

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^{* 1}

谭晓伟^{1,2} 王 斌¹ 王栋梁³

TAN Xiaowei^{1,2} WANG Bin¹ WANG Dongliang³

1. 中国科学院大气物理研究所 LASG, 北京, 100029
2. 中国科学院研究生院, 北京, 100049
3. 中国气象局上海台风研究所, 中国气象局台风预报技术重点开放实验室, 上海, 200030

1. *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

3. *Laboratory of Typhoon Forecast Technique, Shanghai Typhoon Institute of CMA, Shanghai 200030, China*

2009-03-13 收稿, 2009-05-15 改回.

Tan Xiaowei, Wang Bin, Wang Dongliang. 2011. Experimental studies of the impacts of the different guidances of targeting areas on the targeting observations based on the CNOP method. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(3):400-411

Abstract The conditional nonlinear optimal perturbations (CNOPs) obtained by a fast algorithm are applied to the targeting observations of Typhoon Matsa (2005) based on the Global/Regional Assimilation and PrEdiction System (GRAPES), an operational regional prediction model. Through a series of sensitivity experiments, several issues on targeting strategy design are discussed, including the effectivity of different guidance to determine the sensitive area (or targeting area) and the impact of the size of targeting area on the improvement of 24-hour forecast. Three guidances are used when employing the CNOP for finding the targeting area to improve the 24-hour sea level pressure prediction and 24-hour accumulated rainfall prediction in the verification region (i. e. 116. 8125°—129. 75°E, 20. 125°—35. 3125°N). The distribution and effectivity of these targeting areas are compared with each other with the results that the sensitive areas identified by the three guidances used in this study are different from each other. All the sensitive areas determined by these guidances are effective in that the improvement of the 24-hour forecast is reached. The last two guidances are more effective and able to identify more similar sensitive areas than the first one. Further, when the size of targeting areas is enlarged twice it is noticed that the 24-hour accumulated rainfall prediction is not necessarily improved since although an initial condition improvement in a larger size of targeting area may sometimes result in a better prediction skill, it is not always true, depending on the sensitivity of the guidance to the size of targeting area.

Key words CNOP, Targeting observations, OSSE, Typhoon

摘 要 基于 GRAPES 区域业务预报模式, 采用一种快速算法计算出来的条件非线性最优扰动对实际台风个例麦莎 (No. 0509) 开展了目标观测研究, 应用数值模式, 进行一系列的敏感性试验, 讨论了与目标观测设计相关的一些问题, 包括确定瞄准区时使用不同的引导性变量对目标观测效果的影响、及瞄准区范围变化对预报效果的影响。文中分别以提高麦莎在检验区 (20. 125°—35. 3125°N, 116. 8125°—129. 75°E) 内的 24 h 海平面气压预报和 24 h 累积降水量预报为目的, 基于条件非线性最优扰动使用了 3 种不同的引导性变量寻找敏感区 (又称瞄准区), 对这些敏感区的分布特点和有效性进行了比较和讨论。试验结果表明, 在使用的 3 种引导性变量中, 用不同的引导性变量识别的敏感区是有差别的, 总体上说, 文中使用的 3 种引导性变

* 资助课题: 国家 973 项目 (2004CB418304)、公益性气象科研行业专项 (GYHY (QX) 2007-6-12) 和国家自然科学基金 (40605018)。

作者简介: 谭晓伟, 主要从事数值模拟、目标观测等方面的研究。E-mail: xwtan@mail. iap. ac. cn

量识别的瞄准区对提高预报都是有效的,特别是第2和第3种的效果更好些,且两者识别的瞄准区常显示出类似的特点。文中进一步针对检验区内24 h累积降水量预报误差问题,将前面确定的瞄准区范围扩大相同的幅度,讨论瞄准区范围变化对改进预报的影响。试验结果表明,增加瞄准格点数,有可能使预报效果得到改善,但是试验结果同时也暗示了单纯靠扩大瞄准区的范围未必一定能减小预报误差,这与不同的引导性变量对瞄准区范围大小的敏感性不同有关。

关键词 条件非线性最优扰动,目标观测,观测系统模拟实验,台风

中图法分类号 P435

1 引言

通过目标观测研究来提高对台风等极端天气事件的预报水平,是一个具有重要科学意义和重大实际应用价值的课题。目标观测是针对指定预报时效(如24 h)在某一特定区域内的预报(如降水预报)问题,寻找初始时刻对该预报影响最大的敏感区,从而通过在该敏感区进行有针对性的观测,改进该区域初值的质量和精度,以达到有效提高预报技巧和准确率的目的(Bergot, et al, 1999; Boybeyi, et al, 2002)。在目标观测研究中,一般称预报时刻的特定区域为检验区或目标区,而初始时刻的敏感区称为瞄准区(Bishop, et al, 2001)。瞄准区的确定通常要定义一个整体物理变量作为标准,取该变量的值较大的那些位置作为瞄准区,这个物理变量称为引导性变量(Majumder, et al, 2006)。

