

张星,穆穆,王强,等.条件非线性最优扰动方法在黑潮目标观测研究中的应用[J].海洋气象学报,2018,38(1):1-9.
Zhang Xing, Mu Mu, Wang Qiang, et al. Application of the conditional nonlinear optimal perturbation method in targeted observation studies of Kuroshio[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(1): 1-9. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.01.001. (in Chinese)

条件非线性最优扰动方法在黑潮目标观测研究中的应用

张星¹,穆穆²,王强³,张坤³

(1. 青岛市黄岛区气象局,山东 青岛 266400; 2. 复旦大学大气科学研究院,上海 200433; 3. 中国科学院海洋研究所,山东 青岛 266071)

摘要:对近年来利用条件非线性最优扰动(Conditional Nonlinear Optimal Perturbation, CNOP)方法开展的黑潮目标观测研究进行了总结,主要包括日本南部黑潮路径变异的目标观测研究、黑潮延伸体模态转变的目标观测研究和源区黑潮流量变化的目标观测研究。通过计算这些事件的CNOP型扰动,发现这些事件的CNOP型扰动具有局地特征,可以作为实施目标观测的敏感区。理想回报试验结果表明,如果在由CNOP方法识别的敏感区内实施目标观测,则会大幅度提高上述事件的预报技巧。

关键词:目标观测;条件非线性最优扰动方法;黑潮

中图分类号: P714.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)01-0001-09

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.01.001

Application of the conditional nonlinear optimal perturbation method in targeted observation studies of Kuroshio

ZHANG Xing¹, MU Mu², WANG Qiang³, ZHANG Kun³

(1. Huangdao Meteorological Bureau of Qingdao City, Qingdao 266400, China; 2. Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200433, China; 3. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract This paper reviews research progresses of application of the conditional nonlinear optimal perturbation (CNOP) method in targeted observation of the Kuroshio in recent years, focusing on the Kuroshio path variations in south of Japan, the Kuroshio extension state transition, and the upstream Kuroshio transport variation. By calculating the CNOPs of the above cases, the localization features of the CNOP spatial structures are found for each event, which could be used for identifying the sensitive areas of the targeted observation. Results of ideal hindcasting experiments show that if the targeted observing strategies in the sensitive areas identified by the CNOP method are applied, the forecast skill of above events could be improved significantly.

Key words targeted observation; CNOP method; Kuroshio

收稿日期:2017-12-11; 修订日期:2017-12-27

基金项目:国家自然科学基金项目(41230420,41576015,41490644,41490640);国家自然科学基金创新群体项目(41421005);国家自然科学基金委员会-山东省人民政府海洋科学研究中心联合基金项目(U1606402);中国科学院战略性先导科技专项(XDA11010303)

作者简介:张星,男,博士,工程师,主要从事大气与海洋可预报性研究,zxqxj@foxmail.com。

引言

在地球科学中,观测是发现科学事实和研究科学问题的重要手段。尤其是在大气科学与海洋科学中,气象与海洋观测资料为大气与海洋模式提供初始条件,从而使科研工作者可以利用数值预报模式对将来发生的一些大气与海洋事件做出预报(或预测)。因此,观测的准确程度将直接影响到数值预报结果的准确程度。

在数值天气预报发展的初期,气象学家就注意到某一区域数值预报的准确程度依赖于前期某一局部区域内初始条件的准确程度^[1]。但受限于当时的科学理论,研究人员往往是根据主观经验判断在哪些区域增加观测从而改善该区域的初始条件准确度。直到20世纪90年代中期,“目标观测”的概念才被正式提出。目标观测^[2]又称适应性观测,是为了使将来关心的某一时刻(验证时刻)的某一区域(验证区域)的某个事件的预报结果更加精确,需在验证时刻之前的一个时间(目标时刻)在对关心的事件预报产生较大影响的区域(敏感区)进行更多的额外观测,来获得更多的观测资料。然后将这些额外的观测资料通过资料同化等方式进行处理,为预报模式提供更加准确的初始场(图1)。通过这种方式可以减少敏感区内初始条件的误差,从而提高预报技巧^[3-5]。

目标观测中最重要的一环之一就是识别目标观测敏感区。与以前根据经验识别目标观测敏感区的做法不同,现在大气与海洋科学中主要利用数值模式来识别目标观测敏感区。具体来说,就是通过数值模式考察何种空间结构的初始扰动会对预报结果产生较大影响,然后利用初始扰动的空间结构识别目标观测敏感区。这种方法的优越性是显而易见的:大气与海洋事件一般是多尺度下多种非线性过程相互作用的产物,而经验具有主观性和局限性,很难全面考虑到整个大气与海洋事件中的非线性物理过程。与之对应的是,数值模式较充分地考虑了大气与海洋事件的内在动力机制与多尺度的非线性相互作用,因而可以较好地描述大气与海洋事件的发生与演变,更好地帮助识别目标观测敏感区。因此,利用数值模式研究目标观测敏感区,进而在敏感区内实施目标观测策略,可以为数值预报提供更准确的初始场,从而提高数值预报技巧。当前,识别敏感区的方法主要有伴随敏感性向量方法^[6]、线性奇异向量方法^[7]、集合转换方法^[8]、集合

