a)、图 7(a)和图 8(a)], 路径更平直, 而分类为收缩态路径的两个准稳定弯曲是不清晰的[图 6(b)、图 7(b)和图 8(b)], 路径更曲折。当黑潮延伸体处于伸展态时, 流轴主要通过伊豆海脊北部的深水通道, 当其处于收缩态时, 流轴主要通过伊豆海脊南部的浅水通道, 这与前人的研究结果一致^[27]。

此外, 当黑潮处于离岸非大弯曲路径时, 黑潮延伸体处于伸展态和收缩态的比例接近, 根据黑潮流轴通过伊豆海脊的位置无法解释这一情况, 表明上述机制不能完全解释日本南部黑潮和黑潮延伸体

路径状态之间的关系,可能存在其他机制调制了两者之间的关联。

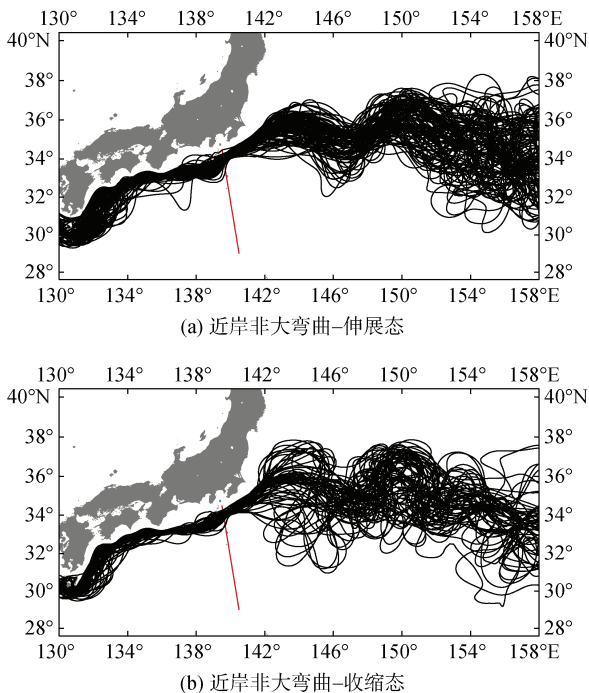


图 6 基于 FORA 资料的日本南部黑潮处于近岸非大弯曲时,黑潮延伸体的路径状态

Fig. 6 Path state of the Kuroshio Extension when the Kuroshio south of Japan is in a nearshore non-large meander path state based on FORA data

