

# 基于CNOP方法的台风目标观测研究进展

穆穆<sup>1</sup> 周非凡<sup>2</sup>

(1 中国科学院海洋研究所海洋环流与波动重点实验室, 青岛 266071;

2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029)

**摘要:** 简要但系统地介绍了条件非线性最优扰动 (CNOP) 方法在台风目标观测方面的研究进展。CNOP方法是线性奇异向量 (SV) 方法在非线性的一个拓展。在台风目标观测的研究中, 该方法主要用来识别对台风预报有重要影响的敏感区, 从而可以在这些敏感区内增加观测, 改进初始场以提高预报技巧。首先回顾了CNOP方法在台风目标观测中应用的理论基础, 接着阐述了CNOP识别的敏感区受模式分辨率、验证区域的设计、优化时长的选取等因素的影响, 并给出了利用观测系统模拟试验 (OSSE) 和观测系统试验 (OSE) 对CNOP识别的敏感区有效性检验的结果, 进一步评述了将CNOP方法应用于实际天气业务预报中进行敏感区识别的可能性, 最后对CNOP方法在台风目标观测中的深入应用进行了总结和讨论。

**关键词:** 条件非线性最优扰动, CNOP, 目标观测, 台风预报

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.03.001

## The Research Progress of the Typhoon Targeted Observations Based on CNOP Method

Mu Mu<sup>1</sup>, Zhou Feifan<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao

266071 2 Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

**Abstract:** This paper briefly yet systematically introduces the research progress of the application of conditional nonlinear optimal perturbation (CNOP) to typhoon targeted observations. The CNOP is an extension of the singular vector (SV) into the nonlinear region. It has been used to identify sensitive areas in typhoon targeted observations. Assimilation observations in this area are hoped to improve the typhoon forecast largely and this area is called sensitive area in this sense. The theoretic basis of the application of CNOP to typhoon observation is first reviewed. Then the impact of the model resolution, the verification area design and the optimization time period on the CNOP-identified sensitive areas are described. The effectiveness of the CNOP-identified sensitive areas is examined by observation system simulation experiments (OSSE) and observation system experiments (OSE). Finally, the prospect of the application of CNOP method to the operational targeted observations and its further application are discussed and summarized.

**Keywords:** conditional nonlinear optimal perturbation (CNOP), targeted observation, typhoon forecast

### 0 引言

目标观测, 又称为适应性观测, 是指为了使将来时刻 (验证时刻 $t_1$ ) 我们所关注的区域 (验证区) 内的预报更加准确, 要在将来时刻 (目标时刻 $t_2$ ,  $t_2 < t_1$ ) 对验证区域预报影响较大的区域 (敏感区) 进行额外的观测<sup>[1]</sup>, 获得更多的观测资料。这些额外的观测资料经过资料同化系统处理后, 为模式提供更接近真实的初始场, 以期得到更准确的预报。由此可见, 目标

观测的关键在于识别敏感区。

当前, 识别敏感区的方法有许多, 主要可以分为两大类: 一类是基于伴随的方法, 如伴随敏感性向量方法<sup>[2-3]</sup>、线性奇异向量 (SV) 方法<sup>[4]</sup>、伴随基于敏感性引导向量 (ADSSV) 方法<sup>[5]</sup>等; 另一类是基于集合的方法, 如集合转换 (ET) 方法<sup>[6]</sup>、集合卡尔曼滤波 (EnKF) 方法<sup>[7]</sup>、集合转换卡尔曼滤波 (ETKF) 方法<sup>[8]</sup>等。上述各种方法已经在一系列外场试验中得到应用, 如锋面和大西洋风暴追踪试验 (FASTEX)<sup>[1]</sup>、北太平洋试验 (NORPEX)<sup>[9]</sup>、冬季风暴观测试验 (WSR)<sup>[10]</sup>、热带气旋监视计划 (DOTSTAR)<sup>[11]</sup>、全球观测系统研究与可预报性试验 (THORPEX)<sup>[12]</sup>、

收稿日期: 2014年2月12日; 修回日期: 2014年7月29日

通信作者: 周非凡 (1982—), Email: zhouff04@163.com

资助信息: 国家自然科学基金项目 (41230420 和 41475100)

THORPEX亚太地区试验(T-PARC)<sup>[13]</sup>等。这些外场试验的结果表明,目标观测在一定程度上有效地提高了数值天气预报技巧<sup>[10-11, 14]</sup>。Bergot<sup>[15]</sup>指出,如果采用更加成熟的资料同化方案同化这些目标观测资料,那么目标观测的有效性将会大大地提高。但是,研究也表明,各种方法识别的敏感区有时存在较大的差异,而在不同试验中,同一方法既有可能改善预报效果,也可能对预报效果提高没有帮助<sup>[4, 16]</sup>。事实上,评判目标观测方法的优缺点是一件非常复杂的事情,不论是哪一种目标观测方法,只能从统计的角度使用统计信息,评判其效果<sup>[17]</sup>。

考虑到SV方法的有效性取决于线性近似的有效性,为了克服线性近似假设的不足,Mu等<sup>[18]</sup>提出了条件非线性最优扰动(CNOP)方法。CNOP作为SV在非线性的一个自然推广,避免了线性近似假设的不足。该方法已被用于厄尔尼诺的可预报性与海洋热盐环流的敏感性分析<sup>[19-20]</sup>、双旋海洋环流和斜压不稳定流的非线性行为的研究<sup>[21-22]</sup>等领域。近几年,CNOP方法也被用于台风目标观测的研究,进行敏感区的识别,并取得了一系列有意义的成果<sup>[23-28]</sup>。本文将简要但系统地介绍CNOP方法在台风目标观测方面的研究进展。

## 1 CNOP方法及其在目标观测中应用的理论基础

### 1.1 CNOP方法简介

初始扰动 $\delta X_0^*$ 称为条件非线性最优扰动(CNOP)<sup>[18]</sup>,当且仅当

$$J(\delta X_0^*) = \max_{\delta X_0^T C_1 \delta X_0 \leq \beta} J(\delta X_0) \quad (1)$$

式中,

$$J(\delta X_0) = [M_t(X_0 + \delta X_0) - M_t(X_0)]^T \times C_2 [M_t(X_0 + \delta X_0) - M_t(X_0)] \quad (2)$$

$X_0$ 为状态向量 $X$ 的初始状态向量, $M_t$ 是从0时刻到 $t$ 时刻的非线性传播算子,不等式 $\delta X_0^T C_1 \delta X_0 \leq \beta$ 为约束条件。 $\beta$ 为正的常数。上标“T”表示转置。正定矩阵 $C_1$ 和 $C_2$ 分别表示对初始扰动 $\delta X_0$ 及其非线性发展的度量,二者可以相同,也可以不同,主要根据所考虑的物理问题而定。从CNOP的定义可知,在所有满足 $\delta X_0^T C_1 \delta X_0 \leq \beta$ 的扰动中CNOP的非线性发展最大。

式(2)的线性近似可以表示为

$$J(\delta X_0) = [L_t(\delta X_0)]^T C_2 [L_t(\delta X_0)] \quad (3)$$

式中, $L_t$ 是从0时刻到 $t$ 时刻的线性传播算子。在式(3)的目标函数的表示下,求解极大值问题(式(1))即为求解第一奇异向量(FSV)<sup>[29]</sup>。可见,CNOP事

实上是FSV在非线性领域的拓展。

### 1.2 目标观测的理论基础

Mu<sup>[17]</sup>指出,在目标观测的研究与具体应用中,隐含着—个朴素的假定:在自然界,空间分布上呈现随机状态的误差,一般要比呈现某种特定空间结构的误差发展的要慢。更准确地说,对于特定的每一个天气或气候事件,存在某种特定空间结构的误差,在某个特定的空间区域,它的发展要比其他类型误差(特别是随机误差)发展的要快。Chen等<sup>[30]</sup>基于两个台风个例(2005年台风“龙王”和2008年台风“森拉克”),设计并执行了一系列敏感性试验,研究了具有相同大小但结构不同的初始误差在不同区域的发展情况。具体地,该文选取了四种不同类型的初始误差(CNOP,合成奇异向量CSV,FSV,随机误差)和四种不同类型的区域(根据CNOP、CSV、FSV所确定的敏感区和随机选择的区域),研究误差所在区域和误差的结构这两种因素在误差发展中的作用。

试验结果表明:(1)初始误差所在区域对误差的发展有重要的影响,在由客观数学方法所确定的敏感区上的初始误差的发展一般要比随机选择的区域上的初始误差的发展大,而在CNOP所确定的敏感区内的初始误差的发展最大(表1);(2)在同一个区域中,具有特定空间结构的初始误差(如CNOP、CSV、FSV)的发展一般要大于随机误差的发展,其中,CNOP型结构的初始误差的发展最大(表2);

