

# 模式参数的不确定性对日本南部黑潮大弯曲路径预报的影响

张培军<sup>1,2</sup>, 王 强<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 海洋研究所海洋环流与波动重点实验室, 山东青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 基于 1.5 层浅水方程模式, 利用条件非线性最优参数扰动(CNOP-P)方法, 研究模式参数的不确定性对黑潮大弯曲路径预报的影响。研究表明, 单个模式参数误差如侧向摩擦系数误差、界面摩擦系数误差以及在不同季节具有不同约束的风应力大小误差, 对黑潮大弯曲路径预报的影响较小, 并且对背景流场的选取具有一定的敏感性; 所有模式参数误差同时存在时对黑潮大弯曲路径预报具有一定的影响, 并且预报结果在 9 个月左右不能被接受。因此, 要提高黑潮大弯曲路径的预报技巧, 模式中的参数需要给出更好的估计。

**关键词:** 黑潮大弯曲路径预报; 条件非线性最优参数扰动; 模式参数误差

中图分类号: P731.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)05-0106-08

doi: 10.11759/hyqx20140326001

观测发现, 日本南部黑潮路径具有双模态结构, 即存在非大弯曲和大弯曲 2 种路径。这 2 种路径一旦形成, 将会持续几年的时间, 但是黑潮从一种路径过渡到另一种路径一般只需要几个月<sup>[1]</sup>。日本南部黑潮的路径变异对北太平洋的气候、渔业及航海等有重要的影响。因此, 开展日本南部黑潮路径变异预报具有十分重要的意义。

目前, 日本南部黑潮路径变异预报的研究主要有 2 个方面, 一方面是对黑潮路径变异预报时限的估计, 通过采用不同的资料同化方案<sup>[2-4]</sup>、较高分辨率的模式<sup>[5]</sup>或者集合预报技术<sup>[6]</sup>等手段, 来估计黑潮路径变异的预报时限。不同的方法手段估计得到的预报时限有一定的差别, 但是预报时限最长不超过 3 个月。另一方面, 考察初始误差和模式误差对黑潮路径变异预报的影响。Ishikawa<sup>[7]</sup>等基于 1.5-层浅水方程模式, 采用伴随敏感性方法, 研究了初始条件对黑潮路径变异预报的敏感性。结果表明, 日本九州岛东南部小弯曲的形成、黑潮再循环流的增强对黑潮大弯曲路径的预报有重要的影响。Fujii<sup>[8]</sup>等采用奇异向量(SV)方法研究了初始误差对黑潮大弯曲路径预报的影响, 找出影响黑潮大弯曲路径预报的最快增长误差。Wang<sup>[9]</sup>等人采用条件非线性最优初始扰动(CNOP-I)方法考察了初始误差对黑潮路径变异预报的影响, 该方法克服了以上 2 种方法线性近似的不足。另外, 当前的许多海洋环流模式对海洋各种现象的描述还不够准确, 存在一定的模式误差。其中, 模式中的参数值大多是由经验公式或者观测估计得到,

具有一定的不确定性。目前, 一些学者主要采用对某个模式参数叠加不同的扰动, 来考察模式参数的不确定性对预报的影响。但是, 这种方法很难考察多个模式参数同时存在误差时, 哪一种误差组合对预报的影响最大。Wang<sup>[9]</sup>等采用条件非线性最优参数扰动(CNOP-P)的方法得到了 3 个模式参数同时存在误差时, 对黑潮大弯曲路径预报影响最大的参数扰动组合。其中, 风应力大小的扰动在不同季节具有相同的误差范围。但一些学者的研究表明, 风应力大小在不同季节的标准差差异很大<sup>[10]</sup>。那么风应力大小在不同季节误差范围的差异对预报是否有显著影响? 以及这些差异与其他模式参数误差的共同作用对预报的影响有多大? 另外, 他们的工作只选取了一个个例, 那么在其他背景流场中, 是否能够得到相似的结论? 这些正是本文所关心的问题。

## 1 浅水方程模式和条件非线性最优参数扰动(CNOP-P)方法

### 1.1 浅水方程模式

本文将基于 1.5 层浅水方程模式考察模式参数误差对黑潮大弯曲路径预报的影响。Schmeits等<sup>[11]</sup>

收稿日期: 2014-03-26; 修回日期: 2014-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41306023)

作者简介: 张培军(1984-), 女, 河南省郑州人, 博士研究生, 主要从事海洋环流与气候环境变化方面研究; 通讯作者: 王强, 男, 安徽滁州人, 博士, 副研究员, 电话: 0532-82898519, E-mail: wangqiang@qdio.ac.cn

和Pierini<sup>[12]</sup>认为约化重力浅水模式能够表征黑潮路径变异的基本动力学过程。因此, 本文采用 1.5 层浅水方程模式来模拟黑潮, 在此基础上, 进行黑潮路径变异的可预报性研究。