在目标观测理论研究和相关的外场试验中,已经取得了一系列令人鼓舞的结果(Aberson, et al, 1999; Aberson, 2002; Bergot, 1999; Bergot, et al, 1999; Burpee, et al, 1996; Langland, et al, 1999a, 1999b; Toth, et al, 1999; Szunyogh, et al, 1999, 2000; Wu, et al, 2005, 2007; 穆穆等, 2007)。为了改善热带气旋(TC)预报中初始场的分析误差,1982—1996年,NOAA的飓风研究部门(HRD)进行了20次“天气流”试验,在热带预测中心(TPC)官方路径预报中,试验获得的下投式探空仪观测使数值预报有了很大的提高(Burpee, et al, 1996),12—60小时的预报提高了16%—30%。1996年,NOAA进行了“天气监测”项目,对于不同的台风预报模式,同化下投式探空仪观测资料之后,预报都有不同程度的改善,平均路径预报最高提高了32%,登陆前48小时的强度预报最高提高了20%(Aberson, et al, 1999)。路径预报的提高相当于过去20—25年中取得的改进。北太平洋试验(NOR-

PEX)数据资料影响研究的初步结果表明,使用美国海军和美国气象局的预报模式,同化目标观测资料使美国西北部(30°—60°N, 100°—130°W)2天的平均预报误差减小约10%;对于个别例子,2天的预报误差减小甚至超过50%(Langland, et al, 1999a)。Wu等(2007)提出了一种新的客观瞄准方法——用伴随驱动敏感性引导向量(ADSSV)进行台风目标观测研究,穆穆等(2007)及王斌等(2009)将条件非线性最优扰动(CNOP)(Mu, et al, 2003; Duan, et al, 2004)应用到目标观测中来确定瞄准区,均取得改进预报的效果。尽管如此,仍然有很多问题有待进一步的探讨,其中就包括识别瞄准区时使用不同引导性变量的有效性问题,瞄准区范围增大对预报改善的影响等。

首先,在以往的目标观测研究中,寻找瞄准区的方法以及使用的引导性变量各不相同。例如, Buizza等(1999)使用奇异向量方法(SVs)、Majumder等(2002a, 2002b, 2006)使用集合转换卡尔曼滤波(ETKF)和总能量奇异向量方法(TEVSs),他们定义的引导性变量都是总能量;Bergot等(1999)定义的引导性变量是涡度拟能,而使用的方法是SVs和伴随梯度两种;Bishop等(1999)的工作中,定义了标准化后的涡度和流函数的平方和作为引导性变量,使用的是集合转换的方法;Majumder等(2002a)用ETKF方法研究瞄准区时,定义了一个基于能量的引导性变量,具体形式为 $\frac{1}{2}(u'^2 + v'^2) + 3.346T'^2$;Palmer等(1998)定义了涡度拟能、总能量、动能和流函数变量4种引导性变量,采用SVs方法确定瞄准区。该研究表明,用SVs方法确定瞄准区对定义的引导性变量依赖很大。穆穆等(2007)尝试使用伴随方法计算的CNOP研究目标观测中的瞄准区问题时,使用了干能量作为引导性变量。王斌等(2009)使用一种快速算法计算的CNOP研究目标观测中的瞄准区问题时,使用了湿能

量作为引导性变量。那么,定义什么形式的引导性变量确定的瞄准区效果最好?以往采用的线性确定瞄准区的方法是否适合非线性预报模式?这些都是值得深入研究的问题。

另外,一般人们会认为瞄准区范围越大,对检验区预报的改善越大。但是由于各种因素的限制,需要进行加密观测的范围越大,耗费的资源以及观测难度也越大。因此,在目标观测问题中,有必要研究增大瞄准区范围会对预报的提高有多大的影响。Morss(1999)指出,在理想条件下,增加瞄准区的范围未必能提高预报水平。然而,关于这方面的工作,基于实际业务模式的还没见到报告。

0509号台风“麦莎”是近年来对中国有极大影响的台风之一,人们对于该台风的研究也比较多(如冀春晓等,2007)。GRAPES区域模式作为一个实际的业务预报模式,对台风预报具有一定的模拟能力(陈德辉等,2006;黄伟等,2007)。因此,本文选取0509号台风“麦莎”作为研究对象,基于GRAPES区域业务预报模式,采用一种非线性确定瞄准区的方法:条件非线性最优扰动(Mu, et al, 2003),针对台风的目标观测,围绕上述两个方面的问题进行数值模拟试验,并利用试验结果进行了分析和讨论。本文中,CNOP采用快速算法(王斌等,2009)计算。

2 几种引导性变量的使用

如上所述,在确定瞄准区的过程中,需要定义引导性变量,取引导性变量值较大的那些位置为瞄准区。已有的工作(Palmer, et al, 1998; Buizza, et al, 1999; Majumdar, et al, 2006)说明,所有的引导性变量都可以表示为 $(\mathbf{v}, \mathbf{P}\mathbf{v})$ 一种形式,即

$$g = (\mathbf{v}, \mathbf{P}\mathbf{v}) = \sum_{k=1}^L v_k \cdot \sum_{i=1}^L p_{ik} v_i \quad (1)$$