卡尔曼滤波方法^[9]、条件非线性最优扰动方法^[10]等。

事实上,自从目标观测被提出以来,其有效性已经在一系列的外场试验中得到了证实^[2,7,11-16]。然而以前的目标观测试验大多数是针对天气事件,针对海洋事件的目标观测研究还比较少。本文通过总结近年来黑潮目标观测研究的最新研究进展,向读者介绍如何利用条件非线性最优扰动方法开展海洋事件的目标观测研究。条件非线性最优扰动(Conditional Nonlinear Optimal Perturbation, CNOP)代表了在预报时刻具有最大非线性发展的一类初始扰动。同其他方法相比,CNOP方法直接使用非线性优化系统,不作任何线性近似。因此CNOP方法能捕捉到在一定约束条件下,在预报时刻有最大非线性发展的初始扰动。当初始扰动代表初始场误差时,CNOP方法捕捉到的即为初始场中快速增长初始误差;当初始扰动代表某一事件的前期征兆时,CNOP方法捕捉到的即为最容易引发这一事件发生的最优前期征兆。通过CNOP方法计算出初始扰动(快速增长初始误差或者最优前期征兆)的空间分布,即可以识别出目标观测敏感区。目前此方法已被成功地应用到台风的目标观测研究,及 ENSO (El Niño-Southern Oscillation)、NAO (North Atlantic Oscillation)、IOD (Indian Ocean Dipole) 的可预报性研究和海洋热盐环流的敏感性分析等工作中^[17-26]。

本文具体安排如下:在第1节中介绍 CNOP 方法;然后分别介绍该方法在日本南部黑潮目标观测研究(第2节)、黑潮延伸体目标观测研究(第3节)和源区黑潮目标观测研究(第4节)中的最新进展;最后,在第5节中进行总结与展望。



图1 目标观测示意图

Fig.1 Schematic diagram of targeted observation

1 条件非线性最优扰动方法

本节简要回顾条件非线性最优扰动方法。

首先考虑如下模式:

$$X_t = M_t(X_0) \quad (1)$$

其中, X_0 为模式的初始条件, M_t 是非线性算子,它

意味着把在初始时刻的初始状态 X_0 “传播”到最终时刻, 得到最终时刻的状态 X_t 。现在考虑在初始状态 X_0 上叠加一个小的初始扰动 x_0 , 那么考虑到叠加扰动的影响, 在最终时刻的状态变为:

$$X_t + x'_t = M_t(X_0 + x_0) \quad (2)$$

而叠加的初始扰动在最终时刻的非线性发展可以表示为:

$$x'_t = M_t(X_0 + x_0) - M_t(X_0) \quad (3)$$

当考虑在一定初始约束条件下, 什么样的初始扰动可以在最终时刻发展到最大这个问题时, 可以定义一个如下的有约束条件的非线性优化问题:

$$J(x_{0,\delta}) = \max_{\|x_0\|_V \leq \delta} J(x_0) = \max_{\|x_0\|_V \leq \delta} \|M_t(X_0 + x_0) - M_t(X_0)\|_B^2 \quad (4)$$

其中, $J(x_0) = \|M_t(X_0 + x_0) - M_t(X_0)\|_B^2$ 为目标函数。它表示的是初始扰动 x_0 经过非线性发展, 在验证时刻目标区域 B 所能取得的最大值。如果再考虑到以下限制条件: 初始扰动在一定区域 V 内的大小不能超过 δ , 那么这样一个有条件约束的非线性最优问题的解, 称之为条件非线性最优扰动 (CNOP), 而求这样一个条件非线性最优问题的方法, 即为 CNOP 方法。在某些情形下, 目标函数可能存在局部极大值, 此时对应的初始扰动称之为局部 CNOP。事实上, 全局 CNOP 和局部 CNOP 都可能具有明确的物理意义: 例如在 ENSO 的最优前期征兆研究中, 全局 CNOP 扰动导致厄尔尼诺, 而局部 CNOP 扰动导致拉尼娜^[17,27]。

2 日本南部黑潮的目标观测

黑潮, 是北太平洋副热带环流中的西边界流。由于水色偏深, 远看似黑色, 故被称之为黑潮。黑潮在吐噶喇海峡至伊豆海脊的洋流称之为日本南部黑潮。日本南部黑潮存在两种典型路径^[28]: 大弯曲路径和非大弯曲路径。大弯曲路径是指黑潮离开日本南部海岸, 向南发生较大程度的弯曲; 非大弯曲路径是指它沿着海岸向东流去。对于任意一种路径, 其维持时间约为几年到十几年, 然而两种路径之间的过渡时间仅为几个月^[29]。已有研究表明, 日本南部海域的黑潮路径变异对局地天气和气候有重要影响。如 Xu et al.^[30] 指出, 当大弯曲路径发生时, 黑潮和日本海岸之间形成的冷水团通过海气相互作用影响大气环流, 最终导致局地风速减小和降水减少; Nakamura et al.^[31] 指出黑潮的路径状态能显著地影响风暴轴的活动; Hayasaki et al.^[32] 发

现黑潮路径变异对副热带气旋活动有重要影响。此外, 黑潮路径变异还对渔业和航海安全产生重要影响。因此, 如果能较好地预报黑潮路径变异, 将有重要的实际意义。但目前黑潮路径变异的预报仍存在较大的不确定性, 有必要对黑潮路径变异开展目标观测研究, 提高其预报的准确性。