无量纲浅水方程模式可写为公式(1)的形式:

$$\varepsilon \left( \frac{Du}{dt} - uv \tan \theta \right) - v \sin \theta = \frac{-\varepsilon F}{\cos \theta} \frac{\partial h}{\partial \varphi} + E \left( \nabla^2 u - \frac{u}{\cos^2 \theta} - \frac{2 \sin \theta}{\cos^2 \theta} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right) + \frac{\alpha \tau_\varphi}{h} - \mu u \quad (1a)$$

$$\varepsilon \left( \frac{Dv}{dt} + u^2 \tan \theta \right) + u \sin \theta = -\varepsilon F \frac{\partial h}{\partial \theta} + E \left( \nabla^2 v - \frac{v}{\cos^2 \theta} + \frac{2 \sin \theta}{\cos^2 \theta} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right) + \frac{\alpha \tau_\theta}{h} - \mu v \quad (1b)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{\cos \theta} \left[ \frac{\partial(hu)}{\partial \varphi} + \frac{\partial(hv \cos \theta)}{\partial \theta} \right] = 0 \quad (1c)$$

其中,  $\varphi$  和  $\theta$  分别表示纬向和经向坐标。控制变量  $u$ 、 $v$  和  $h$  分别为纬向流速、经向流速和海洋上层厚度。 $D/dt$  是物质导数,  $\tau_\varphi$  和  $\tau_\theta$  分别表示风应力的纬向和经向分量。

方程中无量纲的参数表达式如下:

$$\varepsilon = \frac{U}{2\omega r_0}, \quad F = \frac{g'H}{U^2}, \quad E = \frac{A_H}{2\omega r_0^2}, \quad \alpha = \frac{\tau_0}{2\omega \rho H U},$$

$$\mu = \frac{R_1}{2\omega}$$

其中, 地球半径为  $r_0 = 6.37 \times 10^6$  m, 地球的角速度为  $\omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , 水平速度尺度和海洋上层的平均深度分别为  $U = 0.1 \text{ m/s}$  和  $H = 500 \text{ m}$ 。约化重力为

$g' = 0.044 \text{ m/s}^2$ , 上层密度为  $\rho = 1023.5 \text{ kg/m}^3$ , 风应力大小为  $\tau_0 = 0.1 \text{ Pa}$ , 侧向摩擦系数为  $A_H = 450 \text{ m}^2/\text{s}$ , 界面摩擦系数为  $R_1 = 4.3725 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ 。

模式的积分区域为(15°~55°N, 122°E~158°W)。本文采用 Crank-Nicholson 格式和中心有限差分格式分别对时间和空间微分算子进行离散, 时间步长为 10 d, 空间分辨率为 0.2°×0.2°。模式中使用无滑动边界条件, 地形采用真实的日本海岸线, 陆地边界取 200 m 等深线以避免黑潮水全部进入中国东海。Hellerman 等<sup>[10]</sup>的气候态月平均风应力资料作为模式的强迫场。由静止状态积分模式 100 a, 后 90 a 模拟的黑潮路径指数的变化如图 1 所示。这里将海洋上层厚度 520 m 的等值线定义为黑潮主轴, 该等值线处的黑潮流速接近最大。黑潮路径指数由黑潮主轴与日本南部海岸在 136°~140°E 纬度差的平均值来表示<sup>[14]</sup>, 指数的大值对应黑潮大弯曲路径, 反之对应黑潮的非弯曲路径。从图 1 可以看出, 在 90 a 中黑潮共发生了 17 次大弯曲路径, 反映了黑潮路径变异的年际变化特征。另外, Wang<sup>[9]</sup>等用 1.5 层浅水方程模式模拟了一次黑潮大弯曲路径发生、发展和消亡的过程, 而类似的过程在 1975~1979 年发生的黑潮大弯曲路径中被观测到<sup>[13]</sup>。一些研究者利用不同的数值模式也再现了该过程<sup>[14-15]</sup>, 这反映了 1.5 层浅水方程模式能够较好地模拟黑潮路径变异。虽然黑潮在大弯曲路径和非大弯曲路径的维持时间与观测有一定的差异, 但是每次黑潮从一种路径向另一种路径过渡所需的时间与观测结果基本相似, 均为几个月。因此, 本文