表1 40个区域每个区域内40个随机误差的非线性发展的统计平均(用验证区域内预报误差的干能量进行衡量,单位:J/kg)(引自文献[30])

(a) 台风“龙王”

$i$	$j$				
	1	2	3	4	5
1	4.05	7.32	10.70	12.39	12.27
2	3.37	6.24	9.94	12.29	13.22***
3	2.83	8.44	14.64	15.10	12.95
4	4.27	27.07	57.20**	29.59	14.86
5	6.19	52.28	92.43*	51.00	15.95
6	4.33	27.51	67.18	42.77	14.31
7	2.38	8.24	13.51	11.52	8.46
8	1.48	3.17	5.28	6.01	6.53

(b) 台风“森拉克”

$i$	$j$							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	12.19	20.65	27.80	43.48	28.64	34.45	64.10	43.55
2	21.89	36.50	49.13**	51.02	92.31	66.53	97.53	36.52
3	29.54	40.99	57.98	44.53	129.94	165.45	72.59	26.95
4	22.45	29.25	50.81	74.48	156.69	276.13*	50.16	18.80
5	28.92	33.34	40.31	81.45	116.04	100.57	27.83	9.44

注:\*表示CNOP识别的敏感区,\*\*表示CSV识别的敏感区,\*\*\*表示FSV识别的敏感区。 $i$ 表示纬向方向, $j$ 表示经向方向。

表2 CNOP、CSV、FSV以及随机误差叠加在40个区域的初始场上后的非线性发展的统计平均（用验证区域内预报误差的干能量进行衡量，单位：J/kg）（引自文献[30]）

干能量（验证区域）	CNOP-type	CSV-type	FSV-type	Ran_Err
台风“龙王”	17.98	11.97	7.23	5.85
台风“森拉克”	60.27	14.92	16.23	17.22

(3) 综合比较发现CNOP所识别的敏感区内CNOP类型初始误差对预报结果的影响最大。上述结果说明CNOP方法在台风目标观测中具有重要的应用价值。

### 1.3 应用 CNOP 确定台风目标观测的敏感区

将CNOP方法用于目标观测时，我们将CNOP看成是一种类型的初始误差，该初始误差的非线性发展最大。通过消除CNOP类型的初始误差进而提高预报技巧。在目标观测中，我们所关心的只是某一小部分地区（即验证区域）的预报技巧，这等同于在目标函数式(2)中加入一个投影算子 $P$ ，该算子在验证区域内取值为1，其他区域取值为0，这就使得问题转化为只考虑验证区域的预报误差问题。此时，式(2)可写为

$$J(\delta X_0) = [PM_t(X_0 + \delta X_0) - PM_t(X_0)]^T \times C_2 [PM_t(X_0 + \delta X_0) - PM_t(X_0)] \quad (4)$$

将目标观测思想与台风预报结合起来，那么就要求验证区域要尽可能包括台风在所关心时刻可能到达的区域，这样，如果提高了该区域的预报技巧，也就提高了该台风在所关心时刻的预报技巧。在求得CNOP后，为提高预报技巧，要消除CNOP类型的初始误差。Mu等[23]的研究表明，对CNOP型初始误差消除的程度越大，对预报效果的改善程度越明显（表3）。根据这一思路，敏感区定义在尽可能最大程度地消除CNOP类型初始误差的地方。周菲凡等[31]研究了如何用CNOP方法确定敏感区，提出了三种确定敏感区的方案：水平投影方案、单点能量投影方案以及垂直积分能量方案。通过比较这三种方案在六个台风个例中确定的敏感区的差异，分析它们所阐释的物理意义的异同以及它们的优缺点，并通过理想回报试验检验不同方案确定的敏感区的有效性，最后，给出在台风目标观测研究中，利用CNOP方法确定敏感区时，垂直积分能量方案是较佳的方案。垂直积分能量方案的定义：首先计算CNOP在空间每一格点的能量，然后做

表3 减小不同程度的CNOP、FSV型误差带来的预报技巧的改善程度（引自文献[23]）

误差减小的程度	台风“麦莎”		台风“米雷”		台风“蒲公英”	
	CNOP	FSV	CNOP	FSV	CNOP	FSV
0.75	86.4%	46.5%	94.8%	92.1%	84.8%	25.1%
0.50	69.9%	26.3%	75.0%	67.3%	53.8%	7.5%
0.25	49.4%	15.3%	42.0%	35.7%	24.1%	-5.3%

垂直积分，从而得到水平面上每一格点所在垂直气层的总能量，将水平面上总能量分布的大值区作为敏感区。本文往后所有CNOP敏感区都是根据此种定义方式。SV的敏感区定义方式类似。

## 2 CNOP识别的敏感区对各种条件的敏感性分析

从CNOP方法的介绍及其在目标观测中应用的理论基础可以看出，CNOP及其所识别的敏感区主要受以下几种条件影响：约束值 $\beta$ ，度量范数 $C_1$ 和 $C_2$ ，基态初始值 $X_0$ ，非线性传播算子 $M_t$ ，投影算子 $P$ 以及积分时间长度 $t$ 等。Zhou等[27-28]分别对水平分辨率（与非线性传播算子 $M_t$ 有关）、验证区域设计（与投影算子 $P$ 有关）、优化时长的选取（与积分时间长度 $t$ 有关）这几种条件进行了分析，研究了它们对台风目标观测敏感区识别的影响，下面简单地介绍他们的研究成果。

### 2.1 水平分辨率的影响

Zhou等[27]考查了三个台风个例（2005年“麦莎”、2004年“米雷”和“蒲公英”）不同的水平分辨率（30km、60km和120km）对CNOP及其识别的敏感区的影响。结果表明，CNOP的尺度随分辨率的提高而减小，即CNOP的大值区随分辨率的提高而越来越集中（图1）。且在高分辨率下，CNOP的螺旋结构及斜压结构更为明显，这种结构是其所能够快速发展的原因之一。不同的分辨率下，CNOP识别的敏感区具有相似性，相似程度因个例而异（图2）。总的来说，高分辨率下识别的敏感区对预报技巧的提高较较低分辨率下识别的敏感区对预报技巧的提高来得多。但是对于一些个例，最大的预报技巧的提高并不是在最高的分辨率下获得（表4）。这可能是因为这些个例非线性信息能够在较低分辨率下体现出来，因此进一步增加分辨率对数值预报技巧的提高帮助不大。此外，低分辨率下识别的敏感区也有助于高分辨率下预报技巧的提高（表5），不过一般来讲，某一分辨率下识别的敏感区对该分辨率下的预报技巧的提高帮助最大。

表4 不同分辨率下各台风识别的敏感区对预报技巧的改善程度（引自文献[27]）

	30 km	60 km	120 km
台风“麦莎”	16.2%	24.4%	12.0%
台风“米雷”	41.1%	16.2%	13.5%
台风“蒲公英”	15.8%	13.1%	10.5%

