

日本南部黑潮路径发生弯曲的最优前期征兆及其发展机制

徐强强^{1,2,3}, 王 强^{1,4}, 马利斌^{1,3}

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国水产科学研究院 东海水产研究所, 农业部东海与远洋渔业资源开发利用重点实验室, 上海 200090; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 4. 中国科学院大气物理研究所 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 基于正压出入流模式, 利用条件非线性最优扰动(CNOP)方法研究初始异常的位置与模态对日本南部黑潮路径变异的影响。以模式模拟出的黑潮平直路径的平衡态作为参考态, 计算 CNOP, 考察该扰动随时间的发展, 并与随机扰动的发展进行对比。结果表明, CNOP 能够导致黑潮弯曲路径发生, 随机扰动则不能。因此, CNOP 可以作为导致日本南部黑潮路径发生弯曲的一种最优前期征兆。通过分析 CNOP 和随机扰动的发展过程, 可以得出: (1) CNOP 使黑潮发展成弯曲路径的过程是一个气旋涡向下游传播并增长的过程。(2) 气旋涡的向东传播都是非线性项的作用, 也就是涡度平流造成的。(3) CNOP 和随机扰动发展过程中所产生的气旋涡均会传播到下游区域, 但是 CNOP 产生的气旋涡能够增强, 最终导致弯曲路径发生, 而随机扰动产生的气旋涡则会减弱, 并不能导致弯曲路径发生。分析发现, 在 CNOP 实验中, 非线性作用使气旋涡增大; 但在随机扰动实验中, 非线性作用使气旋涡减弱, 所以非线性作用对日本南部黑潮路径发生弯曲有重要影响。(4) 底摩擦效应对日本南部黑潮路径变异影响较小。本文揭示的黑潮路径发生弯曲的最优前期征兆及其非线性发展机制, 对提高黑潮路径变异的预报技巧具有重要意义。

关键词: 黑潮路径; 条件非线性最优扰动(CNOP); 前期征兆; 正压出入流模式

中图分类号: P731.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2013)12-0052-10

黑潮是北太平洋副热带环流的西边界流, 它起源于北赤道流, 经台湾东部, 流经我国东海, 然后折向东, 沿日本南岸向东流去。黑潮的热量输送对全球气候起重要作用, 它的位置和流场会影响渔业、海洋运输等, 所以关于黑潮的研究一直受到国内外学者的广泛关注。

观测发现, 在日本南部区域黑潮主要存在两种典型路径^[1]: 平直路径和弯曲路径。图 1 显示了平直路径和弯曲路径的海表高度分布。两种路径的维持时间约为几年到十几年, 但它们的过渡时间仅为几个月^[2]。

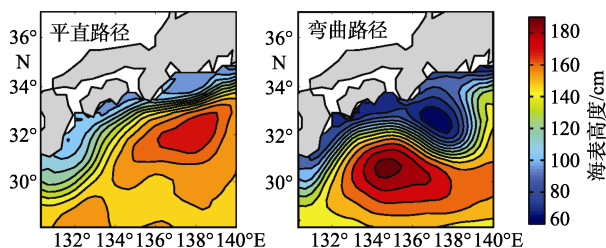


图 1 日本南部黑潮的两种典型路径(摘自 Wang 等^[3]的图 1)

Fig. 1 Two typical paths of the Kuroshio in the south of Japan, adapted from Figure 1 in Wang et al^[3]

日本南部黑潮路径变异会对邻近区域的气候造成重要影响, 例如, 当黑潮路径发生弯曲时, 在弯曲路径与日本南岸之间会形成一个巨大的冷水团, 该冷水团通过海气相互作用影响大气环流, 从而影响气候^[4]; 侍茂崇^[5]也指出日本南部黑潮路径的变异对我国长江流域的降水有很大影响。此外, 日本南部黑潮路径变异对渔业生产和海洋运输也有重要影响。因此, 如果可以准确预报日本南部黑潮路径的变异, 具有重要意义。

当前, 对于日本南部黑潮路径变异的预报仍存在较大的不确定性, 所以有必要开展黑潮路径变异的可预报性研究, 该研究主要是为了弄清产生预报

收稿日期: 2012-04-19; 修回日期: 2013-09-05

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-201); 青岛市基础研究计划项目(11-1-4-95-jch); 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)开放课题

作者简介: 徐强强(1987-), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事日本南部黑潮路径变异可预报性研究, 电话: 13564021039, E-mail: xu28735@163.com; 王强, 通信作者, 助理研究员, 主要从事海洋环流变异的可预报性研究, 电话: 0532-82898519, E-mail: wangqiang@qdio.ac.cn.

不确定性的原因和机制,寻找减小预报不确定的方法与途径^[6]。在天气和气候的可预报性研究中,一个重要方面是探寻天气和气候事件发生的前期征兆,即探寻何种初始异常会发展成我们所关注的天气或气候事件。在一定条件下,最容易发展成某一天气或气候事件的初始异常,我们称之为该事件的最优前期征兆。揭示天气和气候事件的最优前期征兆,有利于提高它们的可预报性。国际上已有一些关于探寻天气或气候事件最优前期征兆的研究,例如,Thompson^[7]和 Duan 等^[8]分别探寻了 ENSO 事件的最优前期征兆。另外, Schmeits 和 Dijkstra^[9]从动力系统的角度研究发现黑潮存在两种典型路径,主要是由于存在着多平衡态所致,但他们并未研究初始异常是否会导致多平衡态之间的过渡。基于以上工作,本文将首先利用出入流模式,模拟出两个平衡态,这两个平衡态对应黑潮的两种典型路径。然后,以平直路径的平衡态作为参考态,利用条件非线性最优扰动(CNOP)方法寻找何种初始异常容易导致平直路径的平衡态过渡为弯曲路径的平衡态,即探寻黑潮弯曲路径发生的最优前期征兆。考察最优前期征兆的发展过程,揭示黑潮弯曲路径形成的物理机制。