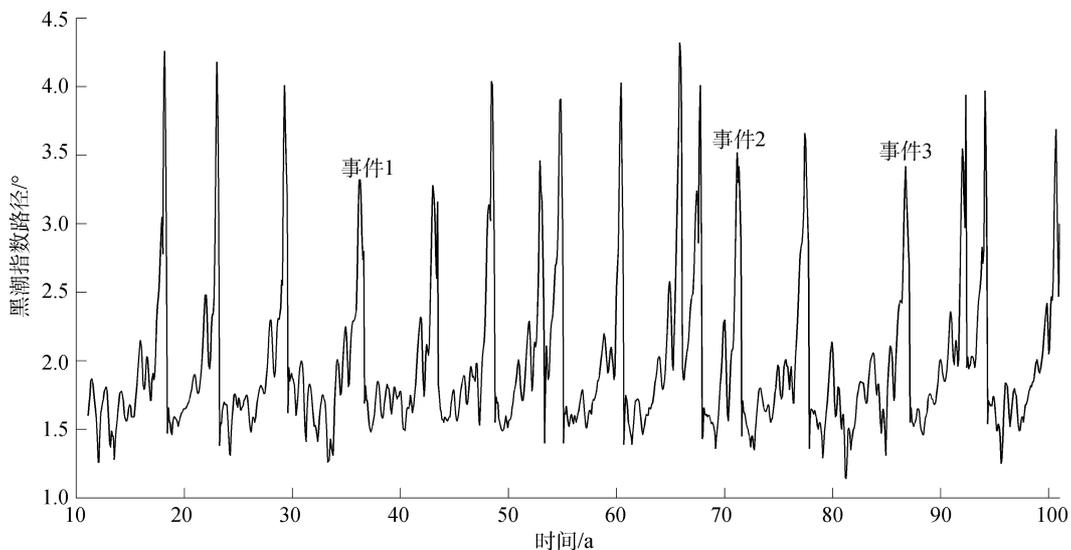


图 1 模式模拟的黑潮路径指数序列

Fig.1 The time series of the Kuroshio path index simulated by the model

可以采用黑潮从非弯曲路径向大弯曲路径过渡的状态作为背景态, 研究模式参数的不确定性对黑潮大弯曲路径预报的影响。

### 1.2 条件非线性最优参数扰动方法

本文采用条件非线性最优参数扰动的方法<sup>[16]</sup>来考察模式参数误差对黑潮大弯曲路径预报的影响。对于时间  $T > 0$  和初始条件  $X_0 = (u_0, v_0, h_0)$ , 记方程(1)中固定参数向量  $P$  的传播算子为  $M_T(P)$ ,  $M_T(P)(X_0) = (u_T, v_T, h_T)^T$  为方程(1)在  $T$  时刻的解。条件非线性最优参数扰动是指这样的扰动  $p^*$ , 即使得目标函数  $J(p')$  在参数约束条件  $C_\sigma = \{p' = (p_1', p_2', \dots, p_m') \mid |p_1'| \leq \sigma_1, |p_2'| \leq \sigma_2, \dots, |p_m'| \leq \sigma_m\}$  下取得最大值的一类参数扰动。该非线性优化问题定义如下:

$$J(p_\sigma^*) = \max_{p \in C_\sigma} J(p') \quad (2)$$

其中,  $J(p') = \|M_T(p + p')(X_0) - M_T(p)(X_0)\|^2$  为目标函数,  $p' = (p_1', p_2', \dots, p_m')$  为模式参数扰动向量。  $\sigma_i, i = 1, \dots, m$  为给定的正常数, 代表模式参数不确定性的量。本文中记  $x_p(T) = M_T(p + p')(X_0) - M_T(p)(X_0) = (u_{tp}', v_{tp}', h_{tp}')^T$ , 目标函数定义为预报时刻  $T$  时的扰动动能。则有

$$J(p') = \|x_p(T)\|_{KE}^2 = \frac{1}{2} \int_{\Lambda} (h_T + h_{tp}') [(u_{tp}')^2 + (v_{tp}')^2] dx dy \quad (3)$$

其中  $\Lambda$  为日本南部黑潮区域 ( $22^\circ \sim 35^\circ N, 130^\circ \sim 140^\circ E$ ), 该区域既包含了黑潮大弯曲发生的区域, 也包含了黑潮再循环流区。

当前的许多优化算法主要用于求解极小值问题, 为了获得目标函数  $J(p')$  在参数约束条件  $C_\sigma$  上的极大值, 本文计算另一个目标函数  $J_1(p') = -J(p')$  在参数约束条件  $C_\sigma$  上的极小值。优化算法采用谱投影梯度算法 (SPG2)<sup>[17]</sup>。

### 1.3 模式参数误差的约束设置

1.5 层浅水方程模式中有 3 个参数具有不确定性, 它们分别是侧向摩擦系数 ( $A_H$ )、界面摩擦系数 ( $R_1$ ) 和 风应力大小 ( $\tau_0$ )。前 2 个参数目前还没有从观测资料中给出它们误差的相关估计, 本文给出它们误差的一个扰动区间, 在此区间上, 模式仍能抓住黑潮路径变异的基本特征。对于风应力大小的误差, 由于在同一观测资料中, 估计得到的风应力大小在不同

的季节可能存在不同的误差, 不同数据集中风应力大小在相同季节也具有一定的差异<sup>[18]</sup>。因此, 为了更加合理地考察风应力大小误差对黑潮大弯曲路径预报的影响, 本文选取 2 个包含风应力大小资料的气候态数据集, 它们分别是 Hellerman and Rosenstein (HR)<sup>[10]</sup> 和 Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS05)<sup>[19]</sup>。前一数据集是本文模式积分时所用的外强迫的数据集, COADS05 是一个气候态月平均的数据集, 空间分辨率为  $0.5^\circ$ , 它的时间跨度是 1945~1989 年, 而数据集 HR 的时间跨度是 1870~1976 年。这 2 个数据集有相交的时间尺度部分 (1945~1976 年), 另外数据集 COADS05 还包含了 1976~1977 年气候突变之后的观测数据, 从该数据集可以看出气候发生突变以后, 全球风应力的变化情形。因此, 我们用这 2 个数据集中风应力的差异来度量风应力大小的不确定性。由于风应力大小的变化主要体现在纬向风应力中, 本文主要采用 2 个数据集中的风应力纬向分量在不同季节的均方根误差 (root-mean-square error, RMSE) 作为风应力大小误差的约束条件。上述几个参数的约束条件的设置详见表 1。由表 1 可以看出, 2 个数据集的风应力大小在夏季和冬季差异比春季和秋季的略大。