其中 L 为空间格点数, v_k 和 p_{ik} 分别为 \mathbf{v} 和 \mathbf{P} 中的元素。一般 \mathbf{v} 都是描述大气状态的变量,所以最关键的就是 \mathbf{P} 的给定。目前,普遍认为根据目标观测的目的, \mathbf{P} 取分析误差协方差矩阵的逆是最合适的(Buizza, et al, 1999; Majumdar, et al, 2006)。但是这样会遇到两个困难,分析误差协方差难以准确获得和计算量过大。因此实际工作中 \mathbf{P} 一般都选取对角矩阵(即方差矩阵的逆),甚至是单位矩阵(即假设对角线上的方差均为1)。

本试验中涉及到的3种引导性变量实际上是式(1)的3种特殊形式。第1种引导性变量中 \mathbf{P} 使用单位矩阵($\mathbf{P} = \mathbf{E}$),状态变量 \mathbf{v} 使用CNOP的水平风场 (u', v') ,即

$$g_{ij}^1 = \sum_{k=1}^K (u'_{ijk} + v'_{ijk}) \quad (2)$$

第2种引导性变量中 \mathbf{P} 使用单位矩阵($\mathbf{P} = \mathbf{E}$),状态变量 \mathbf{v} 使用CNOP的水平风场、位势高度和比湿 (u', v', h', q') ,即

$$g_{ij}^2 = \sum_{k=1}^K (u'_{ijk} + v'_{ijk} + h'_{ijk} + q'_{ijk}) \quad (3)$$

第3种引导性变量的状态变量 \mathbf{v} 使用CNOP的水平风场、位势高度和比湿 (u', v', h', q') ,系数 \mathbf{P} 使用 u, v, h, q 的近似观测误差的平方的倒数($u' \approx 1$ m/s, $v' \approx 1$ m/s, $h' \approx 5$ gpm, $q' \approx 0.001$ kg/kg),即

$$g_{ij}^3 = \sum_{k=1}^K (u'_{ijk} + v'_{ijk} + 0.04h'_{ijk} + 10^6 q'_{ijk}) \quad (4)$$

这种引导性变量的特点是包含了观测误差的信息。在式(2)、(3)和(4)中, i, j, k 分别表示纬向、经向和垂直方向的格点, K 是垂直方向的总层数。第3种引导性变量是首次提出的,希望通过考虑观测误差反映分析误差协方差的一些信息。

3 敏感性试验设计与结果分析

本节将针对第2节给出的3种引导性变量在有效性方面进行试验和比较,其中确定瞄准区的方法为CNOP,采用王斌等(2009)提出的快速算法计算。模式选取GRAPES区域模式,分辨率取 0.5625° ,模式运行区域为 $(10^\circ - 59.5^\circ \text{N}, 105^\circ - 139.875^\circ \text{E})$ 。研究个例选0509号台风“麦莎”,检验区域为 $(20.125^\circ - 35.3125^\circ \text{N}, 116.8125^\circ - 129.75^\circ \text{E})$ 。分别针对检验区域内24h海平面气压预报误差和24h累积降水量预报误差,通过计算3种引导性变量确定敏感区(瞄准区),并进一步就3种方案确定的敏感区对所关注的预报误差的影响进行敏感性试验和比较。

3.1 瞄准区对检验区内对比试验预报整体误差的贡献分析

3.1.1 针对检验区内24h海平面气压预报误差的试验

用2005年8月3日12时(世界时)T213的12h预报场作为初始场,通过时间滞后法生成73个

24 h 预报集合样本。其中任意挑选一个成员(本文选第 11 个样本)作为初始场,驱动模式,积分 24 h 作为自然试验,视为真实的大气状态。从余下的 72 个集合成员中任意挑选一个成员(本文选第 25 个样本)作为有误差的实际初始场,用模式积分 24 h 得

到一个预报场,称为控制试验。因此,控制试验与自然试验的预报偏差视为实际预报误差。图 1 给出了自然试验的海平面气压初始场和 24 h 预报场以及 24 h 的路径预报。初始场台风强度约 984 hPa,24 h 内均在海上移动,基本未受地面影响。