1 CNOP 方法介绍

本部分将对 CNOP 方法^[10]进行简单介绍。

考虑状态向量 X 的发展方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial X}{\partial t} = F(X, p) \\ X|_{t=0} = X_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 X_0 表示向量 X 的初始条件, $p=(p_1, p_2, \dots, p_m)$ 表示模式参数, F 为非线性算子, t 表示时间。对方程(1)进行数值离散,其解形式地表示为:

$$X(t) = M_t(p)(X_0) \quad (2)$$

其中, $M_t(p)$ 是固定参数向量 p 条件下的非线性传播算子,其将初始时刻的 X_0 “传播”到 t 时刻的 $X(t)$ 。

假设模式存在两个不同的初始状态 U_0 和 U_0+u_0 , 利用方程(2)即有:

$$U(t) = M_t(p)(U_0), \quad U(t)+u(t) = M_t(p)(U_0+u_0) \quad (3)$$

其中 u_0 表示初始扰动, $u(t)$ 为该初始扰动的非线性发展。定义度量初始扰动发展的目标函数:

$$J(u_0) = 0.5 \| M_t(p)(U_0+u_0) - M_t(p)(U_0) \|^2 \quad (4)$$

考虑如下非线性最优化的问题:

$$J(u_0^*) = \max_{u_0 \in C_0} J(u_0) \quad (5)$$

其中, $u_0 \in C_0$ 表示初始扰动约束条件。最优化问题(5)的解 u_0^* 被称为 CNOP。显然, CNOP 表示一定约束条件下在预报时刻有最大非线性发展的一类初始扰动。目前,已经被成功应用于 ENSO 的可预报性研究、海洋热盐环流的敏感性分析、海洋环流的稳定性分析和台风目标观测等领域^[8, 11-15]。基于 CNOP 方法在以上研究领域的成功应用, 本文将将其应用于研究黑潮弯曲路径发生的最优前期征兆。

2 正压出入流模式介绍

2.1 模式方程

本文所选用的模式为正压出入流模式, 模式方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \xi}{\partial t} + J(\psi, \xi) + \beta \frac{\partial \psi}{\partial x} &= A_H \nabla^2 \xi - r \xi \\ \xi &= \nabla^2 \psi \end{aligned} \quad (6)$$

其中, ψ 为流函数, ξ 为涡度, A_H 为水平涡度系数, r 为底摩擦系数, J 为 Jacobi 算子。

2.2 模拟区域设置

董昌明和张庆华^[16]曾利用准地转出入流模式研究黑潮路径变异。我们参照其中的模式设置, 选取区域(图2)从九州东边界开始, 大致对应 $25^\circ \sim 35^\circ \text{N}$ 和 $130^\circ \sim 145^\circ \text{E}$ 之间的海域, 纬向(东西方向)长度为 1 500 km, 径向(南北方向)长度为 1 000 km。模拟区域的北部边界作为固壁处理, 模式的垂直层为一层, 忽略斜压效应。

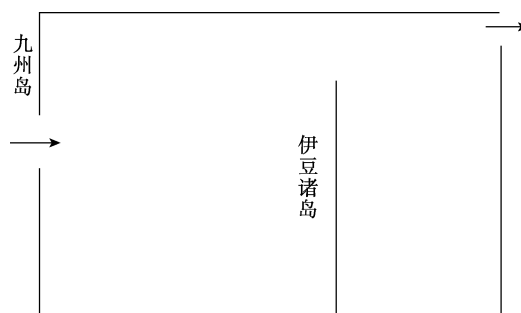


图 2 模拟区域示意图

Fig. 2 The schematic diagram of simulation domain

2.3 边界条件和参数设置

参数设置如下:

$$\begin{aligned} \Delta x &= 25 \text{ km}, \Delta y = 25 \text{ km}, \Delta t = 3\ 600 \text{ s}, A_H = 0.5 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}, \\ r &= 2.0 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}, \beta = 1.95 \times 10^{-13} \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

其中 x 和 y 分别表示模式积分区域的纬向和径向坐标,

Δx 和 Δy 表示空间分辨率, Δt 表示时间步长。

2.4 模拟结果

V_{max} 为模式出入口处的最大流速, 改变参数 V_{max} 的取值, 平衡态将会发生改变。当 V_{max} 取较小值的时候, 平衡态呈现黑潮弯曲路径; V_{max} 较大时, 平衡态呈现黑潮平直路径; V_{max} 取中间值时, 模拟结果存在两个平衡态: 平直和弯曲路径。为了区分这两种路径状态, 我们定义了黑潮路径指数为黑潮流轴最南端至模拟区域南边界的距离, 其中黑潮流轴由出口处流函数平均值所对应的等值线近似表征。由此定义可知, 当路径指数较大时, 黑潮处于平直路径, 反之, 黑潮处于弯曲路径。图 3 给出了黑潮路径指数随参数 V_{max} 的变化, 即模式模拟的分岔图。从图 3 可以看出, 当 $V_{max} < 59$ cm/s 时, 平衡态为弯曲路径; 当 $V_{max} > 89$ cm/s 时, 平衡态为平直路径; 当 V_{max} 介于 59~89 cm/s 时, 存在多平衡态。图 4 为 $V_{max} = 60$ cm/s 时, 两种平衡态的路径状态, 可以看出, 黑潮路径既有平直路径的平衡态, 又有弯曲路径的平衡态。本