注: 红色线的位置为伊豆海脊的位置

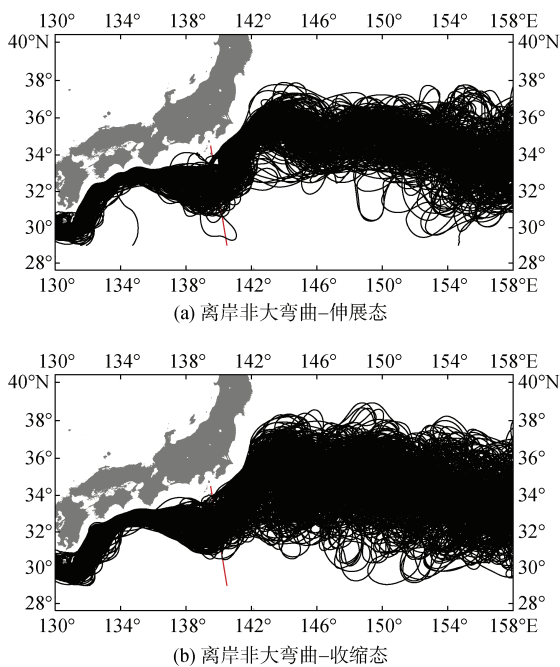


图 7 同图 6, 但是离岸非大弯曲

Fig. 7 Same as Fig. 6 but for the offshore non-large meander path

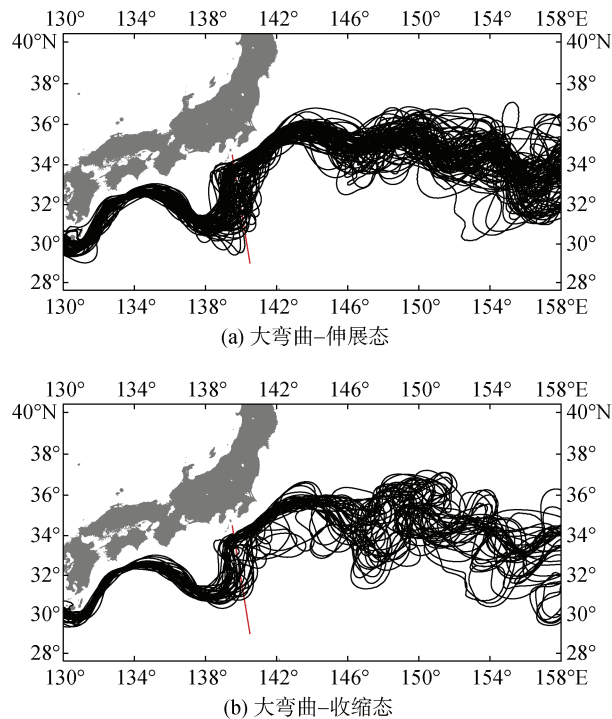


图 8 同图 6, 但是大弯曲

Fig. 8 Same as Fig. 6 but for the large meander path

3 结论与讨论

本文利用 23 a(1993—2015 年)的卫星高度计资料和 34 a(1982—2015 年)的再分析资料,对日本南部黑潮和黑潮延伸体路径状态之间的关系进行了定量分析,结果表明:日本南部黑潮和黑潮延伸体的路径状态存在关联。当日本南部黑潮处于近岸非大弯曲和大弯曲路径时,黑潮延伸体处于伸展态的比例远大于其处于收缩态的比例,两者比值约为 2;当日本南部黑潮处于离岸非大弯曲路径时,黑潮延伸体处于伸展态和收缩态的比例接近,处于收缩态的比例稍大于处于伸展态的比例,这与前人的定性结论不同,他们认为当黑潮处于离岸大弯曲路径时,黑潮延伸体处于不稳定模式^[27]。

黑潮流轴处于伊豆海脊的位置部分地决定了日本南部黑潮和黑潮延伸体路径状态之间的关联:当日本南部黑潮处于近岸非大弯曲路径和大弯曲路径时,黑潮流轴主要经过伊豆海脊北部的深水水道,此时黑潮延伸体更易形成伸展态。但是日本南部黑潮处于离岸非大弯曲路径时,黑潮延伸体形成伸展态和收缩态的比例较为接近,此时根据黑潮流轴处于伊豆海脊的位置难以解释上述关系,可能存在其他机制调制了两者之间的关联。例如,黑潮延伸体的路径

状态变化还与位于其东部约 160°W 的 SSH 异常信号西传有关^[14]。在未来的工作中,我们将利用数值模式开展敏感性试验,深入探讨日本南部黑潮和黑潮延伸体具有关联性的物理机制。

参考文献:

- [1] KAGIMOTO T, YAMAGATA T. Seasonal transport variations of the Kuroshio: An OGCM simulation[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1997, 27(3): 403-418.
- [2] SAITO H. The Kuroshio: Its recognition, scientific activities and emerging issues[M]//NAGAI T, SAITO H, SUZUKI K, et al. *Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical, and Ecosystem Dynamics*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2019: 1-11.
- [3] TAFT B. Characteristics of the flow of the Kuroshio south of Japan[M]//STOMMEL H, YOSHIDA K. *Kuroshio: Physical Aspects of the Japan Current*. Washington, D.C.: University of Washington Press, 1972: 165-216.
- [4] 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.
- [5] KAWABE M. Variations of current path, velocity, and volume transport of the Kuroshio in relation with the large meander[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1995, 25(12): 3103-3117.
- [6] XU H, TOKINAGA H, XIE S P. Atmospheric effects of the Kuroshio large meander during 2004–05[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(17): 4704-4715.
- [7] 侍茂崇. 物理海洋学[M]. 济南: 山东教育出版社, 2004. SHI Maichong. *Physical Oceanography*[M]. Jinan: Shandong Education Press, 2004.
- [8] 范江涛, 陈新军, 曹杰, 等. 西北太平洋柔鱼渔场变化与黑潮的关系[J]. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(3): 378-384. FAN Jiangtao, CHEN Xinjun, CAO Jie, et al. The variation of fishing ground of *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific concerning with Kuroshio current[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010, 19(3): 378-384.
- [9] QIU B. Interannual variability of the Kuroshio Extension system and its impact on the wintertime SST field[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2000, 30(6): 1486-1502.
- [10] 冯劭华, 罗德海, 钟霖浩. 黑潮延伸体中尺度涡年代际变化与北太平洋风暴轴变化之间的关系[J]. *大气科学*, 2015, 39(5): 861-874. FENG Shaohua, LUO Dehai, ZHONG Linhao. The relationship between mesoscale eddies in the Kuroshio extension region and storm tracks in the North Pacific[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 39(5): 861-874.
- [11] XU L, LI P, XIE S P, et al. Observing mesoscale eddy effects on mode-water subduction and transport in the North Pacific[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 1-9.
- [12] KOUKETSU S, KANEKO H, OKUNISHI T, et al. Mesoscale eddy effects on temporal variability of surface chlorophyll a in the Kuroshio Extension[J]. *Journal of Oceanography*, 2016, 72(3): 439-451.
- [13] SHAN X, JING Z, GAN B, et al. Surface heat flux induced by mesoscale eddies cools the Kuroshio - Oyashio Extension region[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(1): e2019GL086050.
- [14] QIU B, CHEN S. Variability of the Kuroshio Extension jet, recirculation gyre, and mesoscale eddies on decadal time scales[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2005, 35(11): 2090-2103.
- [15] PIERINI S. A Kuroshio Extension system model study: Decadal chaotic self-sustained oscillations[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2006, 36(8): 1605-1625.
- [16] 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.
- [17] WANG Q, TANG Y, PIERINI S, et al. Effects of singular-vector-type initial errors on the short-range prediction of Kuroshio Extension transition processes[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(15): 5961-5983.
- [18] QIU B, CHEN S, 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.
- [19] USUI N, WAKAMATSU T, TANAKA Y, et al. Four-dimensional variational ocean reanalysis: a 30-year high-resolution dataset in the western North Pacific (FORA-WNP30)[J]. *Journal of Oceanography*, 2017, 73(2): 205-233.
- [20] USUI N, FUJII Y, SAKAMOTO K, et al. Development of a four-dimensional variational assimilation system for coastal data assimilation around Japan[J]. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(10): 3874-3892.
- [21] USUI N. Progress of Studies on Kuroshio Path Variations South of Japan in the Past Decade[M]//NAGAI T, SAITO H, SUZUKI K, et al. *Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical, and Ecosystem Dynamics*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2019: 147-161.
- [22] LIU T, WANG B, HIROSE N, et al. High-resolution modeling of the Kuroshio Current power south of Japan[J]. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 2018, 4(1): 37-55.
- [23] FUDEYASU H, YOSHIDA R. Statistical analysis of the

- relationship between upper tropospheric cold lows and tropical cyclone genesis over the Western North Pacific[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2019, 97(2): 439-451.
- [24] USUI N, OGAWA K. Sea level variability along the Japanese coast forced by the Kuroshio and its extension[J]. *Journal of Oceanography*, 2022, 78(6): 515-527.
- [25] KOSUGI N, HIROSE N, TOYODA T, et al. Rapid freshening of Japan Sea Intermediate Water in the 2010s[J]. *Journal of Oceanography*, 2021, 77(2): 269-281.
- [26] FUDEYASU H, ITO K, MIYAMOTO Y. Characteristics of tropical cyclone rapid intensification over the western North Pacific[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(21): 8917-8930.
- [27] SEO Y, SUGIMOTO S, HANAWA K. Long-term variations of the Kuroshio Extension path in winter: Meridional movement and path state change[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(15): 5929-5940.

Quantitative analysis of the relationship between the path states of the Kuroshio south of Japan and the Kuroshio Extension

CHEN Cheng-ji^{1, 2}, WANG Qiang^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, Ministry of Natural Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Received: Feb. 20, 2022

Key words: Kuroshio; Kuroshio Extension; relationship; quantitative analysis

Abstract: The Kuroshio south of Japan exhibits various path states: a nearshore non-large mender path, an offshore non-large mender path, and a large mender path. In addition, the Kuroshio Extension (KE) exhibits a typical bimodality: elongation and contraction states. Although the Kuroshio south of Japan and KE have adjacent geographical positions, the relationship between their path states remains debatable. In this paper, this relationship is quantitatively analyzed based on the satellite sea surface height data and long-term high-resolution reanalysis data of the ocean. The results indicate that the path states of the Kuroshio south of Japan and KE are correlated. When Kuroshio south of Japan is in the nearshore non-large mender and large mender paths, KE is mainly in the elongation state. When the Kuroshio south of Japan is in an offshore non-large mender path, KE has a similar probability of being in the elongation and contraction states. Further analysis implies that the location of the Kuroshio current axis above the Izu Ridge partly determines the abovementioned relationship, and other factors may modulate this correlation.

(本文编辑: 丛培秀)