

POM 模式在日本南部黑潮路径变异研究中的应用

邹广安^{1,2,3}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 河南大学, 河南 开封 475004)

摘要: 日本南部黑潮路径变异对北太平洋地区的气候和环境具有显著的影响, 对黑潮路径变异的研究具有重要的意义。本文利用 POM (Princeton Ocean Model) 数值模式模拟了日本南部黑潮的路径变异情况, 分析了黑潮大弯曲路径形成的可能机制。研究结果表明, 当黑潮处于非大弯曲路径时, 相对位势涡度的平均值呈现递减趋势, 说明日本南部低位势涡度水在不断积累, 这样会使得四国再循环流的强度增强, 迫使黑潮保持平直路径, 同时, 近岸黑潮垂直流速剪切增大, 斜压不稳定性的作用也逐渐增大; 当黑潮从非大弯曲路径向大弯曲路径过渡时, 再循环流强度的减弱会导致黑潮的流速剪切减小。根据海表高度异常场以及海洋上层流场信息发现, 近岸黑潮附近的气旋涡会随着再循环流区域反气旋涡的东侧向南运动, 最终导致黑潮大弯曲的发生。分析涡流的能量, 结果显示, 黑潮大弯曲路径的形成与斜压不稳定性密切相关。

关键词: 黑潮路径变异; POM (Princeton Ocean Model); 斜压不稳定性

中图分类号: P731.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2016)02-0151-08

doi: 10.11759/hyxx20150127001

黑潮(Kuroshio Current)是北太平洋副热带环流系统中非常著名的一支西边界流, 又称日本暖流, 是世界上第二大暖流, 仅次于墨西哥湾暖流。黑潮因其水色深蓝, 远看似黑色而得名。一般认为, 黑潮的起源主要是由北赤道暖流在菲律宾群岛东部向北分叉形成的, 向南的一支称为棉兰老流。黑潮主轴沿着巴士海峡的东侧北上, 经台湾东部进入中国东海, 从吐噶喇海峡北部流出东海, 进入日本南部的北太平洋海域。黑潮具有高温、高盐、流速快、流量大等特点, 其从低纬向中高纬输送了大量的热量, 对流经区域乃至全球的气候起着重要的作用。研究发现, 黑潮流经日本南部海域时会出现两种典型的路径形态^[1]: 大弯曲路径(LM)和非大弯曲路径(NLM)。这两种路径形态和位置的变化是否发生大弯曲, 对北太平洋地区的气候、渔业、航海安全以及海洋资源等都具有显著的影响^[2-3]。此外, 日本南部的黑潮路径变异对我国东部沿岸以及长江流域的降水也有较大的影响^[4-5]。因此, 弄清黑潮路径变异的原因和机制, 对黑潮路径变异进行预测具有重要的意义。

前人对于黑潮大弯曲路径形成的原因给出了多种可能的机制解释。Kawabe^[6]利用简单的动力学模式研究发现, 日本九州岛东南部的黑潮小弯曲对于下游黑潮路径有明显的影

响。海洋模式进行研究, 认为日本九州岛东南部涡的增强有利于黑潮从平直路径向大弯曲路径转换。Qiu 等^[8]利用两层原始方程模式进行研究, 认为日本南部黑潮路径变异取决于黑潮内部的自持震荡系统。Usui 等^[9]利用高分辨率的大洋环流(OGCM)模式研究了2004 年发生的典型黑潮大弯曲事件, 认为日本九州岛南部的黑潮触发小弯曲是黑潮大弯曲形成的重要原因。Miyazawa 等^[10]研究认为 2004 年黑潮大弯曲是由于台湾以东强的反气旋涡引起九州岛南部形成触发小弯曲, 进而形成黑潮大弯曲。Tsujino 等^[11]认为日本四国再循环流区域的涡的相互作用是黑潮大弯曲路径形成的主要原因。

目前, 由于海洋观测资料有限, 人们对于黑潮大弯曲的形成原因和机制没有统一的认识, 高分辨率的大洋环流模式(OGCM)为研究黑潮路径变异现象提供了很大的便利和可能性。目前, 采用 POM(Princeton Ocean Model)模式对黑潮的研究工作相对较少。Kagimoto^[12]利用 POM 模式模拟了黑潮的

收稿日期: 2015-01-27; 修回日期: 2015-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(41230420)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41230420]

作者简介: 邹广安(1985-), 男, 陕西安康人, 博士研究生, 主要从事西边界流的数值模拟和预报研究, 电话: 15736863632, E-mail: zouguanan00@163.com

季节变化。Miyazawa 等^[13]利用 POM 模式对黑潮路径变异进行了集合预报研究。Waseda 等^[14]采用修订的 POM 模式研究了涡的相互作用对黑潮的影响。但是, 这些工作并没有利用 POM 模式将黑潮的自持系统和涡的相互作用结合起来, 也没有从涡流能量分析角度来考察黑潮的路径变异情况。本文采用 POM 模式模拟了日本南部黑潮的路径变异过程, 进一步分析和讨论了黑潮大弯曲形成的可能机制和原因。