为此, Wang et al.^[33] 基于浅水模式并利用 CNOP 方法识别了黑潮路径变异预报的目标观测敏感区, 同时探讨了敏感区的有效性。首先研究人员计算得到了对黑潮路径变异预报影响最大的 CNOP 型扰动。图 2 给出了该扰动总能量的空间结构, 可以看出扰动的大值主要位于日本九州岛东南部海域。根据该扰动空间结构分布特征, 黑潮路径变异的目标观测敏感区被定义为图 2 中 R3 的区域。为了考察利用 CNOP 方法识别的目标观测敏感区的有效性, 研究人员进行了如下理想试验: 首先图 2 中的日本南部黑潮和黑潮延伸体上游区域被划分为 9 个相同大小的子区域, 包括敏感区 R3 和其他 8 个子区域; 其次在整个模式模拟区域生成 40 个随机初始误差场, 这些随机误差场服从均值为 0 的正态分布。为了进行比较, 将随机误差场进行标准化, 使得随机初始误差场的总能量与 CNOP 型初始扰动的总能量相同; 最后考察这些随机误差场的发展, 得到的预报误差的动能平均值记为 J_1 。然后, 假设在 9 个区域中的一个区域实施目标观测, 相应地该区域内的初始随机误差被消除, 而该区域以外的误差保持不变。这样对于每个区域就能得到 40 个新的随机误差场, 这些误差的发展得到的预报误差的动能平均值记为 J_2 , 那么由于目标观测的实施而导致的预报误差相对减小程度为 $(J_2 - J_1) / J_1$, 显然负号表示预报误差减小。减小不同区域随机误差, 所带来

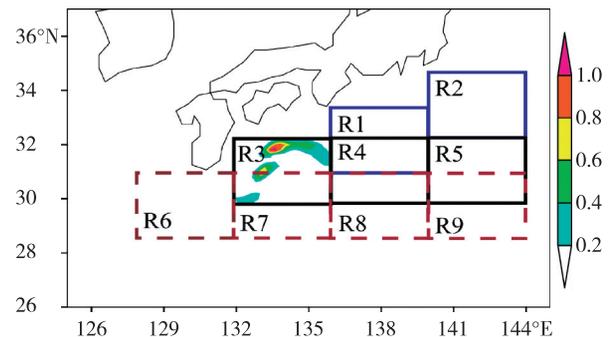


图 2 CNOP 型扰动的空间分布 (总能量, 单位: $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$; 9 个矩形区域被用于进行目标观测试验)^[33]

Fig.2 Spatial distribution of the CNOP (total energy, units: $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$; The nine regions are selected to carry out the experiments of targeted observation)^[33]

的预报误差相对减小程度被列在表1中,结果表明在敏感区R3内消除初始误差使预报误差的减小程度最大,达到43.59%。这说明在CNOP方法所识别的目标观测敏感区实施观测能够最大程度地改进黑潮路径变异的预报技巧,从而证实了敏感区的有效性。

表1 实施目标观测前后不同区域预报误差平均动能的相对偏差(其中预报误差由随机误差发展得到)^[33]

Table 1 Relative differences (in percent) of the forecast errors between the cases with and without eliminating the random initial errors over the corresponding area (The forecast errors are developed by random error)^[33]

区域标记	预报误差动能的相对偏差/%
R1	-15.28
R2	-1.68
R3	-43.59
R4	-11.85
R5	-26.70
R6	-0.04
R7	-1.25
R8	-1.53
R9	0.73

3 黑潮延伸体的目标观测

日本南部黑潮经伊豆海脊向东驶入北太平洋的这段洋流被称为黑潮延伸体。由于上游黑潮从低纬向中高纬度输送了巨大的热量,在黑潮延伸体区域大量热量释放并与上层大气进行能量交换。所以,黑潮延伸体区域是太平洋除热带地区以外海气相互作用最为活跃的地区,并对全球的气候产生重要影响^[34-36]。观测资料和数值模式结果均表明:黑潮延伸体存在准十年周期的低频模态振荡^[37-38]。黑潮延伸体的模态转变会对大气与海洋都产生重要的影响:当黑潮延伸体发生模态转变时,海洋温度、盐度、海表热通量、海表风辐合辐散等都会发生改变,进而对海平面气压、垂直风切变、海洋大气边界层和大气环流等产生重要影响^[39-42]。由于黑潮延伸体模态转变对于大气和海洋都产生如此重要影响,因此预报黑潮延伸体的模态转变有着非常重要的意义。

黑潮延伸体模态转变是海洋非线性动力过程的体现^[43],其模态转变预报技巧很大程度上取决于预报初始时刻海洋初始场的准确程度^[44]。然而,黑

潮延伸体区域高精度、高分辨率的大气和海洋观测资料比较缺乏,数值模式的初始场存在较大的不确定性,从而导致黑潮延伸体模态转变预报具有较大的预报误差。为了提高黑潮延伸体模态转变的预报技巧,Zhang et al.^[45]使用CNOP方法计算出最容易激发黑潮延伸体发生模态转变的初始扰动(即最优前期征兆),并利用最优前期征兆的空间结构识别目标观测敏感区。在敏感区内实施目标观测策略,可以为数值模式提供更准确的海洋初始场,从而提高黑潮延伸体模态转变的预报技巧。

该研究中使用由Pierini^[43]设计的非线性约化重力海洋模式。模式在气候态风场强迫下积分60 a,期间黑潮延伸体一直处于低能量模态。考虑到在不同初始状态下,计算的黑潮延伸体最优前期征兆可能会有不同。因此选取十个不同时刻的黑潮延伸体状态作为初始场,来分别计算其各自的最优前期征兆。在模式运行的后十年中每年选取一个黑潮延伸体初始状态作为初始场,来计算其各自的最优前期征兆(10个试验简称为EXP1,EXP2,EXP3,⋯,EXP10)。在优化时间的选取上,考虑到模式模拟的黑潮延伸体模态转变过程一般在两年时间内转变最为剧烈,因此把优化时间设为两年,即考虑什么样的海洋初始扰动可以在两年内发展到最大,并且能激发黑潮延伸体的模态转变。