表 1 模式参数误差的约束设置

Tab.1 The constraint condition of the model parameter error

模式参数误差	误差约束设置
侧向摩擦系数误差	$ A_H'  \leq 45 \text{ m}^2/\text{s} (A_H: 10\%)$
界面摩擦系数误差	$ R_1'  \leq 0.44 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1} (R_1: 10\%)$
风应力大小误差	$ \tau_1'  \leq 0.0095 \text{ Pa} (\text{春季}),$
	$ \tau_2'  \leq 0.0197 \text{ Pa} (\text{夏季})$
$\tau', i = 1, 2, 3, 4$	$ \tau_3'  \leq 0.0089 \text{ Pa} (\text{秋季}),$
	$ \tau_4'  \leq 0.0106 \text{ Pa} (\text{冬季})$

## 2 不同背景场下的 CNOP-P

本文选取 3 个黑潮从非弯曲路径向大弯曲路径过渡的状态作为背景场, 考察模式参数误差对黑潮大弯曲路径预报的影响, 分别记为事件 1、事件 2 和事件 3。为了弄清风应力大小误差的季节变化对黑潮大弯曲路径预报的影响, 优化时间取为 1a。因此, 3 个事件分别取为模式模拟的第 35 年 2 月~第 36 年 2 月、第 70 年 2 月~第 71 年 2 月 和 第 85 年 7 月~第 86 年 7 月的黑潮路径变化。前 2 个事件中黑潮由非弯曲路径向大弯曲路

径过渡的起始月份相同,第3个事件与前2个事件的起始月份不同。这样选取我们可以比较相同的优化起始时刻,在不同的黑潮路径背景态下,模式参数误差对预报的影响,同时我们还考察了不同起始时刻,模式参数误差对预报的影响。对于每一个事件,本文将从以下7种情形来考察,它们分别是:单独优化侧向摩擦系数  $A_H$  (方案 AH), 界面摩擦系数  $R_i$  (方案 RI), 春季(3~5月)的风应力大小  $\tau_1$  (方案 MAM), 夏季(6~8月)的风应力大小  $\tau_2$  (方案 JJA), 秋季(9~11月)的风应力大小  $\tau_3$  (方案 SON), 冬季(12~2月)的风应力大小  $\tau_4$  (方案 DJF)以及同时优化以上所有参数(方案 ALL)。这里,  $\tau_i = \tau_0, i=1,2,3,4$ , 但风应力大小误差在各个季节具有不同的误差范围。表2、表3和表4给出了由 SPG2算法得到的3个事件的所有 CNOP-P。

由表 2、表 3 和表 4 可以看出, 这些 CNOP-P 均位于约束范围的边界上。这表明在该约束范围内, 模式参数的不确定性越大, 导致的预报误差也越大。对于事件 1 和事件 2, 黑潮大弯曲路径预报的起始时刻

表 2 事件 1 的 7 种情况的 CNOP-P  
Tab.2 The seven CNOP-Ps for the Event 1

个例	CNOP-P	目标函数( $\times 10^{11} \text{ m}^5/\text{s}$ )
方案 AH	-45 $\text{m}^2/\text{s}$	37.1
方案 RI	$0.44 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$	2.66
方案 MAM	0.0095 Pa	18.6
方案 JJA	0.0197 Pa	18.1
方案 SON	0.0089 Pa	1.47
方案 DJF	0.0106 Pa	0.61
	( $45 \text{ m}^2/\text{s}, -0.44 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ,	
方案 ALL	-0.0095 Pa, -0.0197 Pa, -0.0089 Pa, -0.0106 Pa)	146

表 3 事件 2 的 7 种情况的 CNOP-P  
Tab.3 The seven CNOP-Ps for the Event 2

个例	CNOP-P	目标函数( $\times 10^{11} \text{ m}^5/\text{s}$ )
方案 AH	-45 $\text{m}^2/\text{s}$	44.6
方案 RI	$-0.44 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$	2.53
方案 MAM	-0.0095 Pa	25.2
方案 JJA	-0.0197 Pa	17.9
方案 SON	-0.0089 Pa	1.27
方案 DJF	0.0106 Pa	0.63
	( $45 \text{ m}^2/\text{s}, -0.44 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ,	
方案 ALL	-0.0095 Pa, -0.0197 Pa, -0.0089 Pa, -0.0106 Pa)	130