1 模式设置和模拟结果

POM 模式是由美国普林斯顿大学 Alan Blumberg 和 George L. Mellor 于 1977 年建立起来的一个基于三维斜压原始方程海洋数值模式^[15], 该模式经过多年的不断发展和完善, 目前已经成为国内外广泛使用的海洋数值模式之一。

模式的模拟区域设置为 (30°S~60°N, 110°E~80°W), 覆盖了整个北太平洋区域。模式的水平分辨率为 0.2°×0.2°, 垂直方向分 16 层, 外模式的时间步长为 20 s, 内模式的时间步长为 90 s。模式采用的是 ETOPO5 的分辨率为 1/12°×1/12°的地形数据, 模式的温盐资料采用的是 Levitus WOA97 分辨率为 1/4°×1/4°的月平均气候态温盐场, 模式的风应力强迫场为 NCEP/NCAR 再分析的月平均风应力资料(真实时间的月平均风场资料)。

完成了以上的模式基本设置后, 首先将模式积分 20 a, 每 10 d 输出一次结果, 我们将后 10 a 的模式输出结果作为分析数据, 用来分析和检验 POM 模式对黑潮路径变异的模拟能力。为了考察黑潮路径随时间的变化, Qiu 等^[8]采用 136°~140°E 黑潮流轴离岸的平均距离定义黑潮路径指数。类似于该定义, 我们也定义了一个指数来表征黑潮路径所处的状态。该黑潮路径指数定义为: 黑潮流轴在 136°~141°E 最南端点的纬度, 黑潮流轴用海表高度(SSH)30 cm 等值线表示。由定义可知, 黑潮路径指数值较小时, 表明黑潮流轴与日本南岸的距离越远, 黑潮处于大弯曲路径, 反之, 指数值较大时, 黑潮处于非大弯曲路径。图 1 给出了 POM 模式模拟的黑潮路径指数的时间序列, 可以看出, 黑潮的路径变异主要呈现年际变化特征, 这 10 a 间共发生了 3 次大弯曲事件, 每次大弯曲事件发生的强度不同, 并且黑潮在大弯曲路径和非大弯曲路径的维持时间也有所相同。与观测资料对比, POM 模式模拟的黑潮大弯曲路径的维持

时间相对较短, 这与其他学者用 POM 模式模拟的黑潮路径情况类似^[10, 13], 这也是目前许多 OGCM 模式都存在的模拟缺陷^[9, 16-17]。

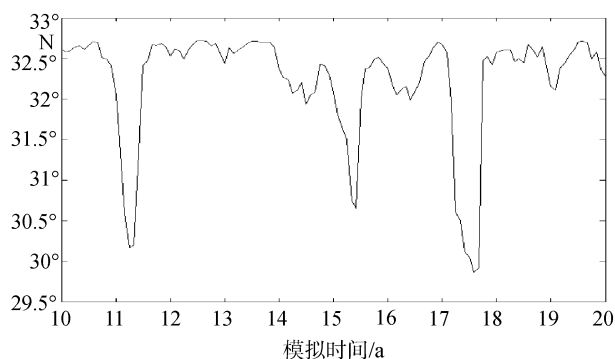


图 1 黑潮路径指数的时间序列
Fig. 1 Time series of the Kuroshio path index

为了显示 POM 模式模拟的黑潮路径的变异情况, 图 2 给出了模式第 17~18 年的一次黑潮大弯曲路径的发生、发展和消亡过程。由图 2 可知, 模式在第 17 年的 2 月时, 黑潮处于典型的非大弯曲路径, 在第 17 年的 3 月有个小弯曲形成(图 2b), 小弯曲逐渐发展, 到第 17 年的 4 月时形成了典型的大弯曲路径(图 2c), 大弯曲维持了一段时间, 到第 17 年的 8 月黑潮的流轴开始形成一个涡旋(图 2e), 随着涡旋的脱落并且西传, 黑潮在第 17 年的 12 月又回到了典型的非大弯曲路径(图 2h)。这一过程与 Qiu 等^[8]采用 2.5 层浅水模式模拟的黑潮路径变异过程也比较类似。该模式模拟的黑潮大弯曲的发生过程与观测到的黑潮大弯曲发生比较一致^[9]。这说明 POM 模式也能够捕捉到黑潮路径变异的基本特征, 能够模拟黑潮路径变异的基本动力学过程。尽管模拟的黑潮大弯曲的维持时间相对较短, 但是, 由于本文主要讨论的是黑潮大弯曲路径形成的机制, 因此, 该模式对黑潮大弯曲路径维持时间的模拟不足不会给我们的研究造成较大影响。

2 黑潮大弯曲路径形成的机制分析

本文对模拟的三个大弯曲事件的形成过程进行了分析, 三次大弯曲的形成过程和原因基本一致。因此, 主要以第 17~18 年黑潮大弯曲事件(图 2)为例给出详细的分析和描述过程。

根据 Qiu 等^[8]的定义, 将相对涡度定义如公式(1):