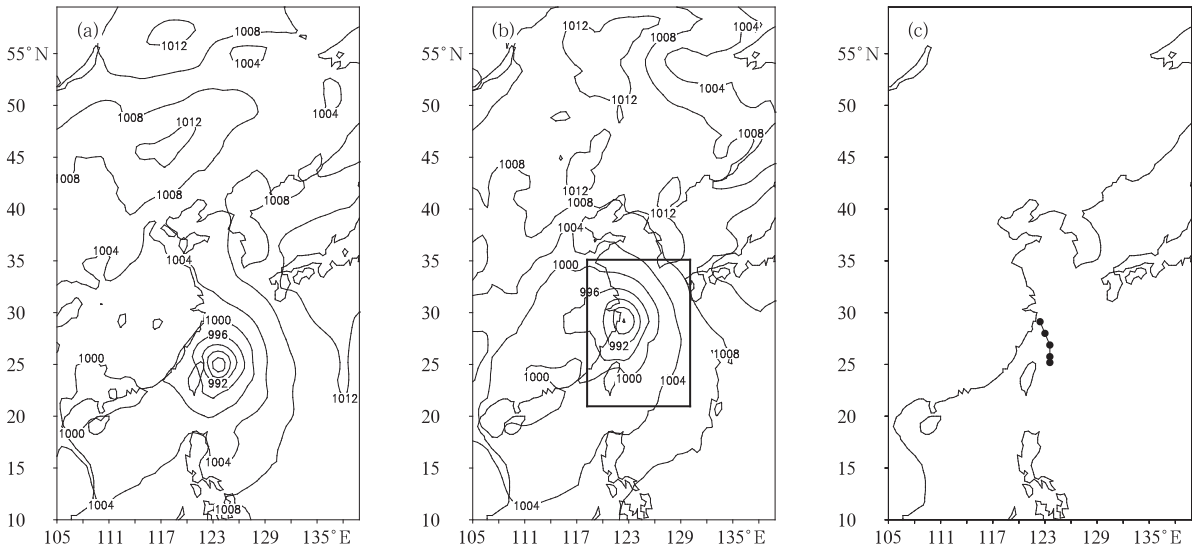


图 1 自然试验(假定为真实态)在初始时刻(a)和第 24 小时(b)的海平面气压场(单位:hPa)以及 24 h 台风路径(c)

Fig. 1 Sea level pressure (unit; hPa) at the initial time (a) and the 24th hour (b), and the 24-hour typhoon track produced by the “nature” run (c)

同时,在产生的 73 个集合样本中用除控制试验以外的 72 个样本与控制试验求差,生成非零扰动样本集合,扰动样本集合包括初始场扰动样本和检验区内 24 h 海平面气压预报增量样本。通过这组扰动样本集合,根据王斌等(2009)的方法计算出 CNOP,利用 3 种不同的引导性变量确定出不同的瞄准区(图 2),这些瞄准区内水平方向包含 140—143 个格点,约占全场范围的 2.4%(全场水平方向有 5760 个格点)。使用第 1 种引导性变量确定的瞄准区(图 2a)、第 2 种引导性变量确定的瞄准区(图 2b)及第 3 种引导性变量确定的瞄准区(图 2c)位置分布具有相似的特点,主要分布在初始时刻台风移动方向的左侧、台风附近北部和西北方向。特别是用后两种引导性变量确定的瞄准区(图 2b、2c)更加相似。

为了考察用 3 种引导性变量确定的 3 个瞄准区内初始误差对检验区内 24 h 海平面气压预报误差

的影响,这里设计了 3 个敏感性试验(sensp):在用第 1 种引导性变量确定的瞄准区(图 2a)内使用控制试验的初始场,瞄准区以外使用自然试验初始场(即假设是“真实大气”状态),使得初始场只在瞄准区内有误差,用 GRAPES 区域模式积分 24 h,称为试验 sensp-A。试验 sensp-B 和试验 sensp-C 的设计与试验 sensp-A 相似,不同的是分别用第 2 种和第 3 种引导性变量来确定瞄准区(图 2b、2c)。

从定性和定量两个角度来比较分析控制试验和 3 个 sensp 试验。首先进行定性比较,图 3 给出了控制试验和 3 个 sensp 试验在检验区域内海平面气压 24 h 的预报误差(相对自然试验)。试验 sensp-A、sensp-B 和 sensp-C 的预报误差从位置、形状和强度上都接近控制试验(即全场有误差的情况),这说明 3 种瞄准区的误差发展能够在全场误差发展中起主要作用,为全场误差增长的主模态。

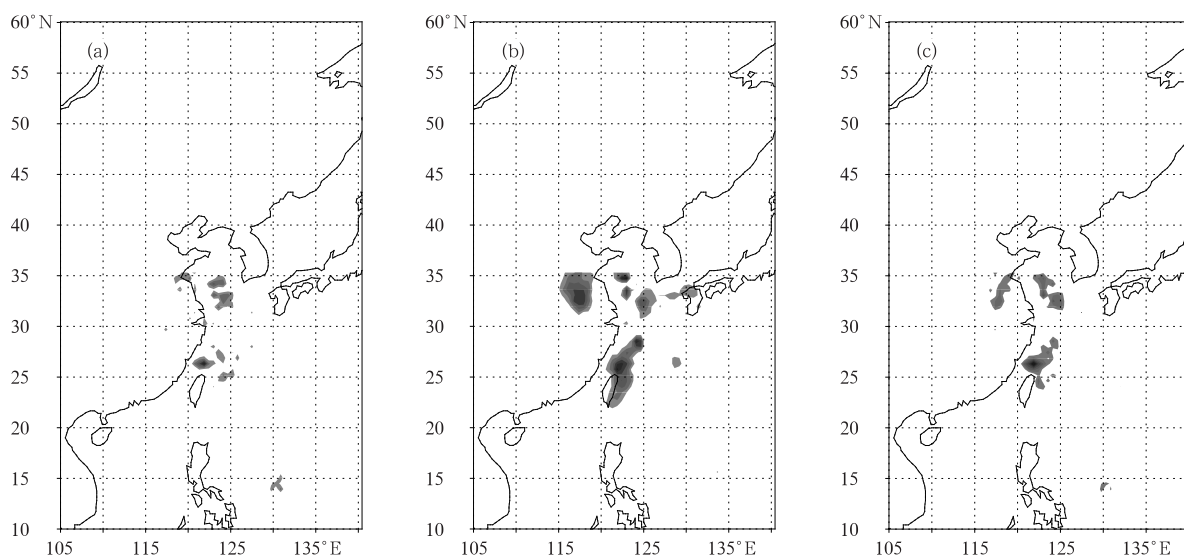


图2 sensp 试验中针对检验区内 24 h 海平面气压预报所取的瞄准区位置(阴影)