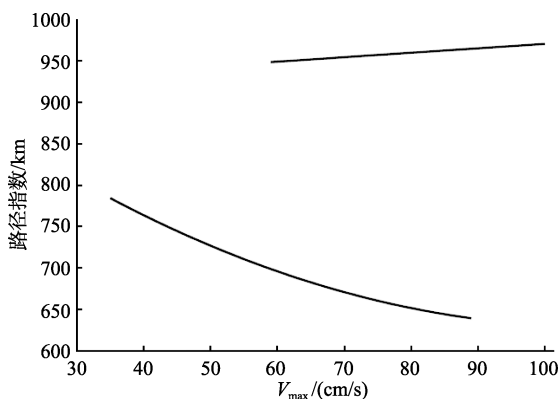


图 3 模拟结果的分岔图

Fig. 3 The bifurcation diagram of the modeling results

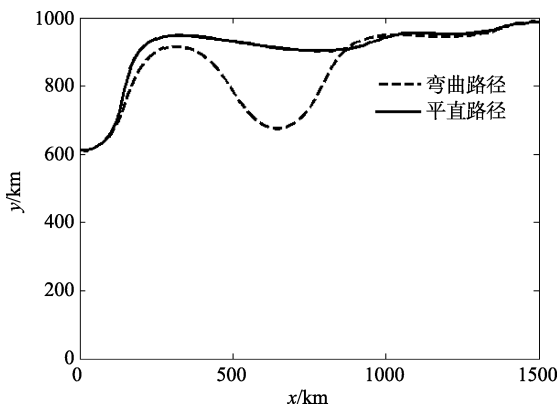


图 4 $V_{max} = 60$ cm/s 时的两种平衡态路径状态

Fig. 4 The path state of two equilibria when $V_{max} = 60$ cm/s

文将选取 $V_{max} = 60$ cm/s 时平直路径的平衡态为参考态, 计算能使平直路径发展成为弯曲路径的最优初始扰动, 并分析其随时间的发展。

3 日本南部黑潮路径弯曲的最优前期征兆及其发展机制

3.1 计算 CNOP 的设置

参考态: 当 $V_{max} = 60$ cm/s 时, 模拟的结果呈现两个平衡态: 平直路径和弯曲路径。我们选择平直路径的平衡态作为参考态, 计算 CNOP。

初始扰动变量: 由于在模式中流函数 ψ 和涡度 ξ 可以直接换算, 已知二者之一便可换算出另一个, 所以只需将其中之一作为初始扰动变量即可。为了直观方便, 我们选取流函数作为初始扰动变量, 其扰动值记为 $\Delta\psi_0$ 。初始扰动的约束范数为 2-范数, 约束半径为参考态的 10%: $(\|\Delta\psi_0\|_2)^{1/2} \leq 0.1(\|\psi_0\|_2)^{1/2}$, 其中 ψ_0 为初始流函数场, 即参考态。

优化时间: 设置为 5 000 h, 这与实际观测的黑潮由平直路径转变为弯曲路径所需时间接近。

目标函数 J : 黑潮弯曲路径主要发生在区域 A, A 的范围为 [225~625 km, 725~975 km], 因此目标函数定义为该区域的扰动能量之和, 即:

$$J = \sum_A E \quad (7)$$

其中:

$$E = -\frac{1}{2} \langle \Delta\psi, \Delta\xi \rangle \quad (8)$$

该扰动能量的定义与 Moore 等^[17]基于出入流模式计算线性奇异向量时所用的定义类似。在本文中, 之所以选择上述扰动能量的定义, 是因为当黑潮路径由平直状态过渡为弯曲状态时, E 的值在 A 区域较大, 当黑潮路径没有发生平直状态向弯曲状态过渡时, E 的值在 A 区域较小, 也就是说, 根据 E 的大小能较好地区分黑潮路径是否发生变异。

3.2 CNOP 的发展

图 5 为计算出的 CNOP, 可以看出 CNOP 的结构主要是由大值区内的反气旋涡(左侧正异常区)和气旋涡(右侧负异常区)构成。可以看出, CNOP 的大值区主要是位于黑潮弯曲路径发生位置的上游, 所以 CNOP 应该是会向下游传播最终发展成为弯曲路径。为了考察 CNOP 是否能够导致黑潮路径由平直状态向弯曲状态过渡, 我们将 CNOP 叠加

到参考态(平直路径的状态)上, 运行模式 5 000 h, 考察 CNOP 的发展过程。图 6 中给出了 CNOP 引起的流函数异常随时间的发展过程和黑潮流轴, 可以看

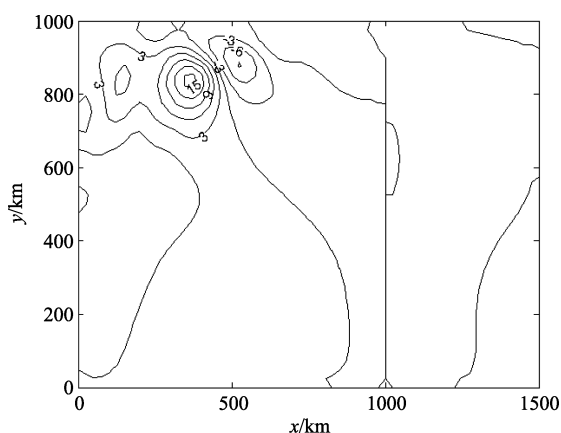


图 5 计算得到的 CNOP 空间结构 ($\times 10^7 \text{cm}^2/\text{s}$)

Fig. 5 Conditional nonlinear optimal perturbation (CNOP) obtained from calculation ($\times 10^7 \text{cm}^2/\text{s}$)

出气旋涡向东传播, $t=800 \text{ h}$ 时, 气旋涡传播到 $x=750 \text{ km}$ 左右并停留在这里, 之后气旋涡在此发展壮大, 到 $t=5 000 \text{ h}$ 的时候气旋涡得到充分发展, 弯曲路径形成。

为了详细分析 CNOP 的发展过程, 我们将方程 (6) 变换为:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -J(\psi, \xi) - \beta \frac{\partial \psi}{\partial x} + A_H \nabla^2 \xi - r \xi \quad (9)$$

其中 $\frac{\partial \xi}{\partial t}$ 为涡度的局地变化项, $-J(\psi, \xi)$ 为非线性项,

$-\beta \frac{\partial \psi}{\partial x}$ 为 β 项, $A_H \nabla^2 \xi$ 为粘性项, $-r \xi$ 为底摩擦项。

由于气旋涡主要是沿着 $y=850 \text{ km}$ 附近移动, 所以为了分析其发展过程, 我们计算了方程 (9) 中各项沿着 $y=850 \text{ km}$ 的分布情况。图 7 给出了图 6 对应时刻的方程各项分布。