图3为计算得到的十个试验中黑潮延伸体模态转变最优前期征兆SSH的空间结构。总体来看,最优前期征兆表现为黑潮延伸体南侧再循环流南部负SSH异常扰动。以EXP2的结果为例,最优前期征兆主要位于黑潮延伸体南侧31~33°N,141~160°E区域。其中SSH扰动值强于-2 cm的扰动集中在141~153°E的上游区域。EXP1,EXP3,EXP4,EXP5和EXP10中计算的最优前期征兆的空间分布与EXP2中的大致相同。EXP6,EXP7,EXP8和EXP9中计算的最优前期征兆主要也位于黑潮延伸体南侧。其中:EXP6中最优前期征兆的大值区位于155°E处;EXP8中最优前期征兆较平均地分布于整个黑潮延伸体南侧区域,并没有明显的大值区;EXP9中最优前期征兆的大值区位于150°E处。

计算出最优前期征兆后,即可以利用最优前期征兆的空间结构来识别能最大程度上改善黑潮延伸体模态转变预报技巧的目标观测敏感区。研究人员把可能对黑潮延伸体模态转变产生较大影响的海洋初始场分为7个子区域(R1,R2,R3,⋯, R7;见图4),每个子区域包含880个模式格点,占全场

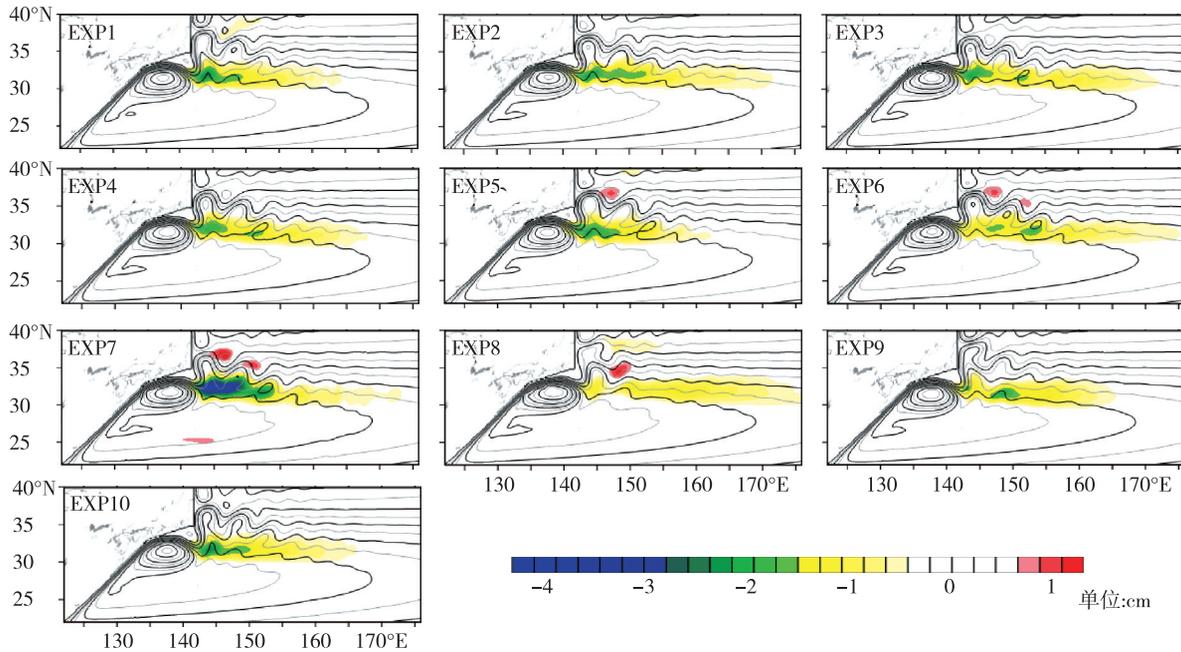


图 3 由 EXP1—EXP10 试验得到的最优前期征兆的空间结构 (SSH, 单位: cm)^[45]
 Fig.3 Spatial structures of the CNOPs obtained by the EXP1—EXP10 experiments (SSH, units: cm)^[45]

181 028个模式格点总数的 0.488%。由于 EXP1—EXP10 试验中计算得到的最优前期征兆主要集中在上游黑潮延伸体南侧再循环流的南部 (R4 子区域), 因此, R4 子区域即为由 CNOP 方法识别的黑潮延伸体模态转变的目标观测敏感区。如果在该敏感区内增加额外的目标观测, 不仅能够捕捉到黑潮延伸体模态转变的最优前期征兆, 还能减小初始条件的误差, 从而有效地提高黑潮延伸体模态转变的预报技巧。

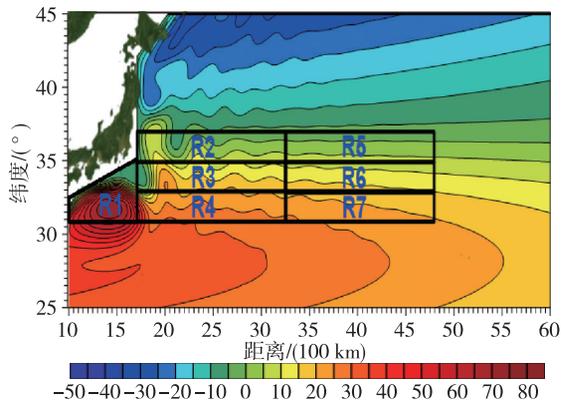


图 4 黑潮延伸体区域中 7 个子区域的划分示意图
 Fig.4 Schematic diagram of seven sub-regions of the Kuroshio extension region