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

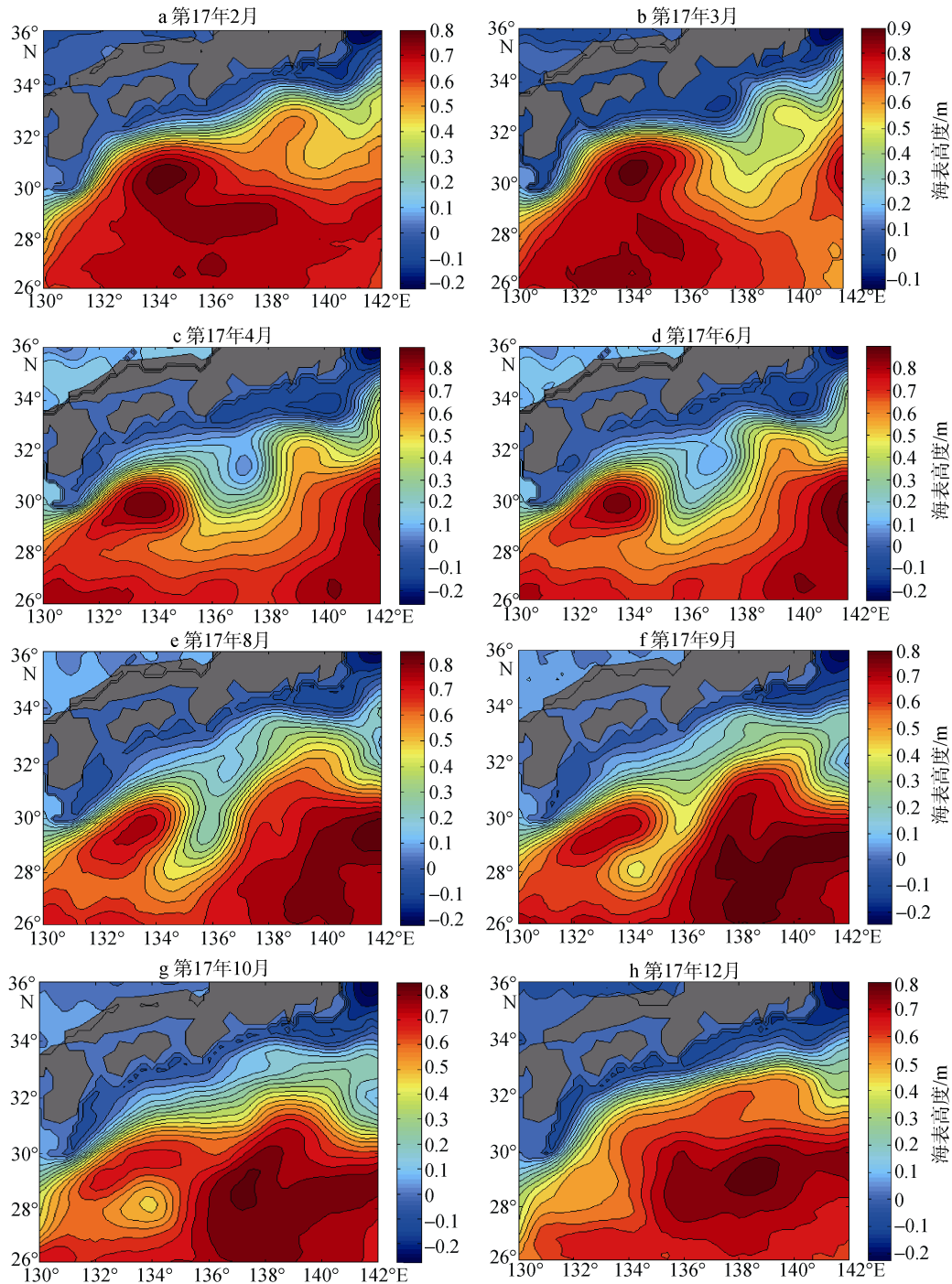


图2 模式第17~18年发生的黑潮大弯曲事件的海表高度场序列

Fig. 2 Sequence of SSH field including the Kuroshio large meander event in model year 17-18

其中, u 和 v 分别表示纬向和经向流速, 相对涡度 ζ 表示的是四国再循环流区域($25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $132^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)内的平均值, 纬向和径向流速是由海洋上层 500 m 的流场平均值来计算的。

为了表征黑潮再循环流的强度 S , 根据 Qiu 等的定义^[18], 定义了公式(2):

$$S(t) = \iint_A h(x, y, t) dx dy \quad (2)$$

其中, t 表示时间, A 表示四国再循环流区域($25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $132^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)内 $\text{SSH} > 0.2 \text{ m}$ 的区域, h 表示海表面高度。

此外, 我们将近岸黑潮的垂直流速剪切 κ 定义为公式(3):

$$\kappa = \langle U_{0-200} - U_{200-600} \rangle \quad (3)$$

其中 $\langle \cdot \rangle$ 表示近岸区域(30°~35°N, 132°~140°E)内的平均值, U_{0-200} 和 $U_{200-600}$ 分别表示 0~200 m 和 200~600 m 近岸黑潮流速的平均值, 其中 $U_i = u_i + v_i$.