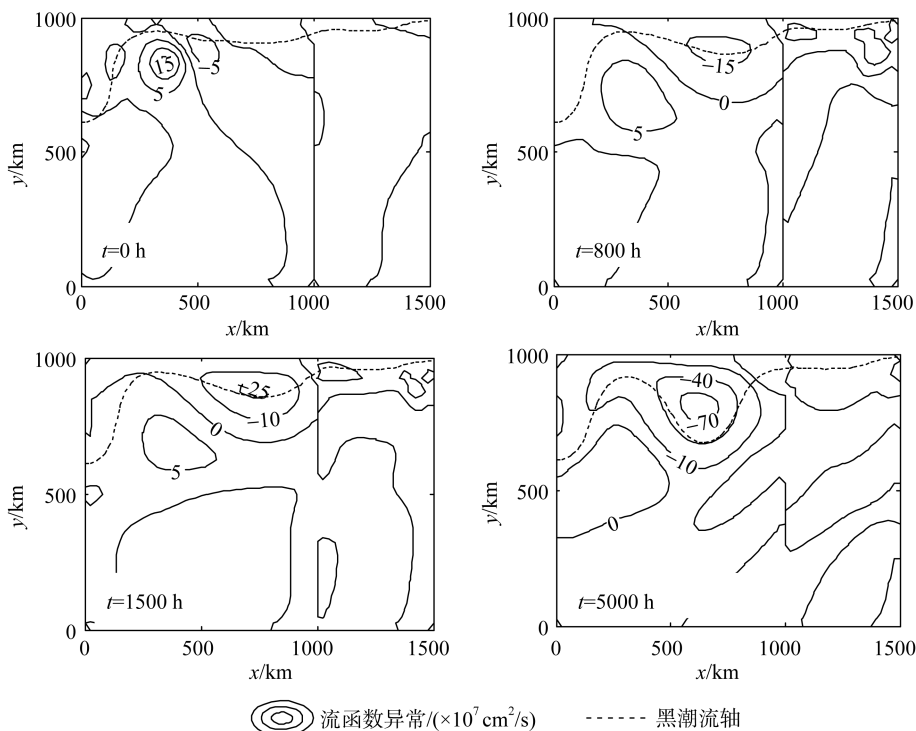


图 6 CNOP 引起的流函数异常的发展

Fig. 6 The evolution of stream function anomaly caused by the CNOP

$t=0 \text{ h}$ 时, 气旋涡在纬向上位于区间 $[450 \text{ km}, 600 \text{ km}]$, 从图 7 可以看出, 局地项在 $x=450 \text{ km}$ 处为负值, 在 $x=600 \text{ km}$ 处为正值, 可知气旋涡此时在向东传播。另外 $x=450 \text{ km}$ 处的局地项的绝对值要明显小于 $x=600 \text{ km}$ 处的局地项绝对值, 也就是说气旋涡在向东传播的过程中逐渐增大。与局地项大小相当的主要是非线性项, 也就是说使气旋涡向东传播的

主要因素是涡度平流, 而且涡度平流还会使气旋涡在向东传播的过程中增大。

$t=800 \text{ h}$ 时, 气旋涡向东传播到区间 $[600 \text{ km}, 900 \text{ km}]$, 此区间中的局地项都是正值(图 7), 也就是说在 800 h 时, 气旋涡在逐渐增强。从图 7 中可以看出, 此时在气旋涡中心附近的非线性项基本为正, 粘性项为负, 气旋涡中心以西的 β 效应为正, 以东的

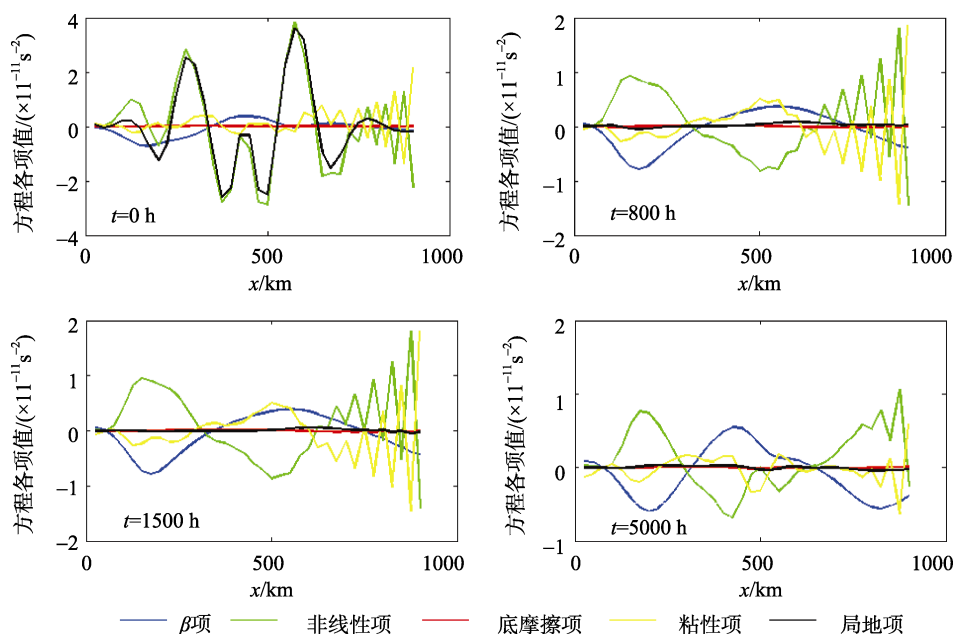


图 7 CNOP 发展过程中, 方程(9)各项沿 $y=850$ km 的分布

Fig. 7 The distribution of all items in equation (9) along $y=850$ km during the development of the CNOP

为负。也就是说, 非线性作用使气旋涡增长, 粘性作用则使气旋涡的减弱。气旋涡西侧的部分有向南的速度分量, 所以 β 效应促使气旋涡增长, 而东侧有向北的速度分量, 所以 β 效应抑制气旋涡的增大。总得来说, 由于在整个气旋涡附近促进其增长的作用强于抑制其增长的作用, 所以这里的涡度局地变化项大于 0, 气旋涡逐渐增强。