表 4 事件 3 的 7 种情况的 CNOP-P  
Tab.4 The seven CNOP-Ps for the Event 3

个例	CNOP-P	目标函数( $\times 10^{11} \text{ m}^5/\text{s}$ )
方案 AH	-45 $\text{m}^2/\text{s}$	17.9
方案 RI	$-0.44 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$	2.04
方案 MAM	-0.0095 Pa	2.19
方案 JJA	-0.0197 Pa	5.32
方案 SON	-0.0089 Pa	7.0
方案 DJF	-0.0106 Pa	6.17
	( $45 \text{ m}^2/\text{s}, -0.44 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ,	
方案 ALL	-0.0095 Pa, -0.0197 Pa, -0.0089 Pa, -0.0106 Pa)	108

都为 2 月份, 从表 2 和表 3 可以看出, 事件 1 和事件 2 除了方案 AH 和方案 DJF 的 CNOP-P 相同外, 其余的 CNOP-P 符号是相反的。但是 2 个事件中单独优化模式参数误差得到的 CNOP-P 对黑潮大弯曲路径预报的影响大小基本类似, 两者都是春季和夏季的风应力大小误差对黑潮大弯曲路径预报的影响大于其它 2 个季节。另外, 对于与前 2 个事件预报起始时刻不同的事件 3, 秋季和冬季的风应力大小误差对黑潮大弯曲路径预报的影响略大于其他 2 个季节, 但是与前 2 个事件相比, 单个季节的风应力大小误差对黑潮大弯曲路径预报的影响相对较小。以上研究表明, CNOP-P 对于不同的黑潮大弯曲路径变化背景态是敏感的, 但是对于起始预报月份相同的 2 个事件, 单个模式参数误差对大弯曲路径预报的影响程度基本相当。因此, 对于预报起始月份相同的事件, 有效地对预报影响程度较大的几个模式参数进行估计, 将有助于减小大弯曲路径预报的不确定性。

对于这 3 个事件, 侧向摩擦系数误差对黑潮大弯曲路径预报的影响大于其他单个模式参数误差对预报的影响, 并且 3 个事件中方案 AH 的 CNOP-P 符号一致。界面摩擦系数误差虽然在整个优化时间都有作用, 但是它对黑潮大弯曲路径预报的影响相对较小。值得注意的是, 3 个事件中同时优化所有模式参数误差得到的 CNOP-P 是一致的, 并且对于黑潮大弯曲路径预报的影响基本相当。另外, 同时优化所有参数所得的 CNOP-P 并不等于分别优化每个参数扰动所得的 CNOP-P 的线性叠加, 例如对于事件 1, 6 个单独优化模式参数误差的所得的 CNOP-P 的简单组合是 ( $-45 \text{ m}^2/\text{s}, 0.44 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}, 0.0095 \text{ Pa}, 0.0197 \text{ Pa}, 0.0089 \text{ Pa}, 0.0106 \text{ Pa}$ ), 但是同时优化所有参数扰动所得的 CNOP-P 是 ( $45 \text{ m}^2/\text{s}, -0.44 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}, -0.0095 \text{ Pa}$ ,

-0.019 7Pa, -0.008 9Pa, -0.010 6Pa)。这可能是因为方案 ALL 的 CNOP-P 的分量引起的误差之间的相互作用较强。另外,我们还计算了事件 1 中单个优化结果线性叠加后的模式参数误差对黑潮大弯曲路径预报的影响,它们的影响( $1.24 \times 10^{13} \text{ m}^5/\text{s}$ )比方案 ALL 的 CNOP-P 对预报的影响( $1.46 \times 10^{13} \text{ m}^5/\text{s}$ )小,这也反映了所有模式参数误差引起的非线性作用对预报具有重要影响。

### 3 模式参数不确定性对日本南部黑潮路径变异预报的影响

前面采用条件非线性最优参数扰动方法求得了不同事件的 CNOP-P 以及它们对黑潮大弯曲路径预报的影响程度,为了进一步考察 CNOP-P 所导致的预报场的黑潮路径与背景流场的黑潮路径之间的差异,对于每一个事件,我们给出黑潮在预报终止时刻的路径变化情况,即在预报起始时刻将所得的 CNOP-P 叠加到相应的模式参数上,积分模式 1 a,得到预报终止时刻的黑潮路径。图 2 给出了 3 个事件的 7 个预报场以及背景流场在预报终止时刻的黑潮主轴。从图中可以看出,方案 MAM、方案 JJA、方案 SON、方案 DJF 和方案 RI 中的 CNOP-P 导致的预报的黑潮主轴并没有显著地偏离背景流场的黑潮主轴,并且在不同的事件中它们导致的黑潮主轴的变化也不一致。对于风应力大小在不同季节所求得的 CNOP-P,当 CNOP-P 为负值时,它使得预报的黑潮路径偏强,而当 CNOP-P 为正值时,它使得预报的黑潮路径偏弱。3 个事件中方案 AH 中的 CNOP-P 均为负值,它们使得预报的黑潮路径偏弱。对于方案 RI,事件 1 中的 CNOP-P 为正值,它使得预报的黑潮路径偏弱;事件 2 和事件 3 中的 CNOP-P 为负值,它们使得预报的黑潮路径偏强。另外,同时优化所有模式参数误差所得的 CNOP-P(方案 ALL)引起了黑潮主轴的显著偏离,它们均使得预报的黑潮路径偏强。