通过上述定义公式(1)~公式(3)进行计算, 图 3 给出了黑潮大弯曲及大弯曲事件发生前半年的相对涡度平均、四国再循环流的强度和近岸黑潮垂直流速剪切的时间序列。由图可见, 当黑潮处于非大弯曲路径时, 相对涡度的平均值出现了明显的递减趋势

(图 3a), 也就是说, 低位势涡度水在不断积累, 这样会引起黑潮再循环流的强度增强(图 3b), 迫使黑潮保持平直路径沿着日本南岸向东流, 此外, 四国再循环流的增强会导致黑潮的近岸流速剪切增大(图 3c)。当黑潮从非大弯曲路径向大弯曲路径过渡时, 日本南部再循环流的强度减小, 黑潮的流速剪切也随着减小, 由于正压或斜压不稳定性的作用使得能量向涡动能转化, 最终形成大弯曲事件, 这与 Qiu 等用简单的两层海洋模式得出的结论^[8]一致。

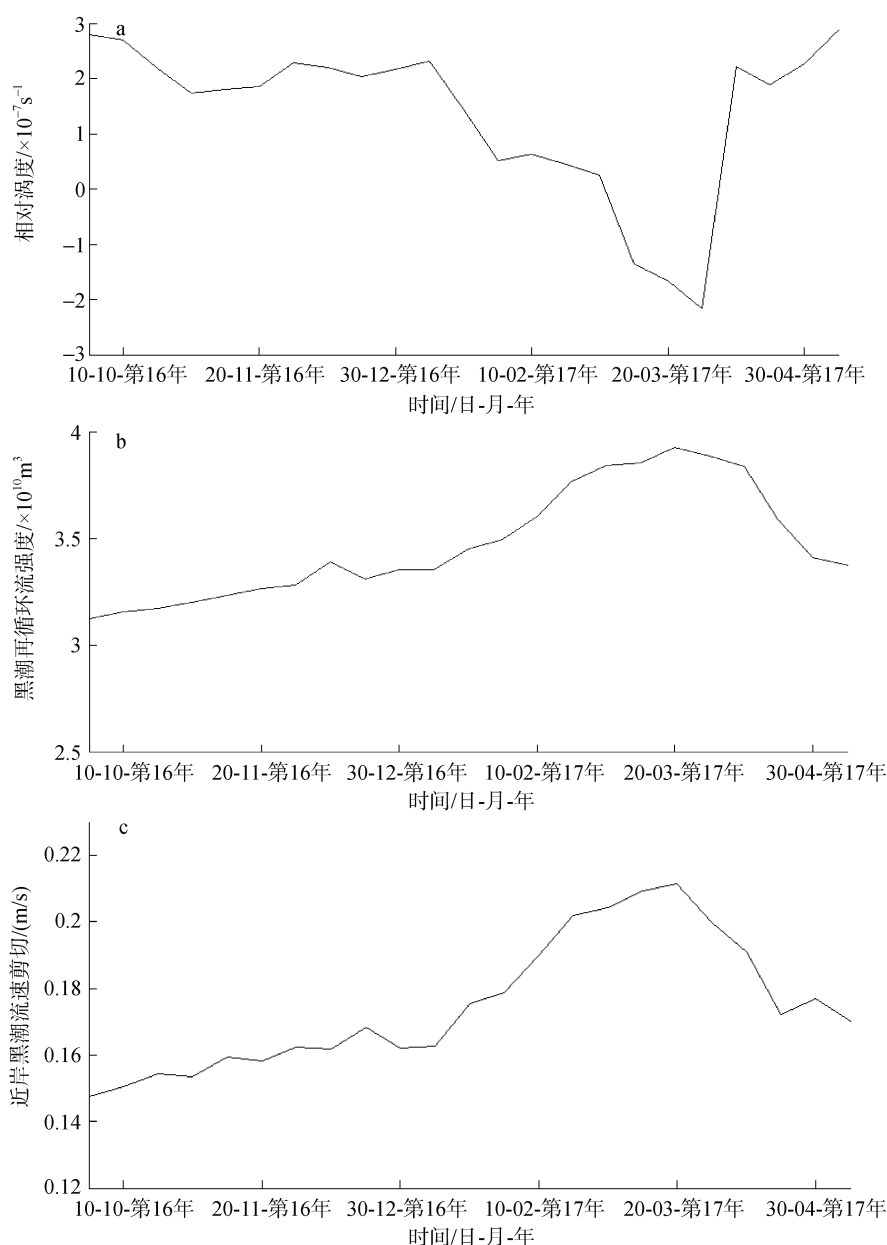


图 3 相对涡度平均(a)、黑潮再循环流强度(b)和近岸黑潮流速剪切(c)的时间序列

Fig. 3 Time series of the average relative vorticity (a), the strength of the Shikoku recirculation gyre (b), and the vertical shear of the alongshore Kuroshio (c)