$t=1500$ h 时的情况与 $t=800$ h 的情况类似。

$t=5000$ h 时, 黑潮处于弯曲路径, 气旋涡在增长过程中位置会向西稍微偏移, 此时气旋涡的中心位于区间 $[500 \text{ km}, 800 \text{ km}]$ 。从 $t=0$ h 至 $t=5000$ h, 方程中的主要平衡项由局地项和非线性项的平衡变成了 β 项与非线性项的平衡。董昌明和张庆华^[16]和 Akitomo 等^[18]在分析弯曲路径平衡态的维持机制时, 也有类似的结论。

为了更清楚地展示 CNOP 发展过程, 我们绘出 850 km 断面上主要项的时空分布图。为了便于显示, 将扰动的发展过程分为两个阶段: 气旋涡向下游传播阶段和气旋涡在下游增长阶段。气旋涡传播阶段大约在 $0\sim 300$ h, 在此期间, 主要作用项是非线性项, 所以我们画出 $0\sim 300$ h 的非线性项随时间变化(图 8)。可以看出, 非线性项的分布特征随时间向东移动, 这主要是由平流作用在将气旋涡向下游输送所导致。气旋涡的增长阶段大约在 $300\sim 5000$ h, 在这个阶段主要作用项是非线性项和粘性项, 所以我们画

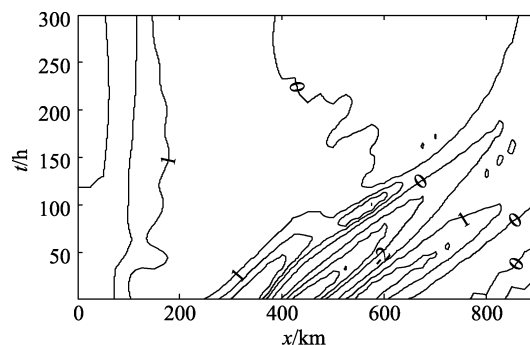


图 8 CNOP 发展过程中, $0\sim 300$ h 的非线性项沿 $y=850$ km 断面的时空分布图($\times 10^{-11} \text{ s}^{-2}$)

Fig. 8 The time-spatial distributions of the nonlinear items along $y=850$ km in $0\sim 300$ h during the development of the CNOP

出这两项随时间的变化, 如图 9。可以看出在此阶段, 在区间 $[600 \text{ km}, 900 \text{ km}]$ 内, 非线性项主要是正, 粘性项主要是负, 这与我们之前的分析一致。

另外, 相对于其他项, 底摩擦项是一个小量, 所以可以推测底摩擦项对黑潮弯曲路径的形成影响较小。为了验证这点, 我们还做了以下实验: 将模式中的底摩擦项去掉, 将 CNOP 代入到模式中看路径的发展, 结果发现黑潮路径仍然能发展出弯曲来, 而且其弯曲的程度要有所增加。

3.3 CNOP 与随机扰动发展的比较

以上分析表明, CNOP 能够导致日本南部黑潮路径由平直状态过渡为弯曲状态, 那么其他类型的扰

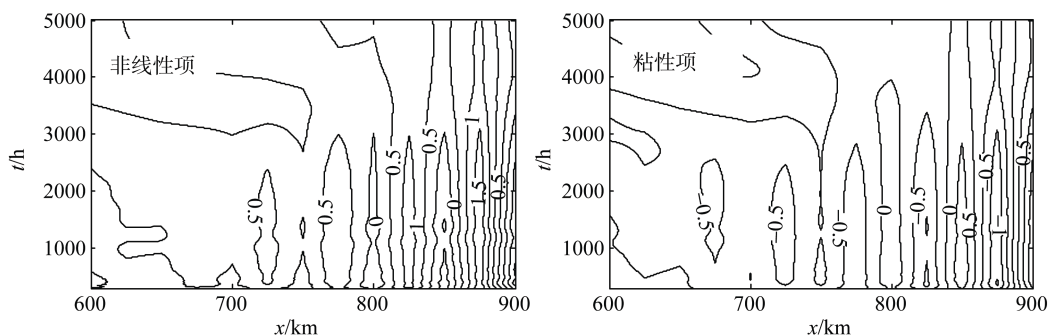


图 9 在 CNOP 发展过程中, 300~5 000 h 非线性项与粘性项沿 $y=850$ km 断面的时空分布图 ($\times 10^{-11} s^{-2}$)

Fig. 9 The time-spatial distributions of the nonlinear and viscosity items along $y=850$ km in 300-5000 h during the development of CNOP ($\times 10^{-11} s^{-2}$)

动是否也能够导致类似的过渡? 为此, 我们在 $t=0$ h 时刻叠加一个随机扰动。随机扰动的生成方法如下: 假设每个格点上的扰动都服从正态分布, 对于单个格点产生一组服从正态分布的随机数, 从这组随机数中任意选取一个数作为该格点的随机数。对于模拟区域的所有格点都进行相同操作, 从而得到一个随机扰动场, 记为 B 。为了与 CNOP 发展的结果进行比较, 要将随机扰动场 B 的大小进行调整, 使其与 CNOP 的大小一致。前面所述, 利用 2-范数度量初始扰动的大小, 所以我们将随机扰动场 B 的 2-范数调整与 CNOP 相等, 即: $B' = (\|CNOP\|_2 / \|B\|_2)^{1/2} \cdot B$, 这样就得到一个新的随机扰动场 B' , 其大小与 CNOP

相等。接下来, 将得到的随机扰动场叠加到参考态上, 运行模式 5 000 h, 并将所得结果与利用 CNOP 得到的结果进行比较分析。

由图 10 可以看出, 叠加随机扰动后, 运行积分 5 000 h, 并未导致黑潮弯曲路径的形成, 而 CNOP 导致了弯曲路径的形成 (图 6), 从这个意义上说, CNOP 能被看作黑潮弯曲路径发生的最优前期征兆。下面将具体分析随机扰动(RP)与 CNOP 发展的差别。