4 源区黑潮的目标观测

本节中, 把研究目光聚焦到黑潮的上游区域,

探讨源区黑潮的目标观测问题。源区黑潮是指从北赤道流分叉点到台湾岛附近海域之间的黑潮^[46], 其流量变化对周边气候、中国近海环流及生态系统等有重要影响^[47-51]。因此, 研究源区黑潮流量变化具有十分重要的意义。研究表明, 源区黑潮流量在秋季通常呈现快速下降^[52-53], 即源区黑潮流量季节性下降现象。该现象是源区黑潮流量季节变化中最显著的信号之一, 能否准确预报该现象是提高源区黑潮预报技巧的重要前提。当前, 源区黑潮流量季节性下降的预报仍存在较大的不确定性。在不同初始条件下, 即使模式外强迫相同, 该现象的发生时间和流量下降幅度仍有较大差异 (图 5)。为此, 有必要利用 CNOP 方法开展源区黑潮的可预报性研究以探究初始扰动导致预报结果不确定性的原因和机制, 并进一步通过目标观测提高源区黑潮的预测能力。

为此, Zhang et al.^[54] 首次利用 CNOP 方法在三维复杂海洋模式中开展了黑潮的可预报性研究。基于区域海洋模式 (Regional Ocean Model System, ROMS), 研究人员建立了非线性优化系统, 并针对两次源区黑潮流量季节性下降事件分别计算 CNOP。在该研究中, 非线性优化系统计算变量维数约为 1 300 万, 是迄今已知 CNOP 方法应用中的最大变量维数, 这为在高分辨率海洋模式中开展海洋环流的可预报性和目标观测研究提供了技术指

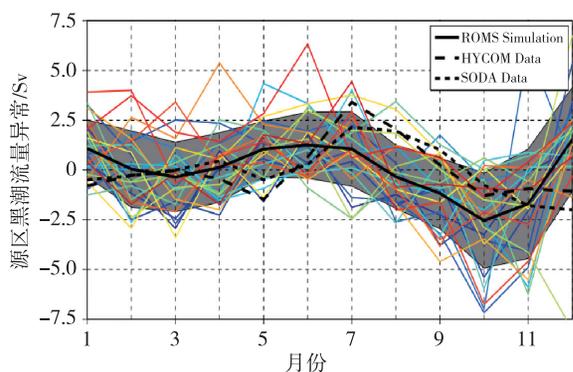


图5 源区黑潮流量异常的季节变化(彩色线为ROMS模拟结果;黑色实线、虚线和点线分别为ROMS模拟结果的平均值、SODA2.2.4的平均值和HYCOM PACa0.08的平均值)^[54]

Fig.5 The upstream Kuroshio transport anomalies of the analyzed 25 model years (color lines) and associated standard deviation (shaded). The black solid line, the dashed line and the dotted line denote the monthly climatological transport anomalies of the ROMS simulation, the SODA2.2.4 dataset and the HYCOM PACa0.08 dataset, respectively^[54]

导。结果表明,存在两类CNOP型扰动(CNOP1和CNOP2),分别会低估和高估源区黑潮流量季节性下降事件的预报。具体地,在预报终止时刻CNOP1

和CNOP2分别会将黑潮流量下降幅度低估或高估约50%。同时,CNOP型扰动的空间结构具有明显的局地性特征,其主要分布于吕宋岛以东128°E附近的海洋次表层(图6)。进一步分析表明,CNOP型扰动主要通过斜压不稳定过程从背景流场吸收能量并快速发展,同时在发展过程中不断向西传播,最终以中尺度涡形式影响源区黑潮。

综上所述,CNOP型扰动容易导致源区黑潮流量季节性下降预报结果的不确定性。CNOP型扰动空间结构的局地性特征表明,可以通过目标观测方法来提高初始条件准确度,进而提高源区黑潮流量季节性下降事件的预报能力。为此,Zhang et al.^[55]探究了源区黑潮流量季节性下降预报的目标观测问题。目标观测的关键在于识别目标观测敏感区。在垂直积分能量方案下,通过数值试验比较了不同积分能量(包括动能、势能和总能量)标准和敏感区大小下所识别的敏感区的有效性,并最终确定了最优敏感区OSen(图7)。为验证敏感区OSen的有效性,研究人员设计并实施了一系列敏感性试验。在预报初始时刻,在敏感区和其他6个子区域(R1, R2, R3, ..., R6)内叠加误差。试验结果表明:位于敏感区及其邻近区(如R2和R3)内的初始误差更