为了考察涡流对黑潮的影响, 图 4 给出了黑潮大弯曲发生过程中海表高度异常(SSHA)场的信号情况(用背景场的值减去气候态平均场的值), 可以看出, 在黑潮大弯曲形成过程中, 日本九州岛东南部的冷异常信号向东传播(图 4a, 图 4b), 并且冷异常

在四国再循环流区域的强度逐渐增大(图 4c), 由于黑潮对日本南岸的流速剪切减小, 冷异常信号会向南运动, 最终在黑潮流轴的弯曲处附近形成一个大的气旋涡(图 4d), 这个气旋涡对黑潮大弯曲的形成具有重要的影响。

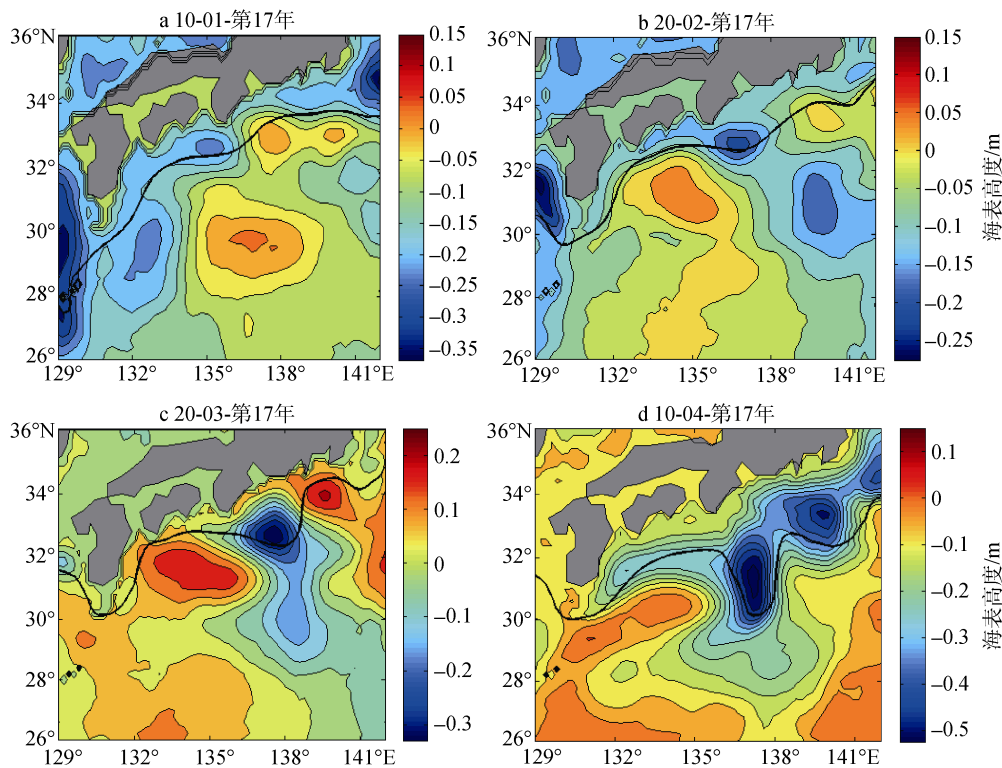


图 4 海表高度异常以及黑潮流轴(黑色实线)

Fig. 4 SSH anomaly and the Kuroshio axes (black solid line)

此外, 我们给出了黑潮大弯曲发生前一个月的海洋上层 500 m 平均水平流速场和海表高度场, 如图 5 所示, 可以看出, 在黑潮再循环流区域内有一个反气旋涡([135°E, 32°N]附近), 而在黑潮流轴北部([137.5°E, 33.5°N]附近)有一个气旋涡存在, 当黑潮的近岸流速剪切减小时, 再循环流区域反气旋涡的东侧向南运动, 同时会携带着气旋涡向南运动, 最终导致黑潮大弯曲的形成。

采用涡流的能量分析来考察正压或者斜压不稳定性对黑潮大弯曲的影响, 根据 Tsujino 等^[11]提出的将背景流场分成平均场(前一个时间段的月平均值)和涡度场(当前时间段的月平均值与前一时间段月平均值的差), 将平均动能(MKE)向涡动能(EKE)的正压(barotropic, BT)转化率 R_{BT} 定义如下:

$$R_{BT} = -\rho_0(u'u' \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + u'v'(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}) + v'v' \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}) \quad (4)$$

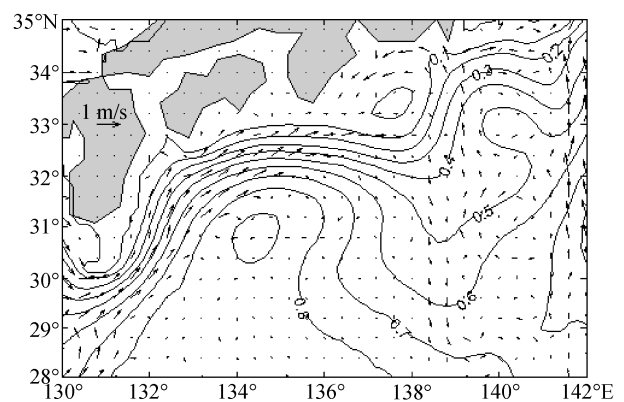


图 5 海表高度场(单位: m)和海洋上层 500m 的平均流速场(单位: m/s)