以上分析表明,模式多个参数同时存在误差时,对黑潮大弯曲路径预报具有较大的影响。那么它们所导致的预报误差是否显著,即叠加了 CNOP-P 之后,预报结果是否依然能够被接受?为了弄清这一问题,我们对前面所求得的 7 个预报场,分别计算一下它们相对于背景流场中上层厚度分量的均方根误差 RMSE,记为  $E_{\text{RMS}}$ ,定义如下:

$$E_{\text{RMS}}(t) = \left[ \frac{1}{MN} \sum_i^M \sum_j^N (h_{\text{tr}}(i, j) - h_{\text{tb}}(i, j))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

其中,  $h_{\text{tb}}$  和  $h_{\text{tr}}$  分别是  $t$  时刻背景流场和预报场中的海洋上层厚度分量,在日本南部区域( $25^\circ \sim 35^\circ \text{N}$ ,  $132^\circ \sim 140^\circ \text{E}$ )中进行求和。该区域是黑潮发生大弯曲路径的区域,  $M$ 、 $N$  为该区域上的格点数目。由该公式可以看出,  $E_{\text{RMS}}$  越大,预报能力相对越低,反之亦然。

为了确定上述几种情形是否能够被接受,我们需要定义一个标准来衡量。该标定义为背景流场在日本南部黑潮区域( $25^\circ \sim 35^\circ \text{N}$ ,  $132^\circ \sim 140^\circ \text{E}$ )后 90 a 的海洋上层厚度的均方根变化(root-mean-square variation, RMSV),记为  $V_{\text{RMS}}$ 。Komori<sup>[20]</sup>等和 Miyazawa<sup>[6]</sup>等采用类似的标准估计了黑潮路径变异的预报时限。如果  $E_{\text{RMS}}$  大于  $V_{\text{RMS}}$ ,则预报结果不能被接受。

如图 3 所示,对于这 3 个事件,优化单个模式参数误差所得的 CNOP-P 导致的  $E_{\text{RMS}}$ ,在预报终止时刻都小于  $V_{\text{RMS}}$ ,而同时优化所有参数所得的 CNOP-P 均使得  $E_{\text{RMS}}$  在 9 个月左右超出了  $V_{\text{RMS}}$ ,并且远大于其他 CNOP-P 导致的  $E_{\text{RMS}}$ 。这反映了所有模式参数误差同时优化得到的 CNOP-P 产生了显著的预报误差并导致预报结果不能被接受。所以,要提高黑潮大弯曲路径的预报技巧,我们需要对数值模式中的参数进行更好的估计。

### 4 结论与讨论

本文基于 1.5 层浅水方程模式,考察了模式参数误差对黑潮大弯曲路径预报的影响,重点讨论了模式参数风应力大小误差在不同季节具有不同的约束范围时,对黑潮大弯曲路径预报的影响。本文选择了 3 个不同的黑潮由非弯曲路径向大弯曲路径过渡阶段作为背景场,研究表明,对于不同的背景场,风应力大小误差在各个季节对黑潮大弯曲路径预报的影响不同,但是同时优化所有参数误差所得的 CNOP-P 基本一致,并使得预报的黑潮路径显著偏强。最后讨论了这些模式参数误差导致的预报结果是否能被接受,研究表明,单个模式参数误差并未导致预报结果显著偏离,但是所有模式参数误差同时存在导致了预报结果在 9 个月左右超出了模式的  $V_{\text{RMS}}$ ,预报结果不能接受。因此,模式参数需要给出更好的估计,以提高黑潮大弯曲路径的预报技巧。

可预报性研究一般包含 2 个方面:一方面是考察模式误差对预报的影响,另一方面是考察初始条件对预报的影响。本文仅考虑了模式参数误差对黑潮大弯曲路径预报的影响,下一步将考察模式初始