### 2.2 优化时长的影响

Zhou等[28]以2004年台风“米雷”和2005年台风“麦莎”为例，研究了在非线性和较强的情况下

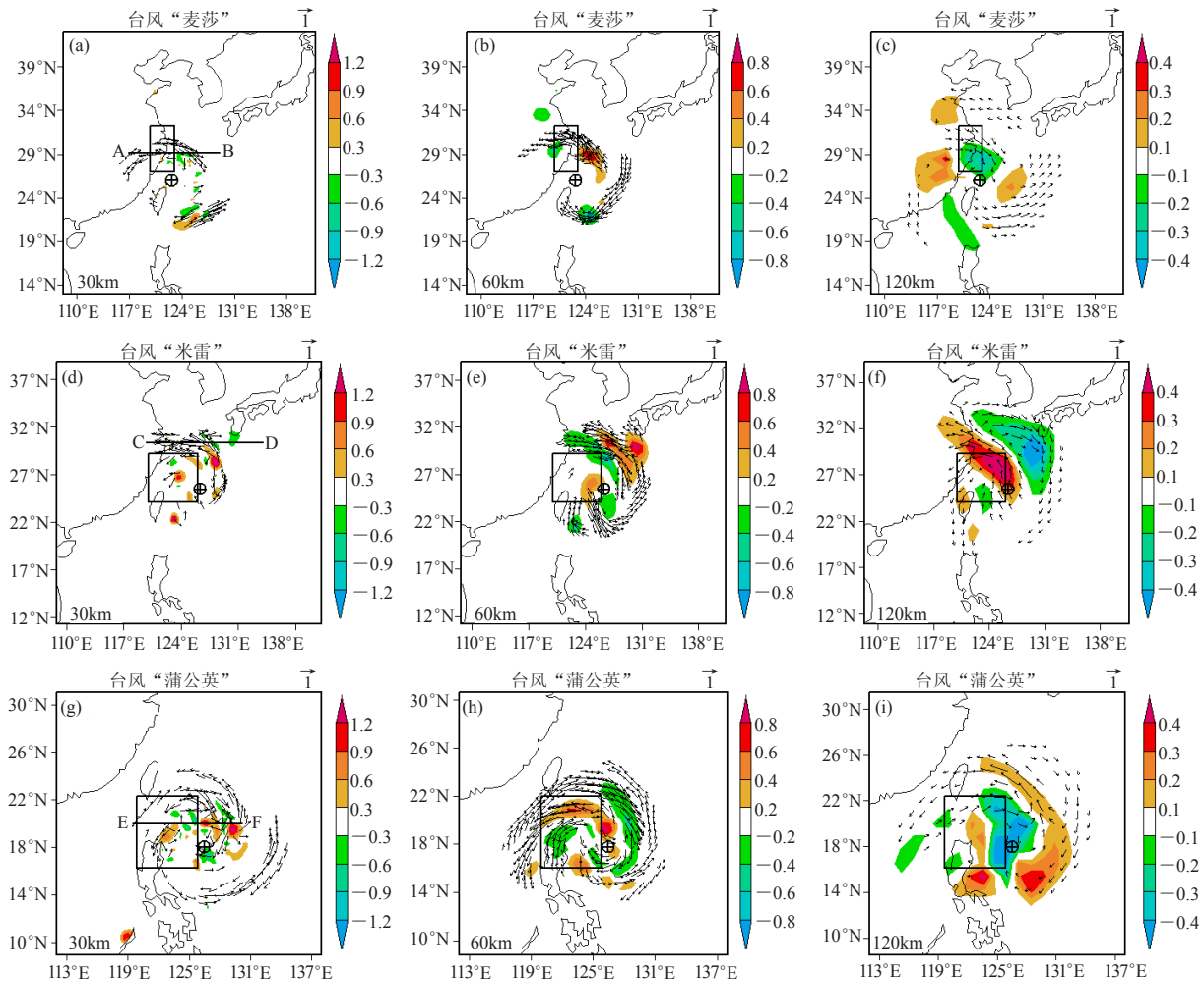


图1 不同分辨率下计算得到的台风“麦莎”（2005年8月5日00时—6日00时），“米雷”（2004年9月26日00时—27日00时）和“蒲公英”（2004年6月28日00时—29日00时）的CNOP的温度分量（彩色填充，单位：K）和风场分量（矢量箭头，单位：m/s）在 $\sigma=0.7$ 层上的分布（图中矩形区域表示验证区域，符号 $\oplus$ 表示目标观测时刻台风所处位置）（引自文献[27]）

台风预报的初值敏感区随时间变化的特点。首先，通过比较CNOP和FSV的相似程度，确定非线性的强弱（定义CNOP和FSV的相似系数大于0.5时为非线性较弱的情况，而当二者的相似系数小于0.5时为非线性较强的情况）。据此，“麦莎”被定义为非线性较强的个例（相似系数只有0.2），而“米雷”被定义为非线性较弱的个例（相似系数达0.7）。接着，分为如下两个问题进行研究：（1）预报时刻固定，敏感区随初始时刻（目标观测时刻）的变化有何变化？（2）目标观测时刻固定，敏感区随预报时刻的变化有何变化？

结果表明，对于非线性较弱的个例（“米雷”），当预报时刻固定时，随着目标观测时刻向预报时刻靠拢，敏感区逐渐向预报时刻台风所处位置靠拢（图3a—3c）；而对于非线性较强的个例（“麦莎”），当预报时刻固定时，敏感区总是围绕在目标观测时刻的台风的周围（图4a—4c）。对于这两种个例，当预报时刻固定时，敏感区的位置与目标观测的时刻紧密相关。当目标观测时刻固定时，对于非线性较弱的个例，不同预报时刻得到的敏感区具有较大的相似性（图3d—3f），也即在线性较弱的个例中，目标观测的实施对未来多个时刻的预报技巧都有较大

表5 低分辨率下识别的敏感区对高分辨率的预报技巧的改善程度（引自文献[27]）

	30 km (使用60km下识别的敏感区)	60 km (使用120km下识别的敏感区)
台风“麦莎”	4.6%	15.9%
台风“米雷”	5.0%	8.2%
台风“蒲公英”	2.4%	11.3%

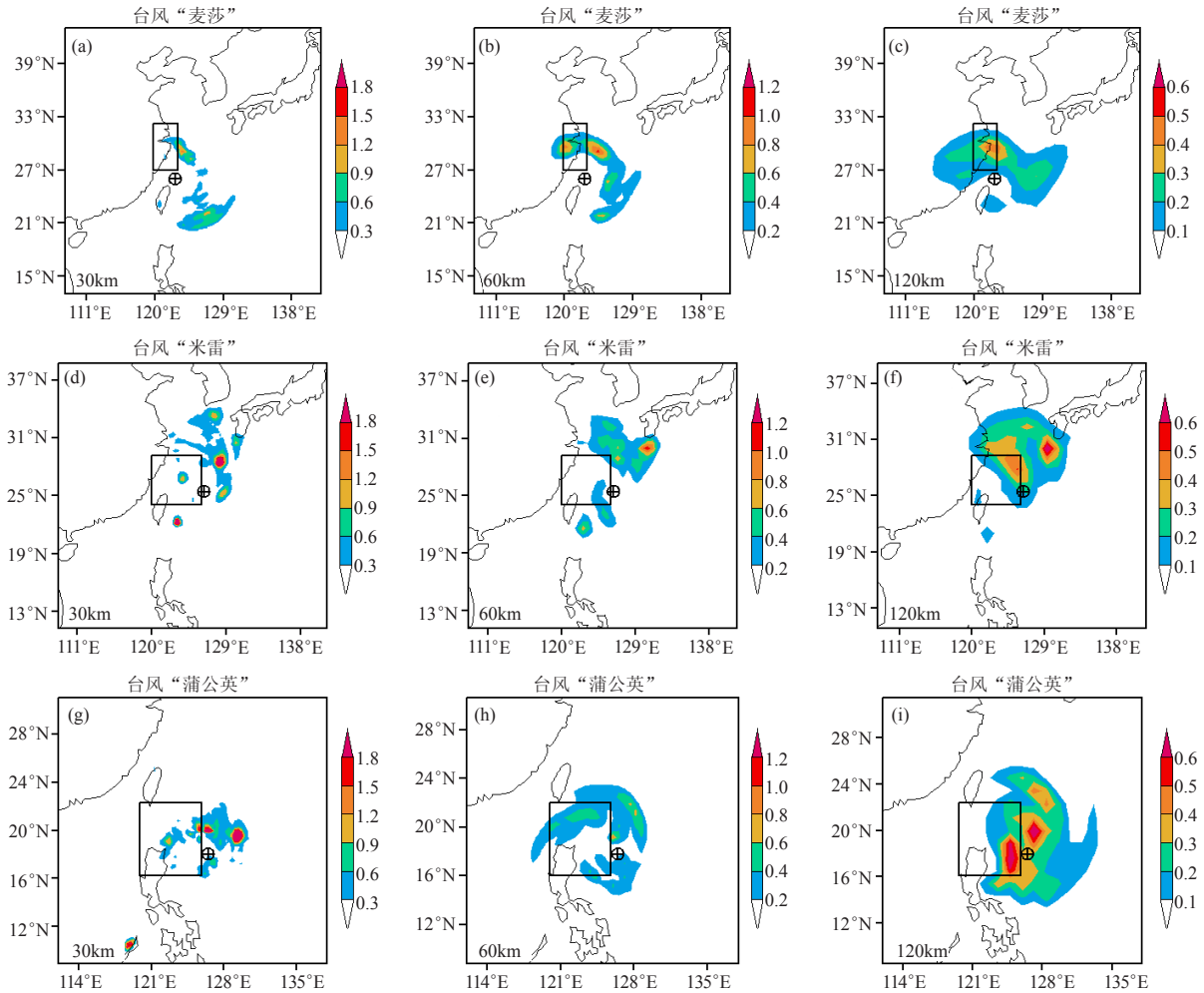


图2 同图1, 但为CNOP的垂直积分能量的大值区 (彩色填充即敏感区, 单位: J/kg) 的分布 (引自文献[27])

程度的改善; 而对于非线性较强的个案, 敏感区随预报时刻的变化有较大的变化 (图4d—4f), 说明对不同的预报时刻, 为取得较好的预报效果, 目标观测区也需进行相应的调整。