Fig. 5 SSH field (unit: m) and mean velocity field (unit: m/s) at the upper 500 m

其中, ρ_0 表示 Boussinesq 近似下的海水密度, $\bar{u}(\bar{v})$

表示平均场中的纬向(经向)流速, $u'(v')$ 表示涡度场中的纬向(经向)扰动流速, 平均流速和扰动流速都采用的是上层 300 m 的平均值, 该定义表明了正压不稳定性的作用。

将平均位能 (MPE) 向涡位能 (EPE) 的斜压 (baroclinic, BC) 转化率 R_{BC} 定义为:

$$R_{BC} = \frac{g}{\bar{\rho}_z} (\delta \rho' \mathbf{u}') \cdot \nabla \delta \bar{\rho} \quad (5)$$

其中, g 表示重力加速度, $\mathbf{u}'=(u',v',0)$ 表示扰动流速场, $\delta \bar{\rho}$ 和 $\delta \rho'$ 分别平均场和涡度场密度, $\bar{\rho}_z$ 表示背景密度场在密度 z 处的垂向变化率, ∇ 表示水平梯度算子。

另外, 考虑到涡浮力通量项 $\delta \rho' \mathbf{u}'$ 的旋转分量在

平均场和涡度场的转换中作用不大^[11], 因此, 采用斜压转化率方程中涡浮力通量项的散度(div)分量来计算动力斜压转化率 R_{dynBC} , 考虑动力过程对能量转化的影响:

$$R_{dynBC} = \frac{g}{\bar{\rho}_z} (\delta \rho' \mathbf{u}')_{div} \nabla \delta \bar{\rho} \quad (6)$$

上述的涡能量转化率公式的详细推导以及具体计算过程可参阅文献[11]。

通过三个能量转化公式的计算, 图 6 给出了黑潮大弯曲发生过程中上层 300 m 处的正压能量转化率(第一行)、斜压能量转化率(第二行)和动力斜压能量转化率(第三行)情况, 垂直深度之所以选取 300 m, 该深度的涡能量转化率比较大, 标准差也较大。