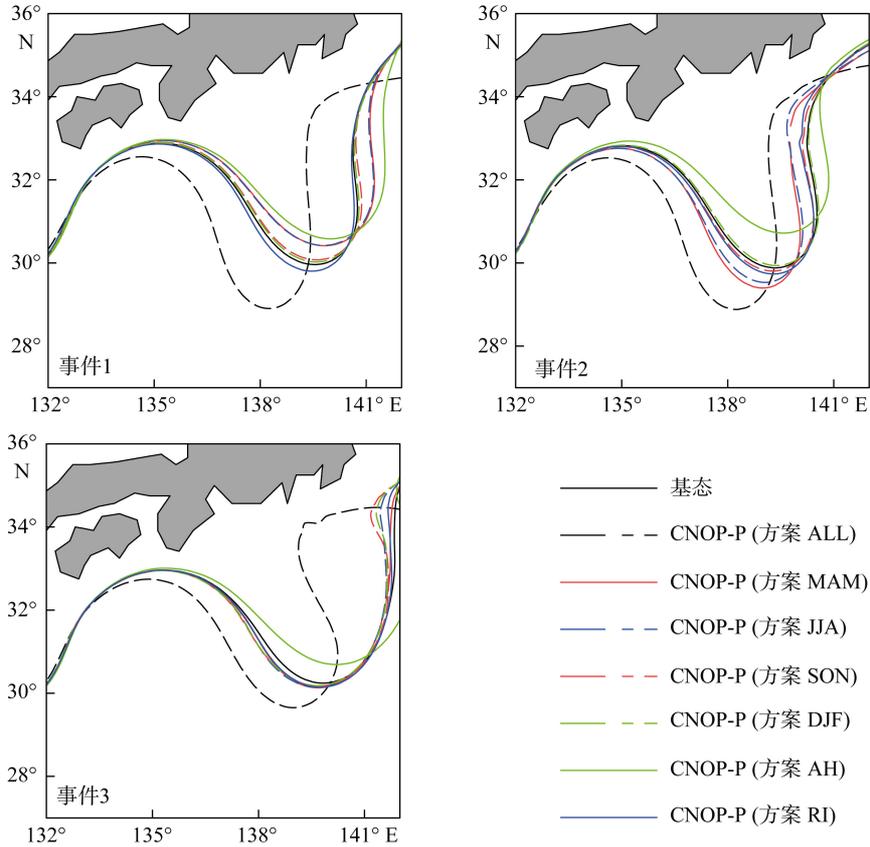


图2 背景场和 CNOP-P 导致的预报终止时刻的黑潮主轴  
Fig.2 The background field and the Kuroshio axes caused by CNOP-Ps

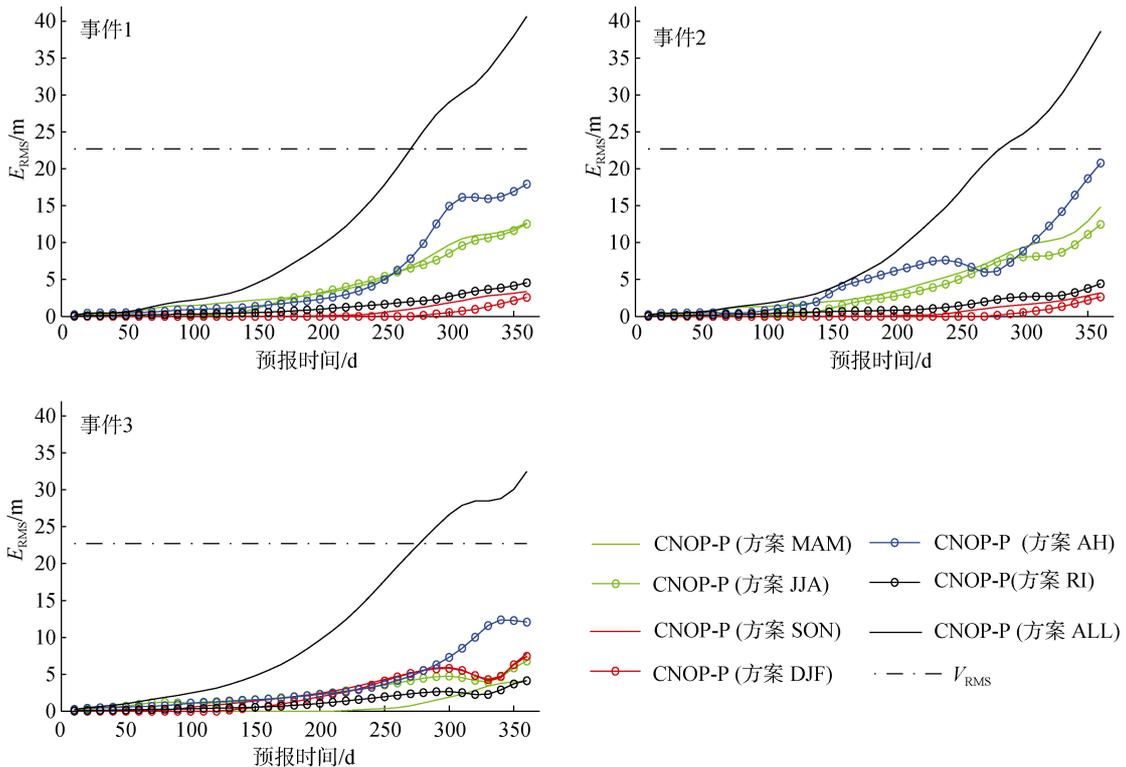


图3 CNOP-P 导致预报场与背景场的海洋上层厚度的方根误差( $E_{RMS}$ )的时间序列

Fig.3 Time series of RMSE of the upper-layer thickness between background field and forecast field caused by CNOP-Ps