(a. 第 1 种引导性变量, b. 第 2 种引导性变量, c. 第 3 种引导性变量)

Fig. 2 Locations of the targeting (shaded areas) area for the sensp experiment to improve the 24-hour forecast of sea level pressure in the verification region identified by

(a) the first guidance, (b) the second guidance, and (c) the third guidance

与其他两个试验相比, sensp-C 更加接近控制试验。

进行定量比较时使用的评估标准是检验区内海

平面气压预报的方差 $p_{\text{rmse}} = \frac{1}{N} \sum_D (p'_{ij} - \bar{p}')^2$, 其

中 $\bar{p}' = \frac{1}{N} \sum_D p'_{ij}$, 这里 p'_{ij} 是水平格点 (i, j) 上的

24 h 海平面气压预报误差, D 表示检验区。从表 1 中可见, 尽管 3 个 sensp 试验所选的瞄准区占全场范围不到 2.5%, 但是他们都对检验区内产生的预报误差贡献很大, 前 2 种引导性变量确定的瞄准区(对应 sensp-A 和 sensp-B)造成检验区内的预报误差方差贡献约 30%, 而第 3 种引导性变量选择的瞄准区(对应 sensp-C)造成检验区内的预报误差方差贡献超过了 35%。很明显, 无论从定性还是定量的分析来看, 本文提出的第 3 个引导性变量是 3 种引导性变量中最有效的。

与环流结构配合对第 3 个引导性变量找到的瞄准位置做进一步分析。图 4a 中阴影部分表示“真实大气”风速的整个垂直层平均, 等值线是 500 hPa 位势高度, 等值线间隔 40 gpm。第 3 种引导性变量找到的瞄准位置主要分 3 块(图 2c)。南边的一块与台风眼壁对应, 位于台风移动路径的左侧大风区, 并向台风最大风速区延伸。偏东的一块位于副热带高

表 1 检验区内 24 h 海平面气压预报误差方差

Table 1 24-hour sea level pressure forecast error variance in the verification region

试验方案	有误差的格点数	占全场总格点数的比例	引起的预报误差方差 (hPa^2)	与控制试验的比
控制试验	5760	100%	11.59825	100%
sensp-A 试验	143	2.48%	3.239798	27.93%
sensp-B 试验	141	2.45%	3.791606	32.69%
sensp-C 试验	140	2.43%	4.318982	37.24%

压脊线西部。偏西的一块位于西部低压槽前。相比之下, 第 1 种引导性变量找到的南边这块没有向台风最大风速区延伸, 西部对应槽前的点很少(图 2a); 第 2 种引导性变量找到的瞄准位置(图 2b)与第 3 种引导性变量找到的瞄准位置(图 2c)非常相似, 也是主要集中在台风眼壁和台风移动路径的左侧大风区、副热带高压脊线西部、及西部低压槽前这 3 个区域。从自然试验初始场的 1000—500 hPa 的水汽(比湿)平均(图 4b)来看, 在偏南和偏西的两块敏感区都有充足的水汽供给。由此可见, 第 3 种引导性变量找到的瞄准位置与 3 个系统有关: 台风本身、西部槽前和副热带高压, 这与我们目前对台风研究的相关理论是一致的: 除了台风本身的内力作用, 西移台风路径预报的主要着眼点是西太平洋副热带高压及西风带槽脊的位置和强度变化, 台风本身的