### 2.3 验证区域选取的影响

在台风目标观测中, 验证区域的设计是另一个关键的问题, 如何进行验证区域设计? 验证区域设计的不确定性对台风目标观测有何影响? 针对这些问题, Zhou等<sup>[26]</sup>针对2004年台风“云娜”设计了九种具有代表性的验证区域, 考查了不同的设计对CNOP和FSV识别的敏感区的影响。结果表明, 验证区域小幅度的变化对CNOP所识别的敏感区影响较小 (图5a—5c), 但是当验证区域大幅度变化时, CNOP所识别的敏感区变化也较大 (图6a—6c); 但对于FSV识别的敏感区, 不论验证区域大幅度还是小幅度变化, 其识别的敏感区变化都较大 (图5d—5f, 图6d—6f)。理想回报试验表明, 为更好地提高台风的

预报技巧, 验证区域设计时应当参考集合预报的结果, 使其尽可能地包含未来台风能够移动到的地方, 但不能太大, 否则容易将噪音囊括进来, 从而使得识别的敏感区对台风预报技巧的提高帮助较小。

总之, 上述敏感性试验结果表明, CNOP识别的敏感区在一定范围内具有“稳定性”, 而这种稳定性是大气非线性发展运动的一种反映, 有利于目标观测外场试验的实施。

## 3 CNOP识别的敏感区的有效性

### 3.1 观测系统模拟试验 (OSSE)

OSSE方法是目前用于评价目标观测方法效果的主要方法之一。OSSE将目标观测方法, 特别是敏感区的确定问题独立出来, 没有考虑诸如模式误差对试验效果的影响, 使得试验结果能够直接反映目标观测方法特别是敏感区的作用<sup>[17]</sup>。Qin<sup>[32]</sup>采用OSSE检验了CNOP识别的敏感区对预报误差的减小的有效性, 结果表明, 在CNOP识别的敏感区内同化模拟观测资料

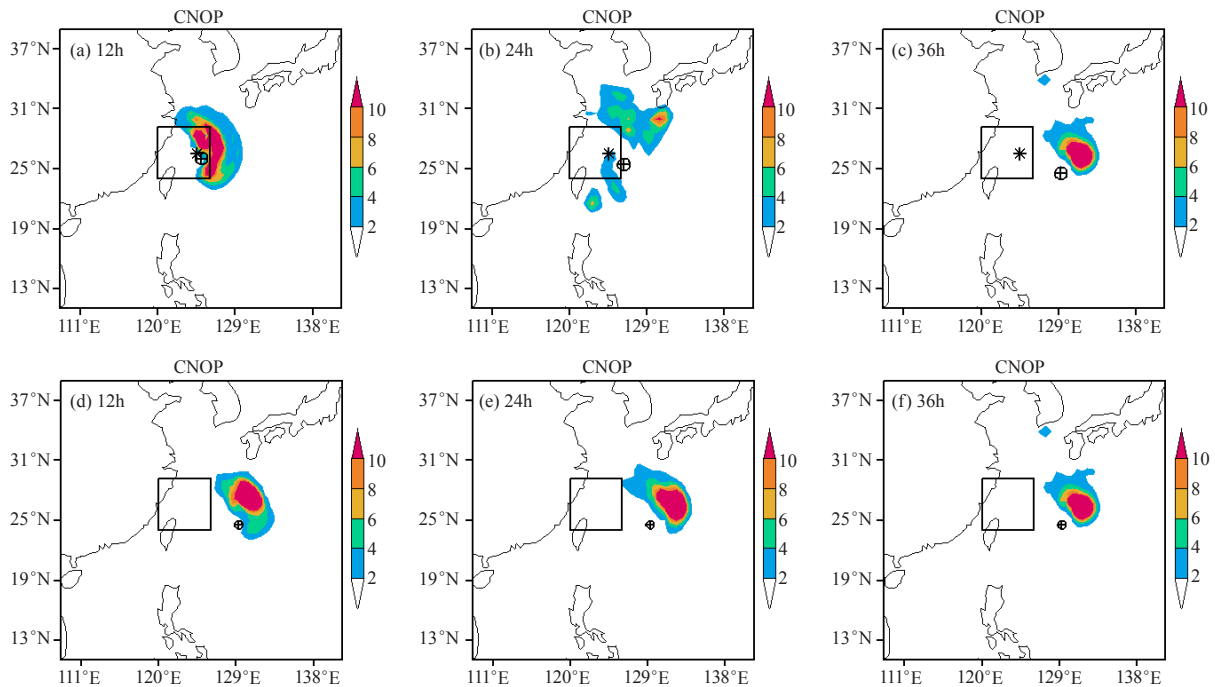


图3 台风“米雷”个例，(a-c)：预报时刻为2004年9月27日00时(世界时)，初始时刻分别为(a)  $t_t-12h$ ，(b)  $t_t-24h$ ，(c)  $t_t-36h$ ；(d-f)：初始时刻为2004年9月25日12时(世界时)，预报时刻分别是(d)  $t_0+12h$ ，(e)  $t_0+24h$ ，(f)  $t_0+36h$  (阴影区表示敏感区，矩形区域为验证区域， $\oplus$ 表示 $t_0$ 时刻台风所处位置，\*表示预报时刻台风所处的位置) (引自文献[28])

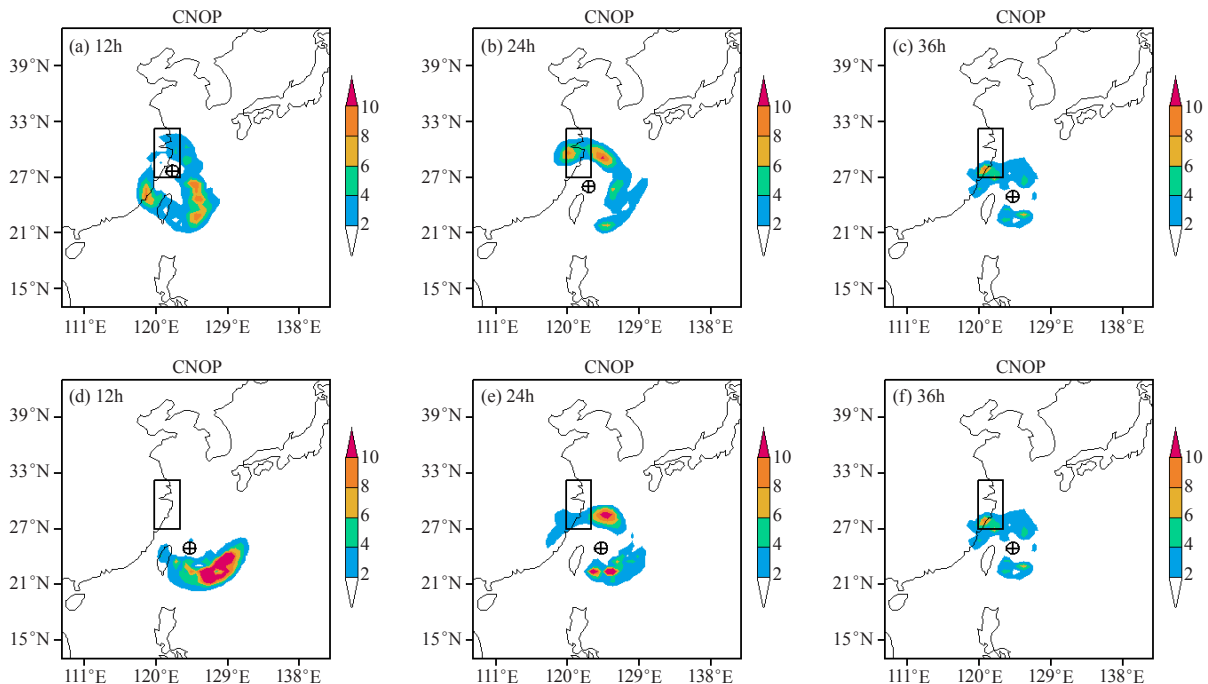


图4 同图3，但为台风“麦莎”个例，(a-c)：预报时刻为2005年8月6日00时(世界时)；(d-f)：初始时刻为2005年8月4日12时(世界时) (引自文献[28])

比在随机选择的区域内同化模拟观测资料对各物理量预报技巧的提高要大(表6)。进一步，Qin等<sup>[24]</sup>用OSSE试验比较了在CNOP和SV方法识别的敏感区内