误差对黑潮大弯曲路径预报的影响，并与之比较，找出影响大弯曲路径预报的最主要因素。另外，模式误差和初始误差同时存在对大弯曲路径预报的影响也需要进一步研究。上述研究发现，前两个事件预报的起始月份相同，风应力大小误差对黑潮大弯曲路径预报的影响，都是春季和夏季的风应力大小误差对黑潮大弯曲路径预报的影响大于其他 2 个季节。是否预报的起始和终止月份相同，风应力大小在不同季节的误差对黑潮大弯曲路径预报的影响都能得到相似的结论，即都是其中一个或两个季节对黑潮大弯曲路径预报的影响大于其他季节的影响？这个问题也需要进一步讨论。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Hurlburt H E, Smedstat O M, Rhodes R C, et al. A feasibility demonstration of ocean model eddy-resolving nowcast/forecast skill using satellite altimeter data[R]. Stennis: Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, Hancock, 2000.
- [3] Kagimoto T, Miyazawa Y, Guo X, et al. High resolution Kuroshio forecast system -Description and its applications[C]//Ohfuchi W, Hamilton K. High Resolution Numerical Modeling of the Atmosphere and Ocean. New York: Springer, 2008: 209-234.
- [4] Kamachi M, Kuragano T, Sugimoto S, et al. Short-range prediction experiments with operational data assimilation system for the Kuroshio south of Japan[J]. *J Oceanogr*, 2004, 60: 269-282.
- [5] Usui N, Tsujino H, Fujii Y, et al. Short-range prediction experiments of the Kuroshio path variabilities south of Japan[J]. *Ocean Dynamics*, 2006, 56(5): 607-623.
- [6] Miyazawa Y, Yamane S, Guo X, et al. Ensemble forecast of the Kuroshio meandering[J]. *J Geophys Res*, 2005, 110: C10026.
- [7] Ishikawa Y, Awaji T, Komori N, et al. Application of sensitivity analysis using an adjoint model for short-range forecasts of the Kuroshio path south of Japan [J]. *J Oceanogr*, 2004, 60: 293-301.
- [8] Fujii Y, Tsujino H, Usui N, et al. Application of singular vector analysis to the Kuroshio large meander [J]. *J Geophys Res*, 2008, 113: C07026.
- [9] Wang Q, Mu M, Dijkstra H A. Application of conditional nonlinear optimal perturbation method to the predictability study of the Kuroshio large meander [J]. *Adv Atmos Sci*, 2012, 29: 118-134.
- [10] Hellerman S, Rosenstein M. Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates [J]. *J Phys Oceanogr*, 1983, 13: 1093-1104.
- [11] Schmeits M J, Dijkstra H A. Bimodal Behavior of the Kuroshio and the Gulf Stream [J]. *J Phys Oceanogr*, 2001, 31: 3435-3456.
- [12] Pierini S A. Kuroshio Extension system model study: decadal chaotic self-sustained oscillations [J]. *J Phys Oceanogr*, 2006, 36: 1605-1625.
- [13] Nishida H. Description of the Kuroshio meander in 1975-1980[J]. Report of Hydrographic Research, 1982, 17: 181-217.
- [14] Qiu B, Miao W. Kuroshio path variations south of Japan: bimodality as a self-sustained internal oscillation [J]. *J Phys Oceanogr*, 2000, 30: 2124-2137.
- [15] Miyazawa Y, Guo X, Yamagata T. Roles of mesoscale eddies in the Kuroshio paths [J]. *J Phys Oceanogr*, 2004, 34: 2203-2222.
- [16] Mu M, Duan W S, Wang Q, et al. An extension of conditional nonlinear optimal perturbation approach and its applications [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2010, 17: 211-220.
- [17] Birgin E G, Martinez. J M, Raydan M. Nonmonoton spectral projected gradient methods on convex sets [J]. *SIAM J Optimiz*, 2000, 10: 1196-1211.
- [18] Josey S A, Kent E C and Taylor P K. Wind stress forcing of the ocean in the SOC climatology: comparisons with the NCEP-NCAR, ECMWF, UWM/COADS, and Hellerman and Rosenstein datasets [J]. *J Phys Oceanogr*, 2002, 32: 1993-2019.
- [19] Da Silva A M, Young C C, Levitus S. Atlas of surface marine data 1994: Algorithms and procedures[J]. US Department of Commerce, NOAA, NESDIS, 1994, 1: 83.
- [20] Komori N, Awaji T, Ishikawa Y, et al. Short-range forecast experiments of the Kuroshio path variabilities south of Japan using TOPEX/Poseidon altimetric data[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108: C1.

# The impact of the model parameter uncertainties on the predictability of the Kuroshio large meander path south of Japan

ZHANG Pei-jun<sup>1,2</sup>, WANG Qiang<sup>1</sup>

(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)

**Received:** Mar., 26, 2014

**Key words:** prediction of the Kuroshio large meander path; conditional nonlinear optimal parameter perturbation; model parameter error

**Abstract:** Based on a 1.5-layer shallow-water model, the impact of model parameter errors on the prediction of the Kuroshio large meander (LM) path in south of Japan was investigated by the conditional nonlinear optimal parameter perturbation (CNOP-P) method. The results showed that the impacts of the single model parameter errors such as the lateral friction coefficient, interfacial friction coefficient and the amplitude of wind stress with different constraints in different seasons, on the prediction of the Kuroshio LM path were relatively small. In addition, they were sensitive to the background field, which was the Kuroshio transition state from non-large meander (NLM) path to LM path. However, the optimal error mode of all the model parameter errors existing simultaneously had a large impact on the prediction of the Kuroshio LM path and the results of prediction could not be accepted. Therefore, in order to enhance the forecast skill of the Kuroshio LM path in this model, the model parameters should give the best possible estimates.

(本文编辑: 李晓燕)