RP 发展到 $t=300$ h 时, 在纬向区间 [500 km, 700 km] 内出现了一个气旋涡, 该气旋涡也在 $y=850$ km 附近移动, 所以同样还是计算方程(9)各项沿 $y=850$ km 的分布来分析它的发展过程, 如图 11 所示。

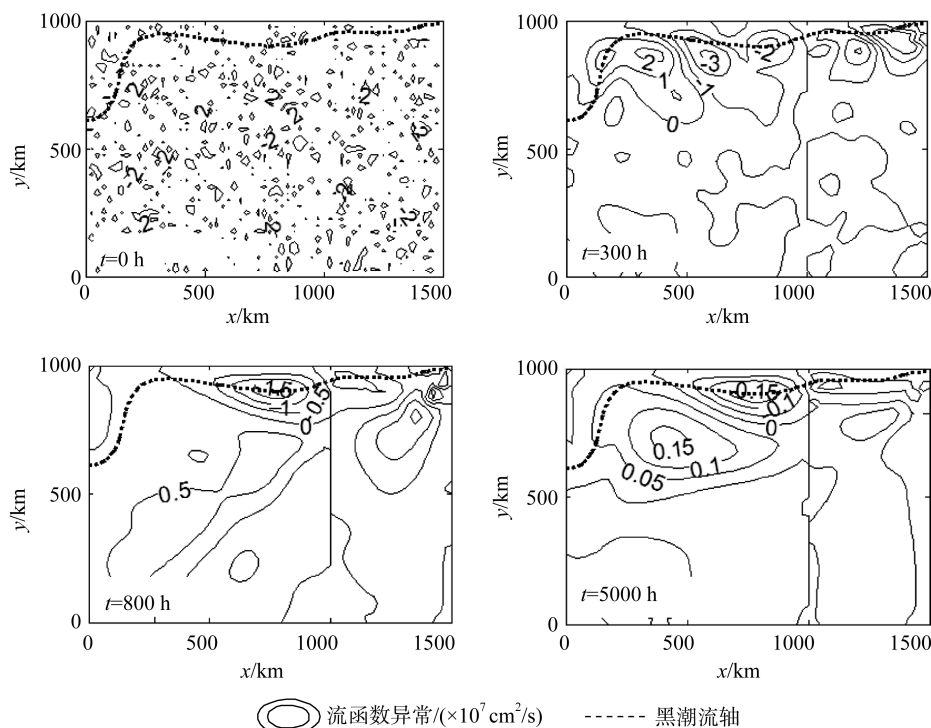


图 10 随机扰动引起的流函数异常的发展

Fig. 10 The evolution of stream function anomaly caused by the random perturbation

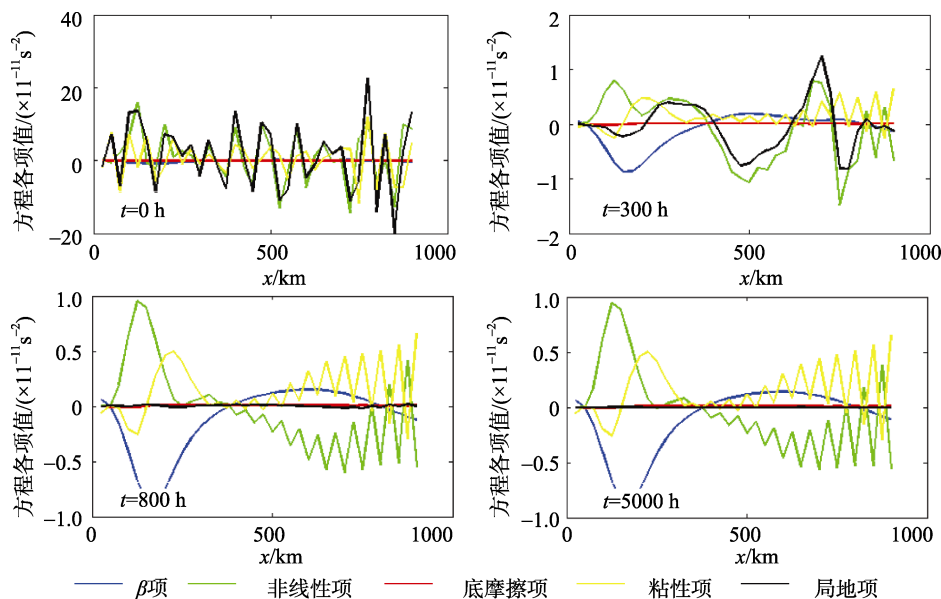


图 11 随机扰动发展过程中方程(9)各项沿 $y=850$ km 线的分布

Fig. 11 The distribution of all items in equation (9) along $y=850$ km during the development of random perturbation

$t=300$ h 时, 气旋涡的位置在区间 $[500 \text{ km}, 700 \text{ km}]$ 内, $x=500$ km 处的局地项为负, $x=700$ km 处的局地项为正, 这就意味着此时的气旋涡在向东传播, 与局地项大小相当的主要还是非线性项, 也就是说仍然是平流作用在迫使气旋涡向东传播。

$t=800$ h 时气旋涡停留在区间 $[600 \text{ km}, 900 \text{ km}]$ 内, 该区间内的局地项主要是负值, 也就是说气旋涡在逐渐减弱。可以看到气旋涡中心附近的非线性项主要是负值, 抑制气旋涡的增长; 粘性项为正值, 促进气旋涡增长; β 效应仍然是在气旋涡中心以西促进气旋涡增长, 以东抑制其增长。由于抑制作用总体上大于促进其增长的作用, 所以气旋涡在逐渐减弱, 最终消亡。

到了 $t=5000$ h 的时候, 气旋涡的强度就变得非常弱, 从图 10 中能看到气旋涡所在区间 $[600 \text{ km}, 900 \text{ km}]$ 内的流函数异常值接近 0。RP 未能导致黑潮弯曲路径的形成, 模拟结果回到了平直路径的平衡态, 此时局地项接近 0。从 $t=0$ h 到 $t=5000$ h 的整个过程, 主要平衡由局地项与非线性项的平衡转换为 β 项、非线性项和粘性项三者之间的平衡。