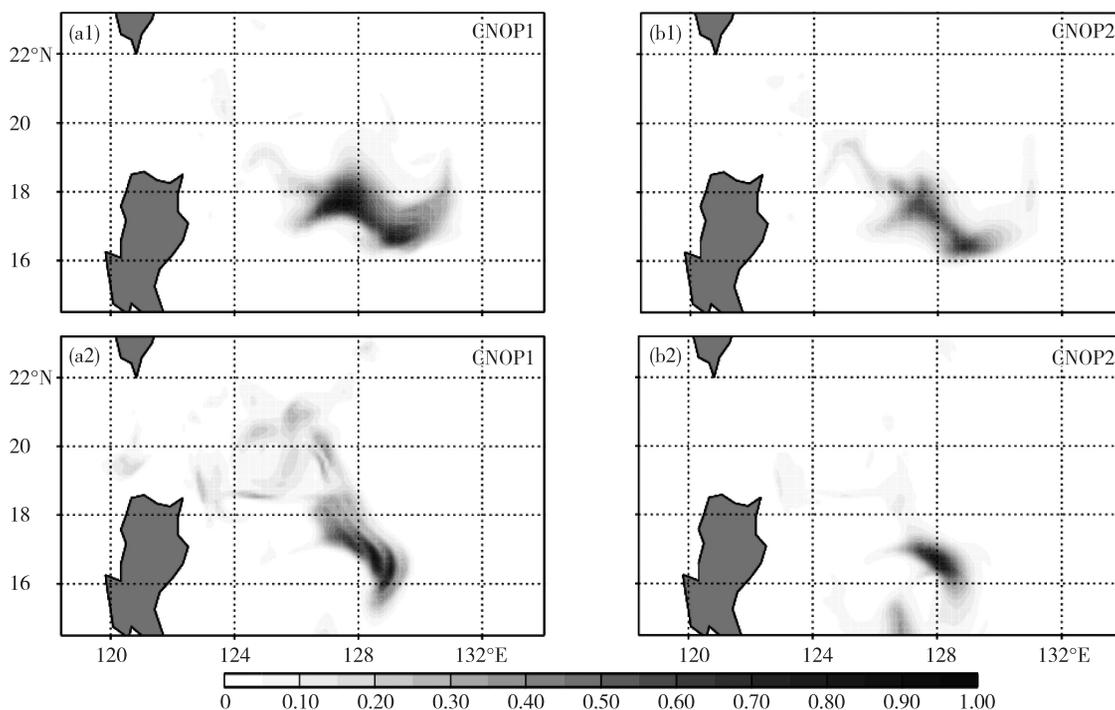


图6 归一化的CNOPs垂直积分总能量((a1)和(b1)为所选源区黑潮流量季节性下降事件一的两类CNOP型误差的能量分布;(a2)和(b2)为所选源区黑潮流量季节性下降事件二的两类CNOP型误差的能量分布)^[54]

Fig.6 Total energy distributions of CNOPs, for which the CNOP energies are vertically integrated in the upper 1000 m and normalized by their largest value. (a1) and (b1) denote the energy distributions of the two CNOPs in Event 1. (a2) and (b2) denote the energy distributions of the two CNOPs in Event 2^[54]

易导致较大的预报误差。随后研究人员进一步考察了误差空间结构对预报结果的影响,发现位于敏感区内的 CNOP 型扰动总会导致最大的预报误差,同时与 CNOP 型扰动空间结构较相似的初始误差通常得到较大发展。因此,用 CNOP 方法所识别的敏感区是有效的,能够为适应性观测网的构建提供科学和方法指导。通过在敏感区加密观测并进行资料同化,可以有效地提高源区黑潮流量季节性下降现象的预报技巧。

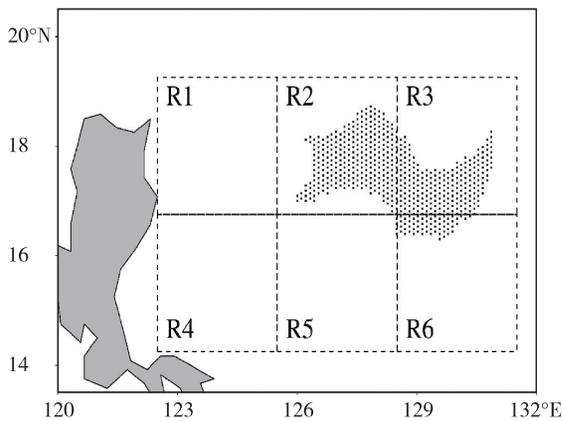


图 7 6 个比较区域 (R1—R6) 和最优敏感区 OSen (打点区域)^[55]

Fig.7 Domains of the compared areas (R1 to R6). The dotted region denotes the identified sensitive area OSen^[55]

5 总结与讨论

本文主要回顾了条件非线性最优扰动方法在黑潮目标观测研究中的应用。具体地,基于研究日本南部黑潮路径变异的浅水模式、研究黑潮延伸体模态转变的非线性约化重力模式以及研究源区黑潮的区域海洋模式 (ROMS), 研究人员分别利用 CNOP 方法计算出日本南部黑潮路径变异、黑潮延伸体模态转变和源区黑潮流量季节性下降的 CNOP 型扰动。这些事件的 CNOP 型扰动所呈现的局地性区域代表了各自的目标观测敏感区。在日本南部黑潮和源区黑潮的目标观测研究中, 研究人员已经通过理想回报试验验证了其各自目标观测敏感区的有效性。下一步将利用理想回报试验证明黑潮延伸体模态转变目标观测敏感区的有效性。

大气与海洋事件的目标观测研究是一个十分具有挑战性的课题, 仍然有大量的科学问题需要解决。这不仅需要研究人员具备扎实的大气科学与海洋科学知识, 而且需要具备坚实的数理基础和熟

练使用高性能计算机的能力。CNOP 方法作为识别目标观测敏感区的有效方法, 目前已成功应用于三维复杂的海洋模式, 并可以计算 1 300 万变量维数的非线性优化问题。将来研究人员会进一步尝试利用包含更多大气与海洋物理过程的数值模式来进行目标观测的研究工作。相信随着计算机科学的发展以及有效的学科交叉, 大气与海洋的目标观测研究将取得更多振奋人心的成果。