同化模拟观测资料对台风路径预报的影响，结果表明，2009年西北太平洋七个台风个例中有六个个例的路径预报得到了改善(图7)。在CNOP敏感区内进行

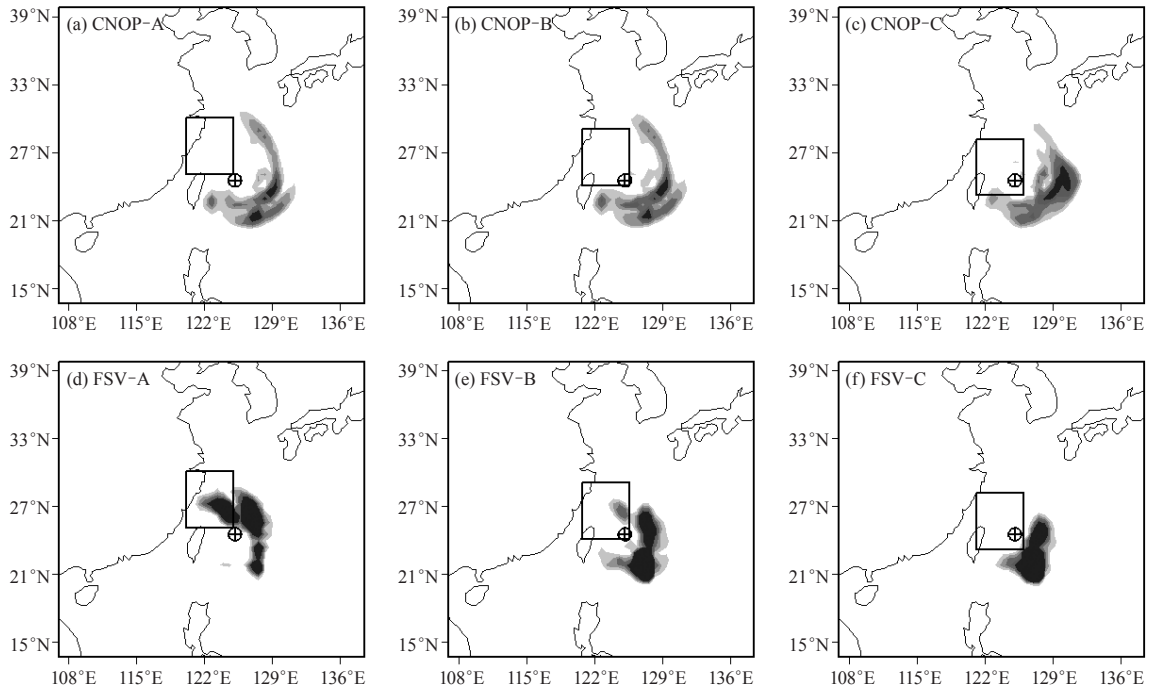


图5 台风“云娜”个例，验证区域小幅度变化下CNOP和FSV识别的敏感区（阴影）的分布（矩形区域为验证区域，⊕表示目标观测时刻台风所处位置）（引自文献[26]）

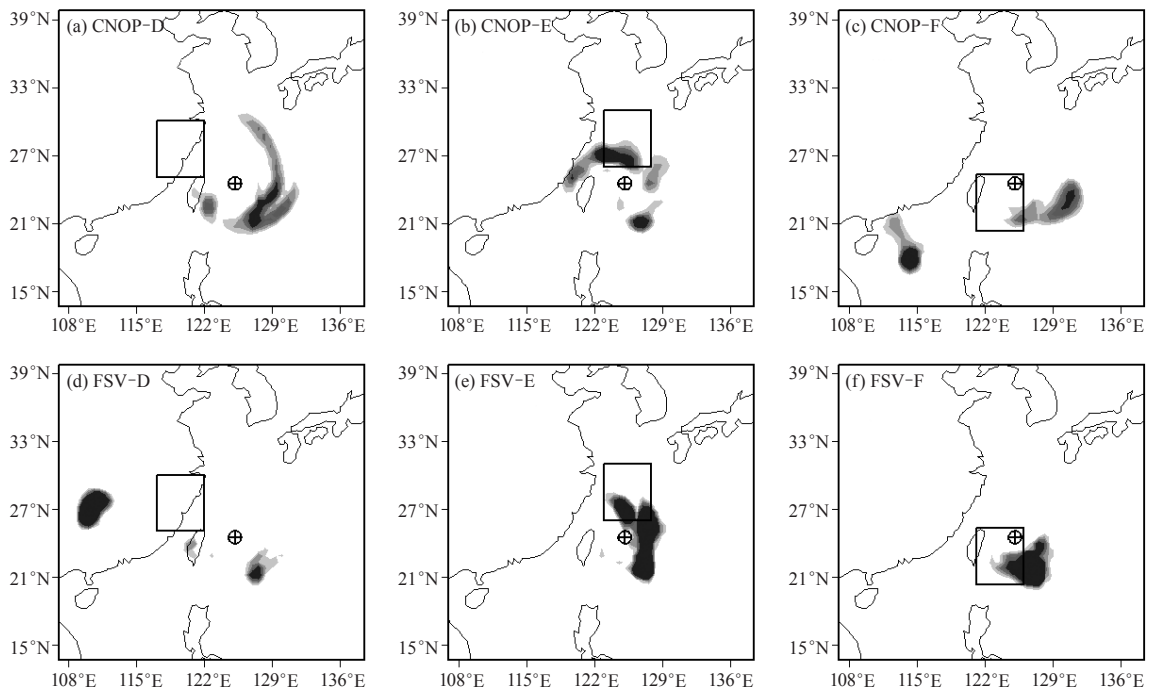


图6 同图5，但为验证区域大幅度变化下的情况（引自文献[26]）

目标观测，路径预报改善程度为13%~46%，路径预报误差平均减少50km左右；在SV敏感区内进行目标观测，改善程度为14%~23%；上述改善不仅出现在优化时间段内（24~48h），甚至延续到72h。这说明

CNOP方法可以有效地改进台风路径的预报技巧。同时，Qin等<sup>[25]</sup>还针对三个台风个例，通过OSSE考察了CNOP、FSV和ETKF三种目标观测系统的效果。结果表明，由CNOP和ETKF方法得到的信号方差大小相

表6 同化CNOP敏感区和随机区域1~4内的模拟观测资料后对各物理量预报的影响, 负值表示预报误差减小, 预报技巧提高(引自文献[32])

	U	V	T	PP	QV	W	TPE
CNOP	-2.58%	-9.86%	-4.01%	0.62%	0.06%	-3.60%	-12.74%
random1	-2.16%	-0.96%	-1.63%	-0.10%	-2.41%	-5.23%	-0.90%
random2	-0.28%	-1.57%	0.87%	-4.78%	0.00%	1.18%	-1.56%
random3	1.60%	3.93%	-0.54%	-5.27%	0.56%	-0.59%	5.74%
random4	-1.03%	1.85%	2.62%	-4.02%	0.35%	3.43%	2.86%

似, 大于FSV方法得到的信号方差, 说明前两者对台风预报误差方差的减小要大于后者。

### 3.2 观测系统试验 (OSE)

OSE方法是目前另一种用于评价目标观测方法效果的主要方法。相比OSSE, OSE采用了真实的观测资料, 因此它反映的是实际开展的外场观测试验的效果。Chen等<sup>[33-34]</sup>采用OSE考查了CNOP识别的敏感区的有效性。在他们的工作中, 观测资料采用台湾DOTSTAR外场观测资料。DOTSTAR一般绕台风做下投探空观测(图8), 用CNOP方法求取2004—2009年共20个DOTSTAR台风个例的敏感区, 结果表明, 对每个台风, 至少有3个探空落在CNOP方法所识别的敏

感区内(图8)。进一步, 用三维变分方法同化全部探空观测和同化部分探空资料, 结果表明, 总体而言, 同化探空观测资料可以提高台风的路径预报(图9)。只同化CNOP敏感区内的3~4个观测资料, 与同化所有观测资料(15个左右)对台风路径预报的改善程度相似; 在有些个例中要好于后者; 两者的结果都要好于同化SV敏感区内的3~4个观测资料的效果; 同化随机区域的效果次之。上述四种试验(同化CNOP敏感区内的观测资料、同化所有观测资料、同化SV敏感区内的观测资料、同化随机区域内的观测资料)中24h路径预报误差减小达到或超过10%的个例分别为10、6、5、4个; 而36h的为4、5、4、3个。这说明, 在统计意义上, CNOP方法确定的敏感区有效改善了台风路径预报。同时, 他们的结果还表明, 由MM5模式确定的敏感区在WRF模式中也能有效地减小预报误差。

OSSE和OSE的结果都说明在CNOP确定的敏感区内进行目标观测, 确实能够有效减小台风预报误差, 且CNOP方法比SV方法更能抓住台风预报中初始误差的敏感区域, 具有相对较弱的模式依赖性, 进一步验证了CNOP确定的敏感区在改进台风预报技巧中的有效性。