同样为了更清楚地说明 RP 发展过程, 将其可以分为两个阶段: 气旋涡向下游传播阶段和气旋涡在下游增长阶段, 绘出主要项沿 850 km 断面的时空分布图。在气旋涡传播阶段大约在 300~500 h, 期间主要作用项是非线性项, 所以我们画出 300~500 h 的非线性项的时空分布图, 如图 12。可以看出, 非线性项

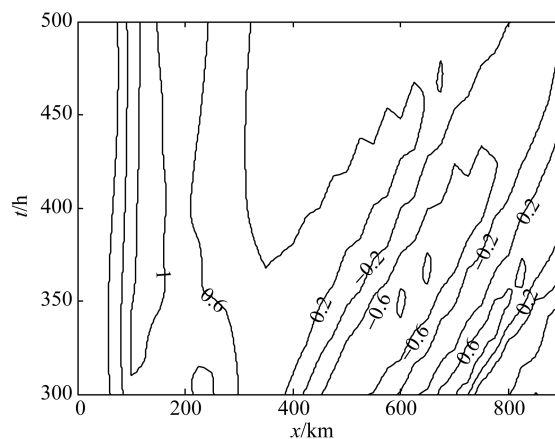


图 12 随机扰动发展过程中, 300~500 h 的非线性项沿 $y=850$ km 的时空分布 ($\times 10^{-11} \text{ s}^{-2}$)

Fig. 12 The time-spatial distributions of the nonlinear items along $y=850$ km in 300-500 h during the development of random perturbation ($\times 10^{-11} \text{ s}^{-2}$)

的分布特征随时间向东移动, 这主要是由平流作用在将气旋涡向下游输送所导致。气旋涡的增长阶段大约在 500~5000 h, 在这个阶段主要作用项是非线性项和粘性项, 因此我们画出这两项随时间和空间的变化, 如图 13。可以看出在此阶段, 在纬向区间 $[600 \text{ km}, 900 \text{ km}]$ 内, 非线性项主要是负, 粘性项主要是正, 这与我们之前的分析一致。

3.4 小结

从 CNOP 与 RP 发展的比较中, 我们得到:
(1) CNOP 能够使日本南部黑潮路径发生弯曲而 RP 不

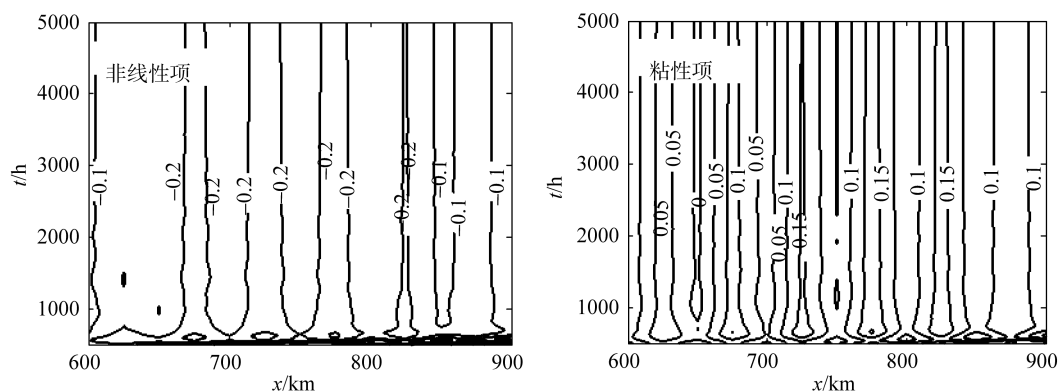


图 13 在随机扰动发展过程中, 500~5 000 h 的非线性项与粘性项沿 $y=850$ km 的时空分布 ($\times 10^{-11} \text{s}^{-2}$)

Fig. 13 The time-spatial distributions of the nonlinear and viscosity items along $y=850$ km in 500~5000 h during the development of random perturbation ($\times 10^{-11} \text{s}^{-2}$)

能, 从这个意义上说, CNOP 可被看作为黑潮弯曲路径发生的最优前期征兆; (2) 使气旋涡向下游传播的主要是非线性平流的作用; (3) 在 CNOP 发展过程中, 非线性过程起促进其发展的作用, 对于 RP, 非线性过程起抑制扰动发展作用; (4) 在 CNOP 的发展过程中, 主要平衡是局地项与非线性项的平衡, 发展到 5 000 h 时, 主要平衡是非线性项与 β 项的平衡; RP 的发展过程中, 主要平衡也是局地项与非线性项的平衡, 发展到 5 000 h 时, 主要平衡就是非线性项、粘性项和 β 项三者之间的平衡; (5) 底摩擦效应对黑潮弯曲路径的发生影响较小。

4 结论与讨论

本文使用准地转出入流模式模拟日本南部黑潮, 利用 CNOP 方法探寻日本南部黑潮路径由平直状态过渡为弯曲状态的前期征兆。通过对比 CNOP 和 RP 的发展过程, 我们分析了日本南部黑潮路径发生弯曲的物理机制。主要结论: (1) CNOP 能够使黑潮发展出弯曲路径, 所以 CNOP 型的初始异常可以作为黑潮弯曲路径的前期征兆。(2) 在 CNOP 和 RP 的发展过程中, 气旋涡的向东传播都是由于非线性项的作用, 也就是涡度平流造成的。(3) CNOP 和 RP 发展过程中所产生的气旋涡最终都会传播到下游区, 但是 CNOP 发展出的气旋涡能增强最终导致黑潮弯曲路径发生, 而 RP 的气旋涡则会减弱且不能导致弯曲路径发生。另外, 在 CNOP 实验中, 气旋涡传播到下游并停留时段内, 非线性作用使气旋涡增大, 但是在 RP 试验中, 非线性的作用则是在使其减弱。所以说非线性过程对日本南部黑潮路径发生弯曲起着很重要的作用。(4) 底摩擦效应对日本南部黑潮路径变异