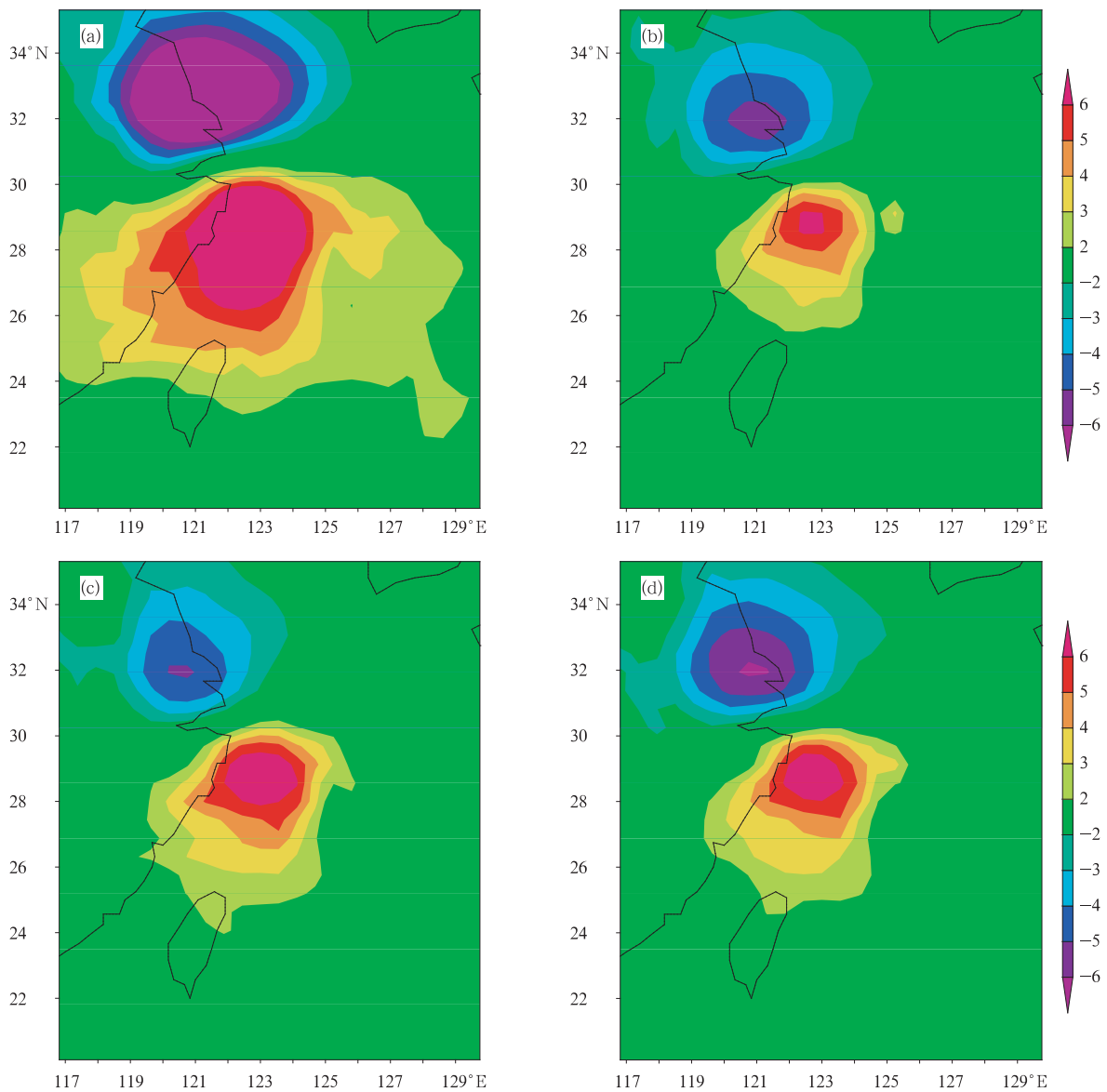


图3 检验区内 24 h 海平面气压预报误差(单位: hPa)

(a. 控制试验, b. sensp-A 试验, c. sensp-B 试验, d. sensp-C 试验)

Fig. 3 24-hour forecast errors of sea level pressure (unit: hPa) in the verification area for (a) control experiment, (b) sensp-A experiment, (c) sensp-B experiment and (d) sensp-C experiment

内力作用和西风带高空槽对台风的强度变化有重要影响(陈联寿等,1979;朱乾根等,1992)。这也说明了本文提出的第3种引导性变量在寻找敏感区研究中的可行性和有效性。

3.1.2 针对检验区域内 24 h 降水预报误差的试验

在本节中,针对检验区域内 24 h 降水预报误差,同样利用 CNOP 和 3 种引导性变量确定瞄准区(敏感区)(图 5),研究瞄准区内的初始误差经过发展后造成的检验时刻检验区内预报误差的增长情况。研究方法与 3.1.1 节中的方法基本相同,只是在计算 CNOP 时将针对的预报变量由检验区内的

24 h 海平面气压预报误差变为检验区内的 24 h 累积降水量预报误差。使用第 1 种引导性变量确定的瞄准区(图 5a)在水平方向取 98 个格点;使用第 2 种引导性变量确定的瞄准区(图 5b)在水平方向取 99 个格点;使用第 3 种引导性变量确定的瞄准区(图 5c)在水平方向取 98 个格点。这些瞄准区范围约占全场范围的 1.7%(全场水平有 5760 个格点)。从识别的瞄准区位置来看(图 5),用第 1 种引导性变量和第 2 种引导性变量识别的瞄准区差别较大,用第 2 种引导性变量和第 3 种引导性变量确定的瞄准区比较相似。