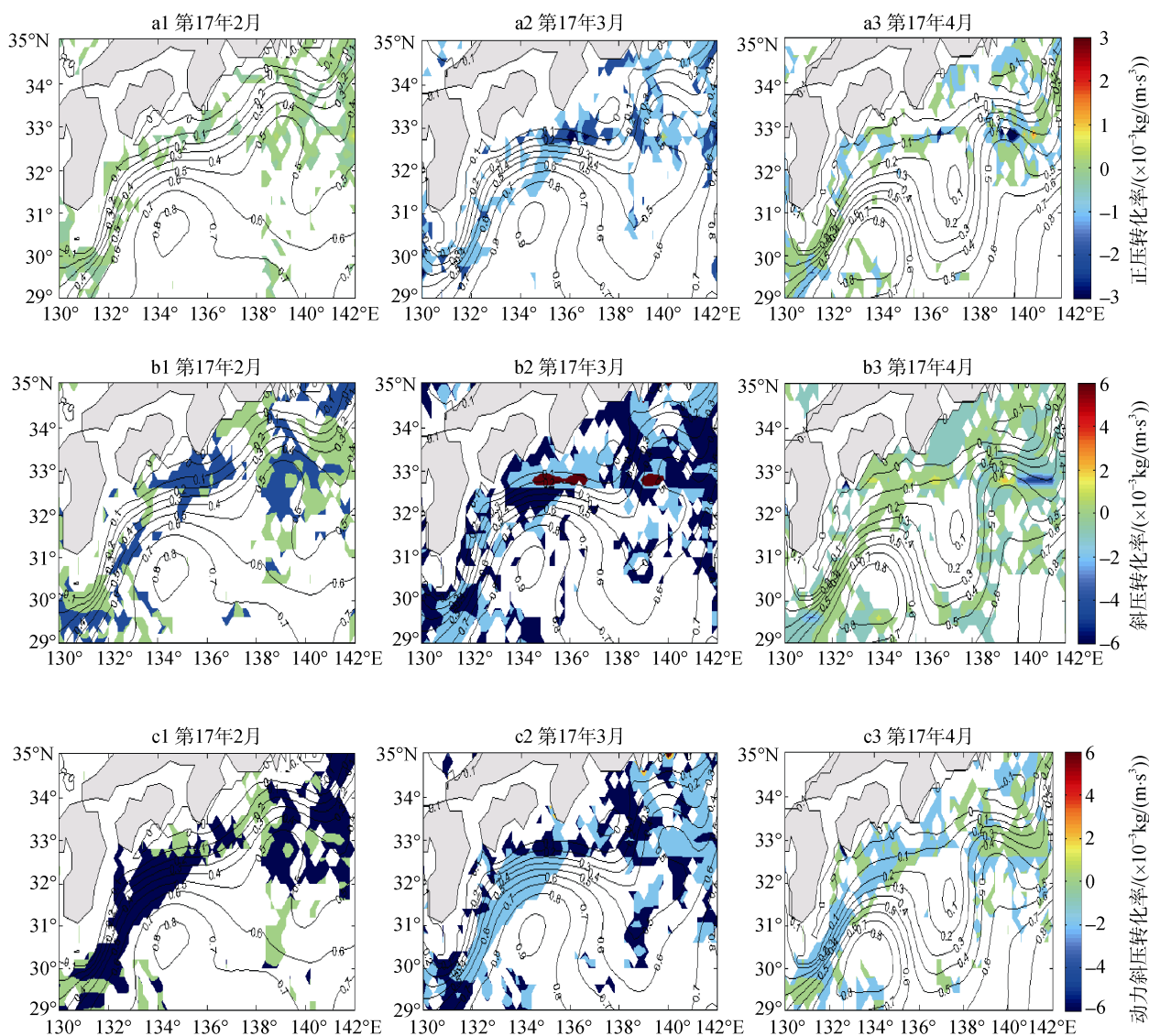


图 6 300 m 深度黑潮大弯曲发生过程中的能量转化率(单位: $\times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$)以及海表面高度(单位: m)

Fig. 6 Energy conversion rates (unit: $\times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$) at 300 m

从图中可以发现, 涡度能量分布的主要区域位于黑潮流轴及其流轴附近, 这可能是由于黑潮流轴的流速较大的原因。此外, 斜压和动力斜压能量转化率的信息要比正压能量转化率的信息量大, 表明黑潮大弯曲发生过程中斜压不稳定性起着主要的作用。同时, 我们计算了黑潮大弯曲事件发生及其发生前半年时间的能量转化率在日本四国再循

环流区域($25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $132^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)内绝对值的平均值, 如图 7 所示, 我们发现斜压转化率的值要大于正压转化率的值, 并且, 随着近岸流速剪切的增大(图 3c), 斜压不稳定的值也在增大。也就是说, 斜压不稳定在黑潮大弯曲发生过程中的作用要比正压不稳定性的作用大, 是引发黑潮大弯曲事件的重要因素。

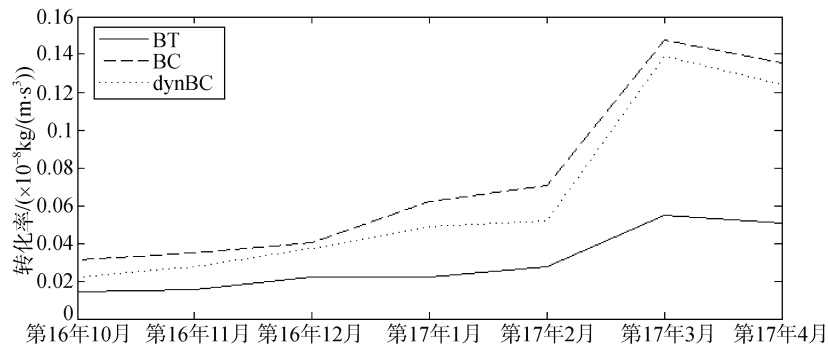


图 7 3 种能量转化率在区域($25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $132^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)内绝对值的平均值的时间序列(单位: $\times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^3)$)

Fig. 7 Time series of the mean absolute value of three conversion rates over the region ($25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $132^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$) (unit: $\times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^3)$).

3 结论

本文基于前人对日本南部黑潮大弯曲现象的研究结果, 利用 POM 模式成功模拟了黑潮路径变异情况, 并且分析了黑潮大弯曲形成的可能原因和机制。结果表明, 黑潮的自身动力过程以及南部再循环区域涡的作用能够促使黑潮发生大弯曲事件。日本南部低位涡水的不断积累, 引起黑潮再循环流的强度增强, 使得黑潮保持平直路径, 增强的再循环流会导致黑潮的近岸流速剪切增大, 从而, 斜压不稳定性的作用也在逐渐增大; 当黑潮从非大弯曲路径向大弯曲路径开始过渡时, 日本南部再循环流的强度减小, 黑潮的流速剪切也随着减小, 黑潮流轴附近的上层气旋涡会随着再循环流区域反气旋涡的东侧向南运动, 导致黑潮大弯曲的形成。利用涡度能量分析理论进一步验证了黑潮大弯曲的发生与斜压不稳定性密切相关。鉴于该模式能够很好地模拟黑潮大弯曲事件, 接下来将采用该模式来进行数值预报研究, 考虑目标观测效果对黑潮大弯曲路径预报的影响。