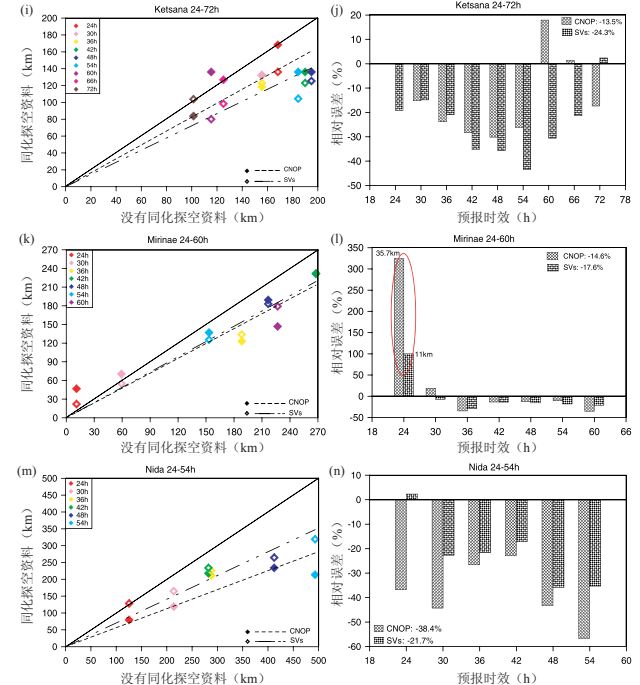
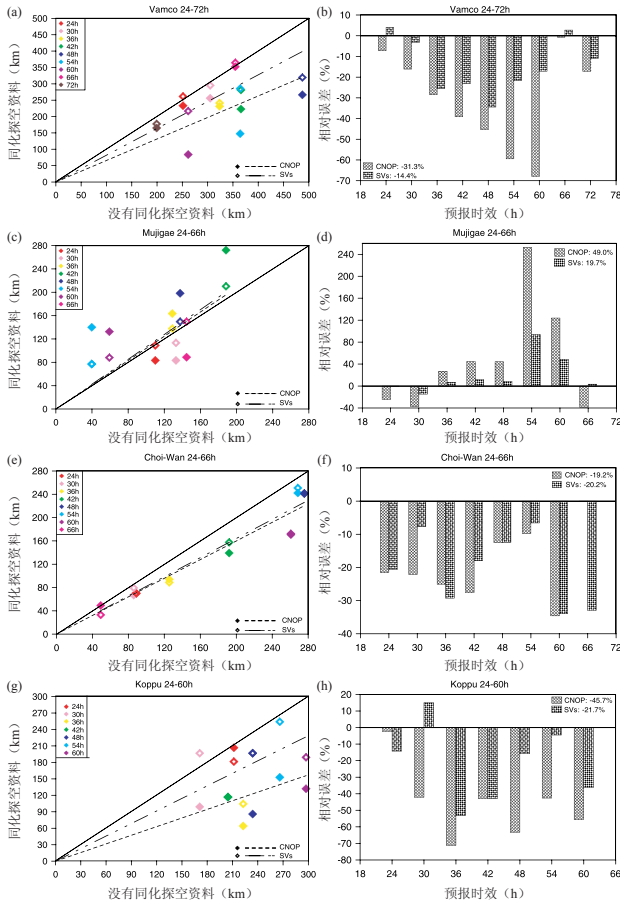


图7 (a, c, e, g, i, k, m) 台风路径预报误差的散点图; (b, d, f, h, j, l, n) 采用探空仪资料与没有采用探空仪资料的相对误差, 负值表示预报有改善(引自文献[24])

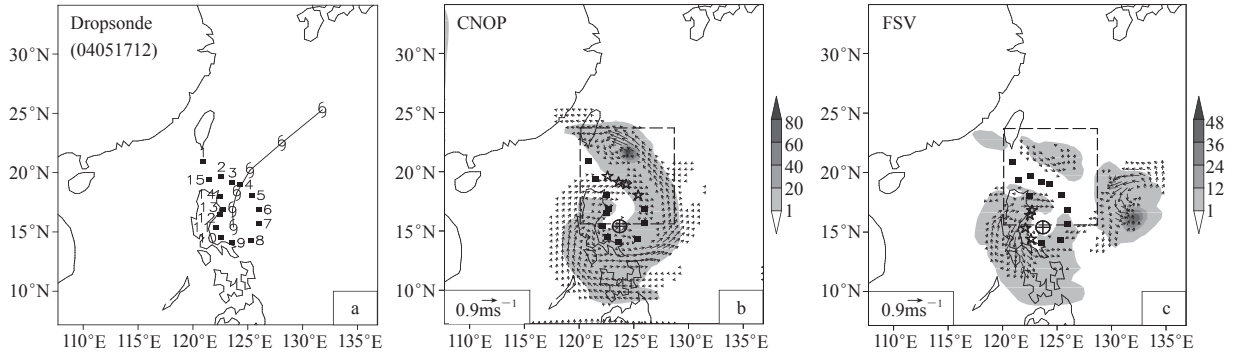


图8 台风”妮达”个例：(a) DOTSTAR中探空仪的投放顺序及位置(黑色小方框)以及台风的移动路径；(b) CNOP识别的敏感区(阴影区)以及用于同化的探空资料(空心五角星)；(c) FSV识别的敏感区(阴影区)以及用于同化的探空资料(空心五角星)(引自文献[34])

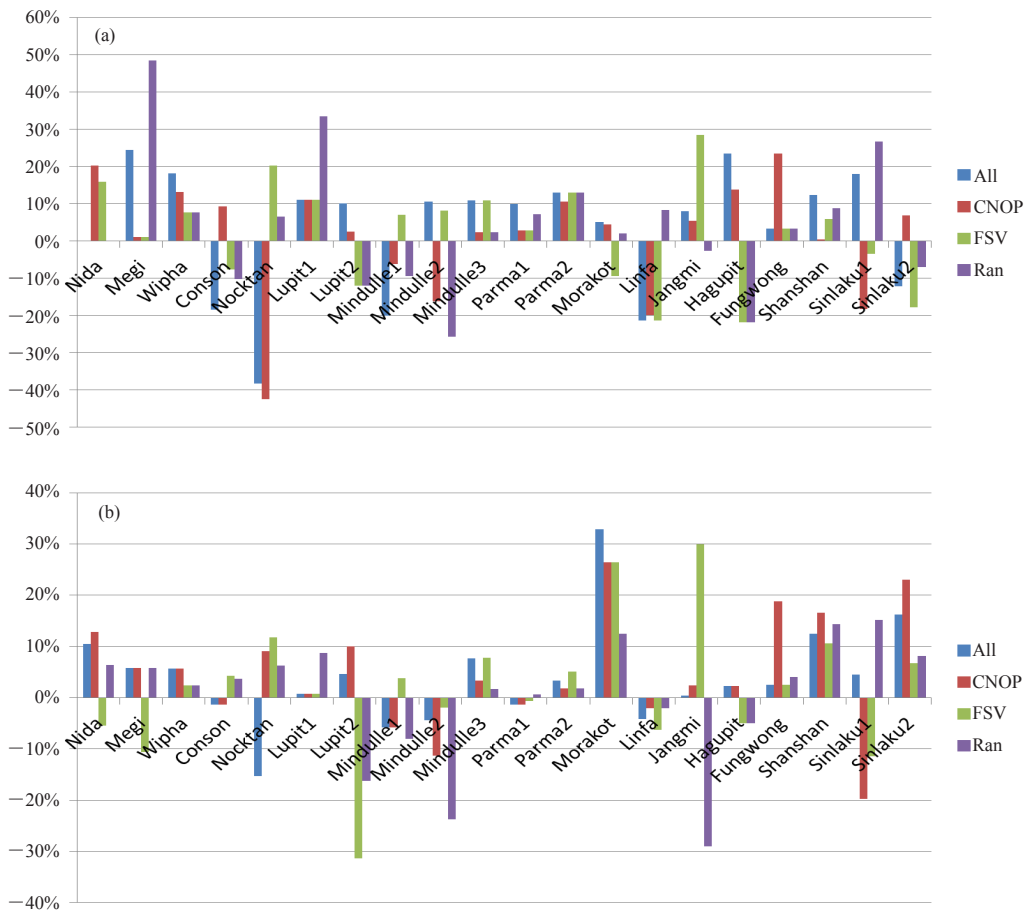


图9 同化所有观测资料(蓝色)、同化CNOP敏感区内的观测资料(红色)、同化FSV敏感区内的观测资料(绿色)、同化随机区域内的观测资料(紫色)对24h(a)、36h(b)的路径预报的影响(正值表示改善,负值表示变差)(引自文献[34])

## 4 CNOP方法于业务应用的前景

### 4.1 CNOP 识别的敏感区的应用条件

之前的研究表明,统计上讲,在CNOP确定的敏感区内同化观测资料可以改进台风预报技巧,然而也存在同化资料后预报技巧改善不大甚至使得预报

技巧下降的情况。为此, Qin等<sup>[35]</sup>分析了在什么情况下CNOP识别的敏感区比较有效, 2010年20个台风个例的OSSE结果表明, 有13个个例在CNOP识别的敏感区内同化目标观测资料可以较大改善台风路径预报, 而有7个个例没有明显改善(图10)。对改善的个例