参考文献:

- [1] Riehl H, Haggard W H, Sanborn R W. On the prediction of 24-hour hurricane motion [J]. *J Meteor*, 1956, 13 (5): 415-420.
- [2] Snyder C. Summary of an informal workshop on adaptive observations and FASTEX [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1996, 77(5): 953-961.
- [3] 穆穆, 王洪利, 周非凡. 条件非线性最优扰动方法在适应性观测研究中的初步应用 [J]. *大气科学*, 2007, 31 (6): 1102-1112.
- [4] 穆穆, 段晚锁. 条件非线性最优扰动在可预报性问题研究中的应用 [J]. *大气科学*, 2013, 37(2): 281-296.
- [5] 穆穆. 目标观测的方法、现状与发展展望 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(11): 1717-1725.
- [6] Ancell B C, Mass C F. Structure, growth rates, and tangent linear accuracy of adjoint sensitivities with respect to horizontal and vertical resolution [J]. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(10): 2971-2988.
- [7] Palmer T N, Gelaro R, Barkmeijer J, et al. Singular vectors, metrics, and adaptive observations [J]. *J Atmos Sci*, 1998, 55(4): 633-653.
- [8] Bishop C H, Toth Z. Ensemble transformation and adaptive observations [J]. *J Atmos Sci*, 1999, 56(11): 1748-1765.
- [9] Hamill T M, Snyder C. Using improved background-error covariance from an ensemble Kalman filter for adaptive observations [J]. *Mon Wea Rev*, 2002, 130 (6): 1552-1572.
- [10] Mu M, Duan W S, Wang B. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications [J]. *Nonlinear Proc Geophys*, 2003, 10: 493-501.
- [11] Langland R H, Rohaly G D. Adjoint-based targeting of observations for FASTEX cyclones [C] // Seventh Conference on Mesoscale Processes. Reading: United Kingdom, 1996: 359-371.
- [12] Langland R H, Toth Z, Gelaro R, et al. The North Pacific experiment (NORPEX-98): Targeted observations for improved North American weather forecasts [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 80(7): 1363-1384.

- [13] Szunyogh I, Toth Z, Morss R E, et al. The effect of targeted dropsonde observations during the 1999 winter storm reconnaissance program [J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(10):3520-3537.
- [14] Wu C, Lin P H, Aberson S, et al. Dropwindsonde observations for typhoon surveillance near the Taiwan region (DOTSTAR): An overview [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86(6):787-790.
- [15] Rabier F, Gauthier P, Cardinali C, et al. An update on THORPEX-related research in data assimilation and observing strategies [J]. *Nonlin Processes Geophys*, 2008, 15(1):81-94.
- [16] Aberson S D. The impact of dropwindsonde data from the THORPEX pacific area regional campaign and the NOAA hurricane field program on tropical cyclone forecasts in the global forecast system [J]. *Mon Wea Rev*, 2011, 139(9):2689-2703.
- [17] Duan W, Mu M, Wang B. Conditional nonlinear optimal perturbation as the optimal precursors for El Niño-Southern Oscillation events [J]. *J Geophys Res: Atmospheres*, 2004, 109(D23):D23105.
- [18] Mu M, Sun L, Dijkstra H A. The sensitivity and stability of the ocean's thermocline circulation to finite amplitude freshwater perturbations [J]. *J Phys Oceanogr*, 2004, 34(10):2305-2315.
- [19] Mu M, Zhou F F, Wang H L. A method for identifying the sensitive areas in targeted observations for tropical cyclone prediction; Conditional nonlinear optimal perturbation [J]. *Mon Wea Rev*, 2009, 137(5):1623-1639.
- [20] Sun L, Mu M, Sun D-J, et al. Passive mechanism of decadal variation of thermohaline circulation [J]. *J Geophys Res: Oceans*, 2005, 110(C7):C07025.
- [21] Qin X, Mu M. Influence of conditional nonlinear optimal perturbations sensitivity on typhoon track forecasts [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2012, 138(662):185-197.
- [22] Qin X H, Mu M. Can adaptive observations improve tropical cyclone intensity forecasts? [J]. *Adv Atmos Sci*, 2014, 31(2):252-262.
- [23] Jiang Z, Mu M, Luo D. A study of the North Atlantic oscillation using conditional nonlinear optimal perturbation [J]. *J Atmos Sci*, 2013, 70(3):855-875.
- [24] Li Y, Peng S, Liu D. Adaptive observation in the South China Sea using CNOP approach based on a 3-D ocean circulation model and its adjoint model [J]. *J Geophys Res: Oceans*, 2014, 119(12):8973-8986.
- [25] Hu J, Duan W. Relationship between optimal precursory disturbances and optimally growing initial errors associated with ENSO events: Implications to target observations for ENSO prediction [J]. *J Geophys Res: Oceans*, 2016, 121(5):2901-2917.
- [26] Mu M, Feng R, Duan W. Relationship between optimal precursors for Indian Ocean dipole events and optimally growing initial errors in its prediction [J]. *J Geophys Res: Oceans*, 2017, 122(2):1141-1153.
- [27] Duan W S, Xu H, Mu M. Decisive role of nonlinear temperature advection in El Niño and La Niña amplitude asymmetry [J]. *J Geophys Res: Oceans*, 2008, 113(C1):C01014.
- [28] Taft B. 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.
- [29] Kawabe M. Transition processes between the three typical paths of the Kuroshio [J]. *J Oceanogr Soc Japan*, 1986, 42(3):174-191.
- [30] Xu H, Tokinaga H, Xie S-P. Atmospheric effects of the Kuroshio large meander during 2004-05 [J]. *J Climate*, 2010, 23(17):4704-4715.
- [31] Nakamura H, Nishina A, Minobe S. Response of storm tracks to bimodal Kuroshio path states south of Japan [J]. *J Climate*, 2012, 25(21):7772-7779.
- [32] Hayasaki M, Kawamura R, Mori M, et al. Response of extratropical cyclone activity to the Kuroshio large meander in northern winter [J]. *Geophys Res Lett*, 2013, 40(11):2851-2855.
- [33] Wang Q, Mu M, Dijkstra H A. The similarity between optimal precursor and optimally growing initial error in prediction of Kuroshio large meander and its application to targeted observation [J]. *J Geophys Res: Oceans*, 2013, 118(2):869-884.
- [34] Nishikawa H, Yasuda I, Itoh S. Impact of winter-to-spring environmental variability along the Kuroshio jet on the recruitment of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) [J]. *Fish Oceanogr*, 2011, 20(6):570-582.
- [35] Taguchi B, Nakamura H, Nonaka M, et al. Influences of the Kuroshio/Oyashio extensions on air-sea heat exchanges and storm-track activity as revealed in regional atmospheric model simulations for the 2003/04 cold season [J]. *J Climate*, 2009, 22(24):6536-6560.
- [36] Kwon Y O, Alexander M A, Bond N A, et al. Role of the Gulf stream and Kuroshio-Oyashio systems in large-scale atmosphere-ocean interaction: A review [J]. *J Climate*, 2010, 23(12):3249-3281.
- [37] Qiu B, Chen S. Variability of the Kuroshio extension jet, recirculation gyre, and mesoscale eddies on decadal time scales [J]. *J Phys Oceanogr*, 2005, 35(11):2090-2103.
- [38] Taguchi B, Xie S-P, Schneider N, et al. Decadal variab-