致谢: 本文的研究工作得到了中国科学院海洋研究所穆院士的悉心指导, 在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] Taft BA. Characteristics of the flow of the Kuroshio south of Japan[C] //Stommel H, Yoshida K. Kuroshio: Its Physical Aspects. Tokyo: University of Tokyo Press, 1972: 165-216.
- [2] 冯士筌, 李凤岐, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999, 170-171.
Feng Shizuo, Li Fengqi, Li Shaojing. An Introduction to Marine Science[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999, 170-171.
- [3] Xu H M, Tokinaga H, Xie S P. Atmospheric effects of the Kuroshio large meander during 2004-05[J]. J Climate, 2010, 23: 4704-4715.
- [4] 于振娟. 东海黑潮流轴的变化及日本以南黑潮大弯曲同青岛降水量的关系[J]. 海洋科学, 1998, 4: 6-11.
Yu Zhenjuan. Relationship of variation of axial position of the Kuroshio in the East China sea and its meanders south of Japan with the precipitation in Qingdao[J]. Marine Sciences, 1998, 4: 6-11.
- [5] 侍茂崇. 物理海洋学[M]. 济南: 山东教育出版社, 2004: 157.
Shi Maochong. Physical oceanography[M]. Jinan: Shandong Education Press, 2004: 157.
- [6] Kawabe M. Model study of flow conditions causing the large meander of the Kuroshio in relation with the large meander[J]. J Phys Oceanogr, 1996, 26: 2449-2461.
- [7] Akitomo K, Kurogi M. Path transition of the Kuroshio due to mesoscale eddies: A two-layer, wind-driven experiment [J]. J Oceanogr, 2001, 57(6): 735-741.

- [8] Qiu B, Miao W F. Kuroshio path variations south of Japan: Bimodality as a self-sustained internal oscillation[J]. *J Phys Oceanogr*, 2000, 30: 2124-2137.
- [9] Usui N, Tsujino H, Nakano H, et al. Formation process of the Kuroshio large meander in 2004 [J]. *J Geophys Res*, 2008, 113: C08047.
- [10] Miyazawa Y, Kagimoto T, Guo X, et al. The Kuroshio large meander formation in 2004 analyzed by an eddy-resolving ocean forecast system[J]. *J Geophys Res*, 2008, 113: C10015.
- [11] Tsujino H, Usui N, Nakano H. Dynamics of Kuroshio path variations in a high-resolution general circulation model[J]. *J Geophys Res*, 2006, 111: C11001.
- [12] Kagimoto T, Yamagata T. Seasonal Transport Variations of the Kuroshio: An OGCM Simulation[J]. *J Phys Oceanogr*, 1997, 27(3): 403-418.
- [13] Miyazawa Y, Yamane S, Guo X, et al. Ensemble forecast of the Kuroshio meandering[J]. *J Geophys Res*, 2005, 110: C10026.
- [14] Waseda T, Mitsudera H, Taguchi B, et al. On the eddy-Kuroshio interaction: Meander formation processes[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108: C73220.
- [15] Blumberg A F, Mellor G L. Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight[J]. *J Geophys Res*, 1983, 88: 4579-4592.
- [16] Usui N, Tsujino H, Fujii Y, et al. Generation of a trigger meander for the 2004 Kuroshio large meander[J]. *J Geophys Res*, 2008, 113: C01012.
- [17] Masumoto Y. Generation of small meanders of the Kuroshio south of Kyushu in a high-resolution ocean general circulation model[J]. *J Oceanogr*, 2004, 60: 313-320.
- [18] Qiu B, Chen S M. Variability of the Kuroshio Extension jet, recirculation gyre and mesoscale eddies on decadal time scales[J]. *J Phys Oceanogr*, 2005, 35: 2090-2103.

Application of the POM model to study the path variations of Kuroshio currents in southern Japan seas

ZOU Guang-an^{1, 2, 3}

(1. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Henan University, Kaifeng 475004, China)

Received: Mar., 31, 2015

Key words: Kuroshio path variations; POM model; Baroclinic instability

Abstract: Path variations of the Kuroshio currents in the southern Japan seas have a significant impact on the climate and environment. In this study, we used the Princeton Ocean Model (POM) to simulate the Kuroshio path variations south of Japan, and analyzed the formation mechanism of the Kuroshio large meander events. The results show a decreasing trend of the average relative vorticity when the Kuroshio is taken as the non-large path, indicating an accumulation of the low potential vorticity (PV) south of Japan which intensified the strength of the Shikoku recirculation gyre, thereby forcing the Kuroshio into its straight path. Meanwhile, the vertical velocity shear of the alongshore Kuroshio was increasing, and the impact of the baroclinic instability was also gradually increasing. During the transition period from the Kuroshio non-large meander to the large meander, a sudden release of velocity shear corresponded well to the weakening of the Shikoku recirculation gyre. According to the sea surface height (SSH) anomaly fields and the mean velocity field in the upper ocean, we found that the cyclonic eddy around the offshore Kuroshio moved southward, carried by a southward flow in the eastern part of the anticyclonic eddy in the region of the Shikoku recirculation gyre. This led to the eventual development of the Kuroshio large meander. The results of our eddy energetic analysis indicate that the formation of the Kuroshio large meander is closely associated with baroclinic instability.

(本文编辑: 李晓燕)