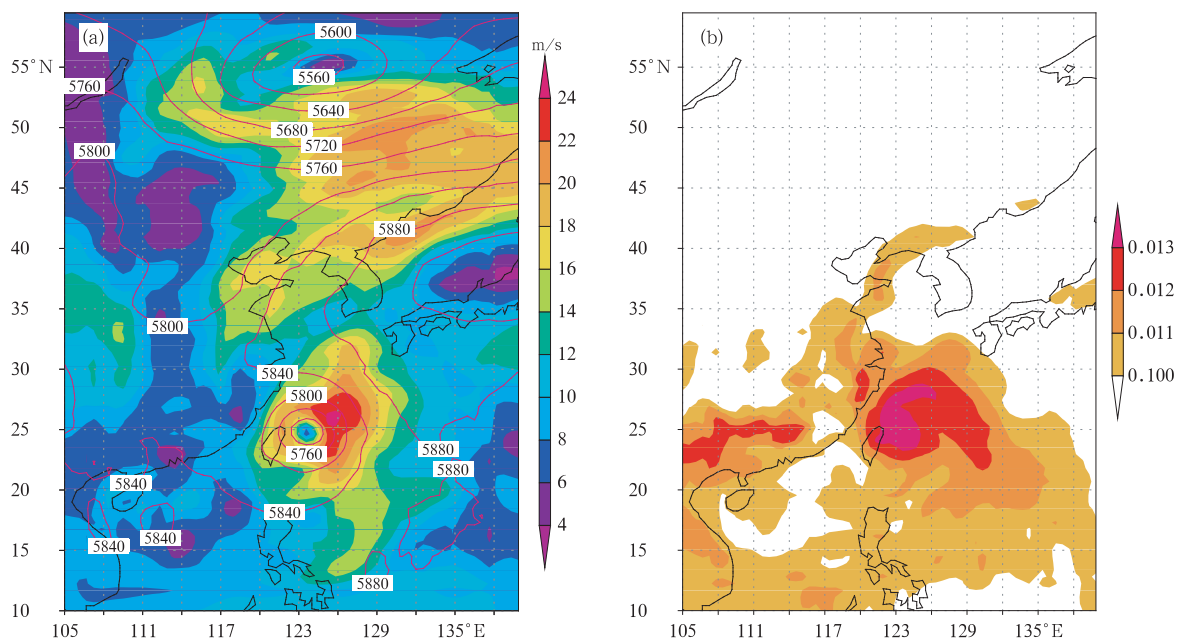


图4 自然试验初始场的环流结构 (a. 风速的垂直层平均和500 hPa位势高度场, 单位:gpm; b. 1000—500 hPa的比湿平均, 单位:kg/kg)

Fig. 4 Circumfluence structures of (a) the initial vertically-averaged winds (m/s) and the 500 hPa geopotential height (gpm), and (b) the initial specific humidity (kg/kg) averaged over 1000 to 200 hPa in the “nature” run

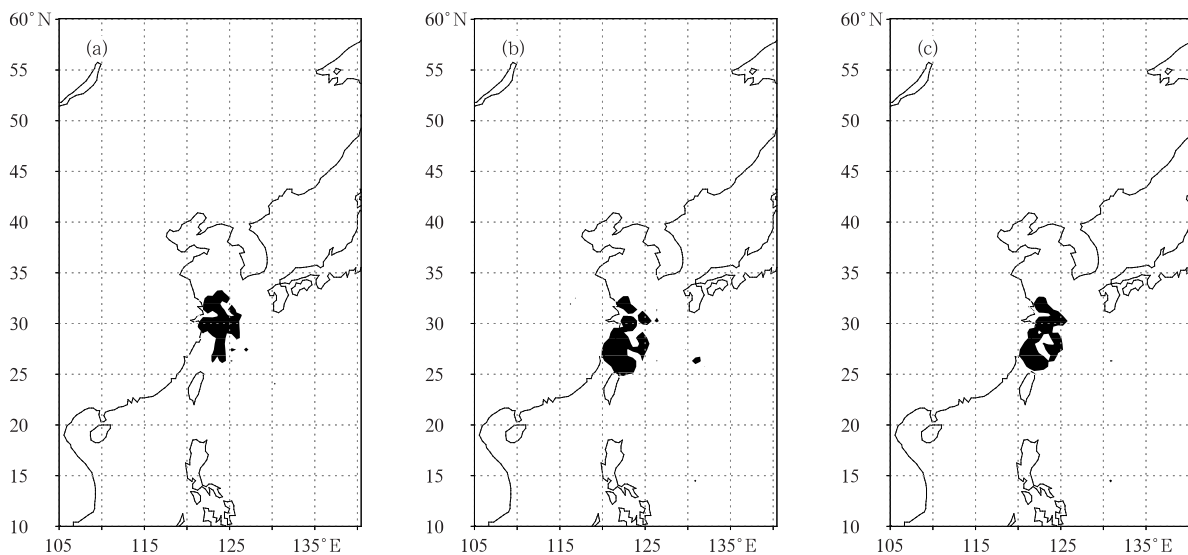


图5 针对检验区内24 h降水量预报所取的瞄准区(阴影)位置 (a. 第1种引导性变量, b. 第2种引导性变量, c. 第3种引导性变量)

Fig. 5 Locations of targeting area (shaded) for the sensr experiments to improve the 24-hour rainfall forecast in the verification region identified by (a) the first guidance, (b) the second guidance, and (c) the third guidance

为了考察用3种引导性变量确定的3个瞄准区内初始误差对检验区内24 h降水预报误差的影响,

设计了3个敏感性试验(sensr):在用第1种引导性变量确定的瞄准区(图5a)内使用控制试验的初始

场,瞄准区以外使用自然试验的初始场,使得初始场只在瞄准区内有误差,用模式积分 24 h,称为 sensr-A。sensr-B 和 sensr-C 的设计与 sensr-A 相似,不同的是分别用第 2 种、第 3 种引导性变量确定瞄准区(图 5b、5c)。