进行分析,发现它们满足如下的特征:(1)未进行目标观测时有较大的路径预报误差;(2)预报误差对初始误差有适当的敏感性;(3)整个研究区域内有相当一部分的预报误差落入验证区域内;(4)台风系统为验证区域内的主要天气系统。上述特征为是否在CNOP识别的敏感区内进行目标观测提供了前期条件。

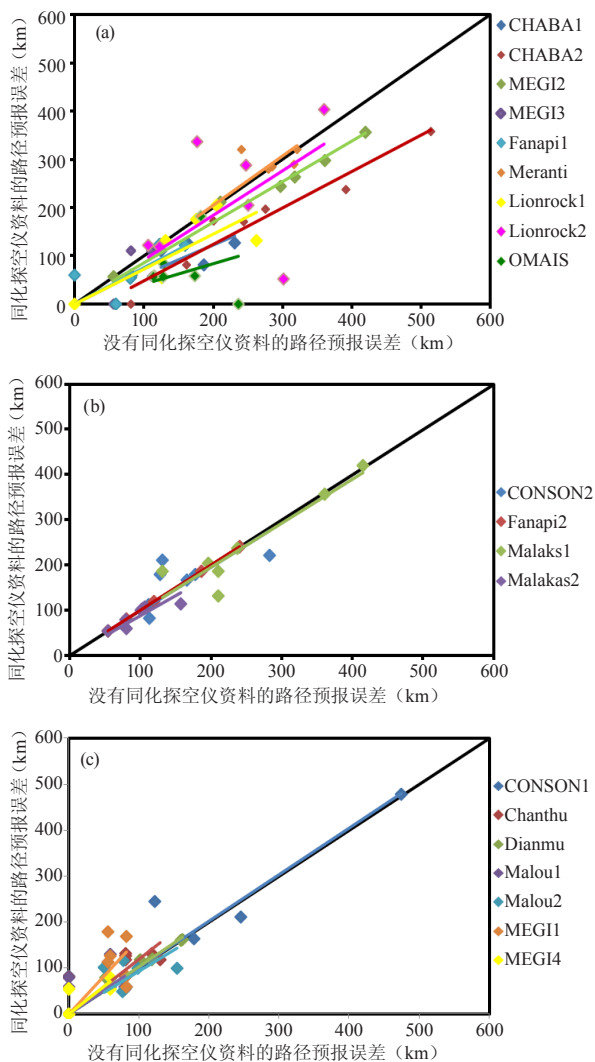


图10 台风路径预报误差的散点图:(a)同化后改善较大(10%)的个例;(b)同化后改善较小或没有改善的个例;(c)同化后预报变差的个例(Y轴表示同化探空仪资料的路径预报误差,X轴表示没有同化探空仪资料的路径预报误差)(引自文献[35])

## 4.2 CNOP方法在先进模式系统WRF上的实现

Wang等<sup>[36]</sup>在中尺度模式WRF上实现了CNOP的求解,并以3Dvar资料同化系统估计的背景误差协方差作为初始误差的约束条件求解了两个台风个例的CNOP和FSV。比较了求得的CNOP和FSV的区别及其导致的预报误差的演变情况,结果表明,CNOP可以

导致更大的路径预报偏差(图11)。由于WRF是发展较为先进的中尺度系统,其目前已经在许多气象预报中心用于业务预报,因此将CNOP方法在该模式系统上实现,是CNOP识别的敏感区可以被业务应用的一大前提。同时,以背景误差协方差作为初始误差的约束条件也是CNOP方法的一个重要改进。

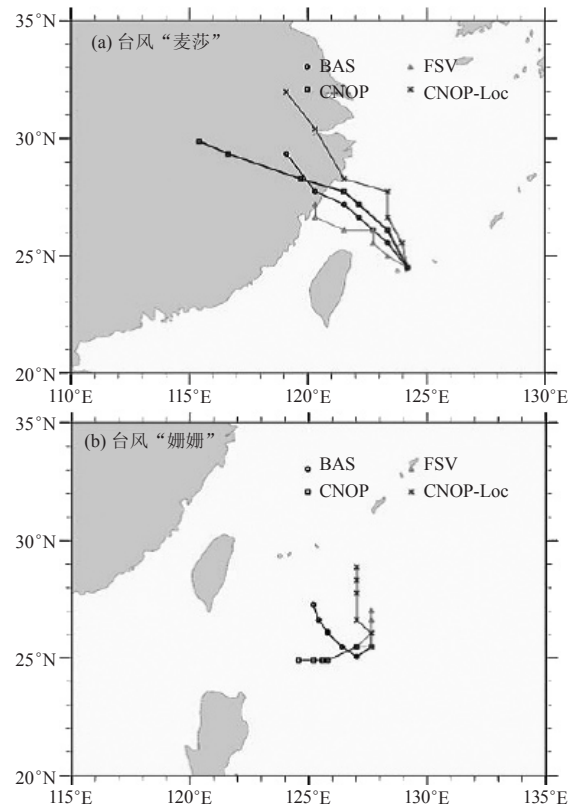


图11 模拟的台风路径和叠加了CNOP、FSV和局部CNOP类型初始误差后导致的台风路径(引自文献[36])

## 4.3 不需伴随的CNOP的求解

CNOP的求解属于带有等式和不等式约束条件的非线性优化问题,当前,该类问题主要通过SQP和SPG2算法求得。而优化算法SQP和SPG2要求提供目标函数关于初始扰动的梯度,通常伴随方法是数值计算中求取梯度的一个有效的方法。采用伴随方法就要求非线性数值模式有相应的伴随模式,然而发展伴随模式是一项相当复杂而又困难的工程,当前大气科学研究中许多复杂模式并未具有相应的完善的伴随模式,这就限制了CNOP方法的进一步应用。因此,研发不需伴随的求解CNOP的方法是非常重要的,Wang等<sup>[37]</sup>用集合的方法,研发了一种不需伴随的求解CNOP的方法,并将该方法用到GRAPES模式上,求解台风目标观测的敏感区。并用OSSE试验检验了CNOP识别的敏感区的有效性,结果表明,在CNOP识

别的敏感区内同化观测资料可以减小台风系统的24小时累积降水预报误差<sup>[38-39]</sup>。

上述这些研究为CNOP识别的敏感区可以应用于业务奠定了基础。

## 5 总结和讨论

本文简要地但系统地回顾了CNOP方法在台风目标观测中的研究进展。首先对CNOP方法和目标观测的理论基础进行了简单的回顾，在此基础上介绍了如何应用CNOP方法确定台风目标观测的敏感区；接着介绍了CNOP识别的敏感区对模式分辨率、验证区域和优化时长的选取的敏感性，并且介绍了利用观测系统模拟试验（OSSE）和观测系统试验（OSE）对CNOP识别的敏感区的有效性的检验情况；最后评述了将CNOP方法应用于实际天气业务预报中进行敏感区识别的可能性，这包括：CNOP识别的敏感区的应用条件、CNOP方法在先进模式系统（如WRF）上的实现情况、以及可否不需伴随对CNOP进行求解等。除了上述所提研究工作之外，王晓雷等<sup>[40-41]</sup>还应用CNOP方法研究了南海的台风以及双台风的相互作用。所有结果都表明，CNOP方法在台风目标观测中具有重要的应用价值。

虽然到目前为止，CNOP方法在台风目标观测中取得了十分显著的成果，然而，这并不意味着这项研究工作已经结束，事实上，通过这些研究，我们也发现有更多的问题等待解决。

首先，目前CNOP的计算不论采用伴随模式与否都需要较长的时间。因此，发展高效的并行算法的研究十分重要，特别是将该方法运用于业务预报时，时效问题是必须解决的。其次，集合方法在各种大气科学研究与业务预报中的应用也表明其具有相当的优越性。能否将集合方法和CNOP方法结合，发展出新的目标观测方法，也是该领域科学家应该努力的方向之一。还有，目前关于南海生成台风的目标观测问题的研究较少，而该类台风对我国广东、海南一带影响较大，开展南海生成台风目标观测问题研究，提高南海台风的预报技巧，应该是我国开展台风目标观测的重要方向之一。这也启发我们应该着力开展实施目标观测前提条件的研究。显然，对于不同类型、不同地区的台风，其目标观测实施的前提条件应该不同。如何根据南海地区的天气形势，判断出对有可能出现的台风事件是否实施目标观测，也是需要认真开展的。

最后，目前关于台风目标观测的研究几乎仅涉及用目标观测改进数值预报模式的初始场，即第一类可预报性问题。Mu<sup>[17]</sup>提出了用目标观测方法研究

第二类可预报性问题，其思路是用目标观测去更精确地确定数值模式中的参数。这一思路可以同样用于研究台风数值预报模式中参数的不确定性问题：用非线性最优化方法，寻找出在一定条件下，对台风的路径与强度预报相对敏感与重要的若干参数（前提是这些参数可以通过直接或间接观测更准确地确定），对该部分参数实行目标观测，通过改进数值模式，进而提高台风的预报技巧。我们不仅要适时地给出预报所需的“优”的初始场，也应该适时地给出预报所需的“优”的物理过程描述，这是Mu<sup>[17]</sup>提出目标观测用于研究第二类可预报性问题的主要思路。对于台风，也是应该努力尝试的。