的影响较小。

本文的实验仅仅在参数 V_{\max} 为 60 cm/s 时, 以模拟得到的平直路径的平衡态为参考态的基础上完成的。但是模拟结果在 V_{\max} 处于 59~84 cm/s 时都会有平直路径和弯曲路径两种平衡态, 对于其他 V_{\max} 取值时, 结果如何还需要进一步研究。另外, 如果以弯曲路径的平衡态作为参考态, 也可以研究黑潮由弯曲路径过渡为平直路径的前期征兆, 这将是未来的工作。

致谢: 本文的研究工作得到了中国科学院海洋研究所穆穆院士的悉心指导, 在此表示衷心的感谢! 作者感谢两位审稿专家提出的宝贵修改意见。

参考文献:

- [1] Taft B A. Kuroshio—Its Physical Aspects [M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1972: 165-216.
- [2] Kawabe M. Variations of current path, velocity, and volume transport of the Kuroshio in relation with the large meander [J]. *J Phys Oceanogr*, 1995, 25: 3103-3117.
- [3] Wang Qiang, Mu Mu, Dijkstra H A. Application of the conditional nonlinear optimal perturbation method to the predictability study of the Kuroshio large meander [J]. *Adv Atmos Sci*, 2012, 29: 118-134.
- [4] Xu Haiming, Tokinaga H, Xie S P. Atmospheric effects of the Kuroshio large meander during 2004-05 [J]. *J Climate*, 2010, 23: 4704-4715.
- [5] 侍茂崇. 物理海洋学[M]. 济南: 山东教育出版社, 2004: 157.
- [6] Mu Mu, Duan Wansuo, Chou Jifan. Recent advances in

- predictability studies in China (1999-2002) [J]. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21: 437-443.
- [7] Thompson C J. Initial Conditions for optimal growth in a coupled ocean-atmospheric model of ENSO [J]. *J Atmos Sci*, 1998, 35: 537-557.
- [8] Duan Wansuo, Mu Mu, Wang B. Conditional nonlinear optimal perturbation as the optimal precursors for El Niño-Southern Oscillation events [J]. *J Geophys Res*, 2004, 109, D23105, doi: 10.1029/2004JD004756.
- [9] Schmeits M J, Dijkstra H A. Bimodal Behavior of the Kuroshio and the Gulf Stream [J]. *J Phys Oceanogr*, 2001, 31: 3435-3456.
- [10] Mu Mu, Duan Wansuo, Wang B. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications [J]. *Nonlin Process Geophys*, 2003, 10: 493-501.
- [11] Mu Mu, Sun Liang, Dijkstra H A. The sensitivity and stability of the ocean's thermocline circulation to finite amplitude freshwater perturbations [J]. *J Phys Oceanogr*, 2004, 34: 2305-2315.
- [12] Sun Liang, Mu Mu, Sun Dejun, et al. Passive mechanism of decadal variation of thermohaline circulation [J]. *J Geophys Res*, 2005, 110(C7): c07025, doi: 10.1029/2005JC002897.
- [13] Terwisscha van Scheltinga A D, Dijkstra H A. Conditional nonlinear optimal perturbations of the double-gyre ocean circulation [J]. *Nonlin Process Geophys*, 2008, 15: 727-734.
- [14] Mu Mu, Zhou Feifan, Wang Hongli. A method for identifying the sensitive areas in targeted observations for tropical cyclone prediction: conditional nonlinear optimal perturbation [J]. *Mon Wea Rev*, 2009, 137: 1623-1639.
- [15] Qin Xiaohao, Mu Mu. A study on the reduction of forecast error variance by three adaptive observation approaches for tropical cyclone prediction [J]. *Mon Wea Rev*, 2011, 139: 2218-2232.
- [16] 董昌明, 张庆华. 黑潮双流态特征的动力学研究 [J]. *海洋学报*, 1995, 17: 130-136.
- [17] Moore A M, Mariano A J. The dynamics of error growth and predictability in a model of the Gulf Stream. Part I: Singular vector analysis [J]. *J Phys Oceanogr*, 1999, 29: 158-176.
- [18] Akitomo K, Awaji T, Imasato N. Kuroshio path variation south of Japan 1. Barotropic inflow-outflow model [J]. *J Geophys Res*, 1991, 96: 2549-2560.

The optimal precursor of the occurrence of the Kuroshio meander path in the south of Japan and its development mechanism

XU Qiang-qiang^{1,2,3}, WANG Qiang^{1,4}, MA Li-bin^{1,3}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key laboratory of East China Sea and Oceanic Fishery Resources Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Shanghai 200090, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 4. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Received: Apr., 19, 2012

Key words: the Kuroshio path; conditional nonlinear optimal perturbation (CNOP); optimal precursor; barotropic inflow-outflow model

Abstract: The barotropic inflow-outflow model was built to study the impacts of spatial locations and patterns of the initial anomaly on the variability of the Kuroshio path using the conditional nonlinear optimal perturbation (CNOP) method. First, the CNOP was calculated using the equilibrium of the straight path as reference state. Then the CNOP was superimposed on the reference state to investigate its development process, which was compared with the evolutions of random perturbation (RP). We found that the CNOP caused the Kuroshio path to transfer to meander path while the random perturbation did not. In this case, the CNOP could be regarded as the optimal precursor of the Kuroshio meander path. By analyzing the developing processes of the CNOP and the RP, we concluded that: 1) The formation process of the Kuroshio meander path caused by CNOP was the process of a cyclonic eddy advection downstream. 2) The cyclonic eddy was transferred to downstream due to the effect of nonlinear items, which was also the vorticity advection term. 3) The eddies both in the CNOP and RP cases would transport to the downstream, but the eddy in the CNOP case could grow up and develop into meander path while the eddy in the RP case could not. The cyclonic eddy was strengthened by the nonlinear effect in the CNOP case, while it was weakened by the nonlinear effect in the RP case. In conclusion, the nonlinear effect was very important in the processes of the formation of the Kuroshio meander path in the south of Japan. 4) The impact of bottom friction has relatively small effects on the variability of the Kuroshio path in the south of Japan. This study has revealed the optimal precursor of the occurrence of Kuroshio meander path and its nonlinear evolution mechanism, which is very important for improving the forecast skill of the Kuroshio path variations.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)