- ility of the Kuroshio extension; Observations and an eddy-resolving model hindcast [J]. *J Climate*, 2007, 20(11): 2357-2377.
- [39] Ma X H, Jing Z, Chang P, et al. Western boundary currents regulated by interaction between ocean eddies and the atmosphere [J]. *Nature*, 2016, 535(7613): 533-537.
- [40] Masunaga R, Nakamura H, Miyasaka T, et al. Interannual modulations of oceanic imprints on the wintertime atmospheric boundary layer under the changing dynamical regimes of the Kuroshio extension [J]. *J Climate*, 2016, 29(9): 3273-3296.
- [41] O'Reilly C H, Czaja A. The response of the Pacific storm track and atmospheric circulation to Kuroshio extension variability [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2015, 141(686): 52-66.
- [42] Yao Y, Zhong Z, Yang X-Q. Numerical experiments of the storm track sensitivity to oceanic frontal strength within the Kuroshio/Oyashio extensions [J]. *J Geophys Res: Atmospheres*, 2016, 121(6): 2888-2900.
- [43] Pierini S. A Kuroshio extension system model study: Decadal chaotic self-sustained oscillations [J]. *J Phys Oceanogr*, 2006, 36(8): 1605-1625.
- [44] Nonaka M, Sasai Y, Sasaki H, et al. How potentially predictable are midlatitude ocean currents? [J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 20153.
- [45] Zhang X, Mu M, Wang Q, et al. Optimal precursors triggering the Kuroshio extension state transition obtained by the conditional nonlinear optimal perturbation approach [J]. *Adv Atmos Sci*, 2017, 34(6): 685-699.
- [46] Nitani H. Beginning of the Kuroshio [C] // Stommel H, Yoshida K. *Kuroshio, its physical aspects*. Tokyo: University of Tokyo Press, 1972: 129-163.
- [47] Sheremet V A, Kuehl J. Gap-leaping western boundary current in a circular tank model [J]. *J Phys Oceanogr*, 2007, 37(6): 1488-1495.
- [48] Sheu W-J, Wu C-R, Oey L-Y. Blocking and westward passage of eddies in the Luzon Strait [J]. *Deep-Sea Res Pt II*, 2010, 57(19/20): 1783-1791.
- [49] Rudnick D L, Jan S, Lee C M. A new look at circulation in the western North Pacific; Introduction to the special issue [J]. *Oceanography*, 2015, 28(4): 16-23.
- [50] Wu L, Cai W, Zhang L, et al. Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents [J]. *Nature Clim Change*, 2012, 2(3): 161-166.
- [51] Hu D, Wu L, Cai W, et al. Pacific western boundary currents and their roles in climate [J]. *Nature*, 2015, 522(7556): 299-308.
- [52] Qu T, Lukas R. The bifurcation of the north equatorial current in the Pacific [J]. *J Phys Oceanogr*, 2003, 33(1): 5-18.
- [53] Yaremchuk M, Qu T. Seasonal variability of the large-scale currents near the coast of the Philippines [J]. *J Phys Oceanogr*, 2004, 34(4): 844-855.
- [54] Zhang K, Wang Q, Mu M, et al. Effects of optimal initial errors on predicting the seasonal reduction of the upstream Kuroshio transport [J]. *Deep-Sea Res Pt I*, 2016, 116: 220-235.
- [55] Zhang K, Mu M, Wang Q. Identifying the sensitive area in adaptive observation for predicting the upstream Kuroshio transport variation in a 3-D ocean model [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2017, 60(5): 866-875.