## 参考文献

- [1] Snyder C. Summary of an informal workshop on adaptive observations and FASTEX. *Bull Amer Meteor Soc*, 1996, 77: 953-961.
- [2] Langland R H, Rohaly G D. Adjoint-based targeting of observations for FASTEX cyclones. *Proc Seventh Conf on Mesoscale Processes*. Reading, United Kingdom, Amer Meteor Soc, 1996: 359-371.
- [3] Ancell B C, Mass C F. Structure, growth rates, and tangent linear accuracy of adjoint sensitivities with respect to horizontal and vertical resolution. *Mon Wea Rev*, 2006, 134: 2971-2988.
- [4] Palmer T N, Gelaro R, Barkmeijer J, et al. Singular vectors, metrics, and adaptive observations. *J Atmos Sci*, 1998, 55: 633-653.
- [5] Wu C C, Chen J H, Lin P H, et al. Targeted observations of tropical cyclone movement based on the Adjoint-Derived Sensitivity Steering Vector. *J Atmos Sci*, 2007, 64: 2611-2626.
- [6] Bishop C H, Toth Z. Ensemble transformation and adaptive observations. *J Atmos Sci*, 1999, 56: 1748-1765.
- [7] Hamill T M, Snyder C. Using improved background-error covariance from an ensemble kalman filter for adaptive observations. *Mon Wea Rev*, 2002, 130: 1552-1572.
- [8] Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretical aspects. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 420-436.
- [9] Langland R H, Toth Z, Gelaro R, et al. The North Pacific Experiment (NORPEX-98): Targeted observations for improved North American weather forecasts. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 80: 1363-1384.
- [10] Szunyogh I, Toth Z, Morss R E, et al. The effect of targeted dropsonde observations during the 1999 Winter Storm Reconnaissance Program. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 3520-3537.
- [11] Wu C C, Lin P H, Abernson S D. Dropwindsonde Observations for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region(DOSTAR): An overview. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86: 787-790.
- [12] Rabier F, Gauthier P, Cardinali C, et al. An update on THORPEX-related research in data assimilation and observing strategies. *Nonlin Processes Geophys*, 2008, 15: 81-94.
- [13] Abernson 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. *Mon Wea Rev*, 2011, 139: 2689-2703.
- [14] Chou K H, Wu C C, Lin P H, et al. The Impact of Dropwindsonde Observations on Typhoon Track Forecasts in DOTSTAR and T-PARC. *Mon Wea Rev*, 2011, 139: 1728-1743.
- [15] Bergot T. Influence of the assimilation scheme on the efficiency of adaptive observations. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2001, 127: 635-660.
- [16] Majumdar S J, Abernson S D, Bishop C H, et al. A comparison of adaptive observing guidance for Atlantic tropical cyclones. *Mon Wea Rev*, 2006, 134: 2354-2372.
- [17] Mu M. Methods, current status, and prospect of targeted

- observation. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 56(12): 1997-2005.
- [18] Mu M, Duan W S, Wang B. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications. *Nonlin Processes Geophys*, 2003, 10: 493-501.
- [19] Duan W S, Mu M, Wang B. Conditional nonlinear optimal perturbation as the optimal precursors for El Nino-Southern oscillation events. *J Geophys Res*, 2004, 109, D23105.
- [20] Mu M, Sun L, Hank D A. The sensitivity and stability of the ocean's thermocline circulation to finite amplitude fresh water perturbations. *J Phys Oceanogr*, 2004, 34: 2305-2315.
- [21] Terwisscha van Scheltinga A D, Dijkstra H A. Conditional nonlinear optimal perturbations of the double-gyre ocean circulation. *Nonlin Processes Geophys*, 2008, 15: 727-734.
- [22] Riviere O, Lapeyre G, Talagrand O. Nonlinear generalization of singular vectors: behavior in a baroclinic unstable flow. *J Atmos Sci*, 2008, 65: 1896-1911.
- [23] 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. *Mon Wea Rev*, 2009, 137: 1623-1639.
- [24] Qin X H, Mu M. Influence of conditional nonlinear optimal perturbations sensitivity on typhoon track forecasts. *Q J R Meteorol Soc*, 2011, 138: 185-197.
- [25] Qin X H, Mu M. A study on the reduction of forecast error variance by three adaptive observation approaches for tropical cyclone prediction. *Mon Wea Rev*, 2011, 139: 2218-2232.
- [26] Zhou F F, Mu M. The impact of verification area design on tropical cyclone targeted observations based on the CNOP method. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28(5): 997-1010.
- [27] Zhou F F, Mu M. The impact of horizontal resolution on the CNOP and on its identified sensitive areas for tropical cyclone predictions. *Adv Atmos Sci*, 2012, 29: 36-46.
- [28] Zhou F F, Mu M. The time and regime dependences of sensitive areas for tropical cyclone prediction using the CNOP method. *Adv Atmos Sci*, 2012, 29: 705-716.
- [29] Ehrendorfer M, Errico R M. Mesoscale predictability and the spectrum of optimal perturbations. *J Atmos Sci*, 1995, 52: 3475-3500.
- [30] Chen B Y, Mu M. The roles of spatial locations and patterns of initial errors in the uncertainties of tropical cyclone forecasts. *Adv Atmos Sci*, 2012, 29: 63-78.
- [31] 周非凡, 张贺. 基于CNOP方法的台风目标观测中三种敏感区确定方案的比较研究. *大气科学*, 2014, 38(2): 261-272.
- [32] Qin X H. A comparison study of the contributions of additional observations in the sensitive regions identified by CNOP and FSV to reducing forecast error variance for the Typhoon Morakot. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 2010, 3: 258-262.
- [33] Chen B Y. Observation system experiments for typhoon Nida (2004) using the CNOP method and DOTSTAR data. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 2011, 4: 118-123.
- [34] Chen B Y, Mu M, Qin X H. The impact of assimilating dropwindsonde data deployed at different sites on typhoon track forecasts. *Mon Wea Rev*, 2013, 141: 2669-2682.
- [35] Qin X H, Duan W S, Mu M. Conditions under which CNOP sensitivity is valid for tropical cyclone adaptive observations. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2013, 139: 1544-1554.
- [36] Wang H L, Mu M, Huang X Y. Application of conditional nonlinear optimal perturbations to tropical cyclone adaptive observation using the Weather Research Forecasting (WRF) model. *Tellus A*, 2011, 63: 939-957.
- [37] Wang B, Tan X. Conditional nonlinear optimal perturbations: Adjoint-free calculation method and preliminary test. *Mon Wea Rev*, 2010, 138: 1043-1049.
- [38] 王斌, 谭晓伟. 一种求解条件非线性最优扰动的快速算法及其在台风目标观测中的初步检验. *气象学报*, 2009, 67(2): 175-188.
- [39] 谭晓伟, 王斌, 王栋梁. 基于条件非线性最优扰动的目标观测中瞄准区不同引导性变量的影响试验研究. *气象学报*, 2011, 69(3): 400-411.
- [40] 王晓雷, 朱克云, 周非凡. 条件非线性最优扰动在南海台风中的应用研究. *成都信息工程学院学报*, 2010, 25(6): 640-646.
- [41] 王晓雷, 周非凡, 朱克云. 条件非线性最优扰动方法在台风凤神和凤凰相互作用过程中的应用研究. *热带气象学报*, 2013, 29: 265-274.

## 新书架

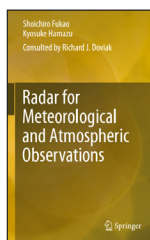
### NEW BOOK

 感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



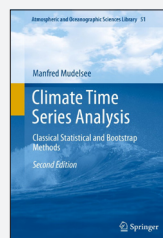
Horizons in Earth Science Research (Volume 10)  
《地球科学研究概述(第10卷)》

编著者: Benjamin Veress 等  
出版者: Nova Science Publishers  
出版年: 2013



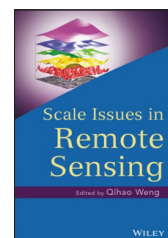
Radar for Meteorological and Atmospheric Observations  
《气象和大气观测雷达》

编著者: Shoichiro Fukao 等  
出版者: Springer  
出版年: 2014



Climate Time Series Analysis  
《气候时间序列分析》  
(第2版)

编著者: Manfred Mudelsee 等  
出版者: Springer  
出版年: 2014



Scale Issues in Remote Sensing  
《遥感尺度问题》

编著者: Qihao Weng 等  
出版者: Wiley  
出版年: 2014