从相对于自然试验(即“真实大气”状态)的 24 h 降水预报误差比较(图 6)来做定性分析。在检验区

内,与控制试验的 24 h 降水量预报误差(图 6a)相比较,sensr-A(图 6b)在台湾岛以东洋面上的预报误差模拟偏弱;sensr-B(图 6c)在中国内陆上海西北方向的误差模拟偏弱;如果综合考虑海上和陆上的误差模拟总效果,sensr-C 模拟的预报误差(图 6d)似乎更接近控制试验的情况,即比 sensr-B 和 sensr-A 更好地抓住了全场误差发展的主模态。

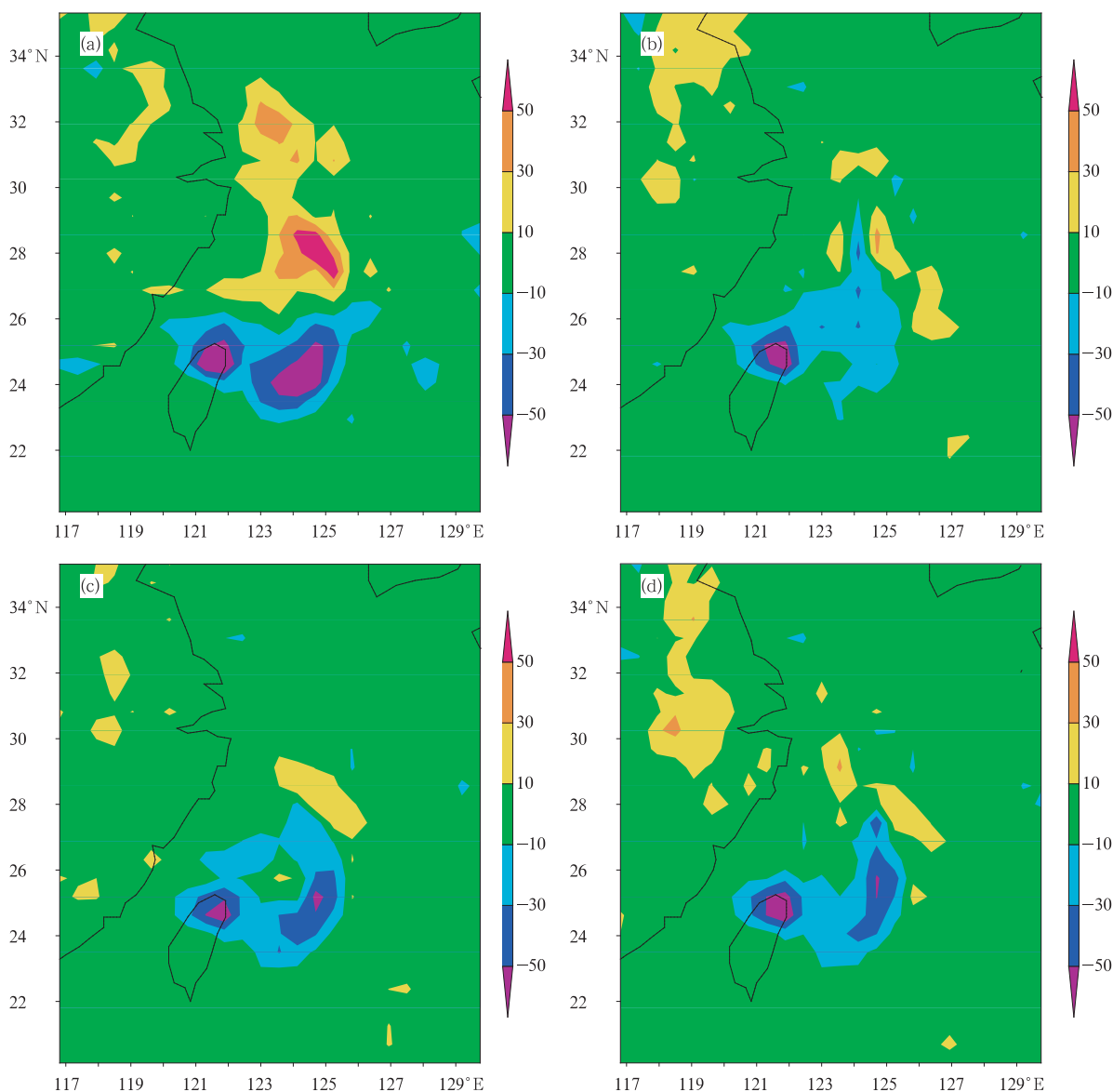


图 6 检验区内 24 h 累积降水量预报误差(单位:mm)

(a. 控制试验, b. sensr-A 试验, c. sensr-B 试验, d. sensr-C 试验)

Fig. 6 24-hour rainfall forecast errors (unit: mm) in the verification area for

(a) control experiment, (b) sensr-A experiment,

(c) sensr-B experiment and (d) sensr-C experiment

表 2 给出了检验区内 24 h 累积降水量预报误差方差的定量计算结果。检验区内 24 h 累积降水量预报误差方差 $R_{\text{rmse}} = \frac{1}{N} \sum_D (R'_{ij} - \bar{R}')^2$, 其中 $\bar{R}' = \frac{1}{N} \sum_D R'_{ij}$, 这里 R'_{ij} 是水平格点 (i, j) 上的 24 h 累积降水量预报误差, D 表示检验区。结果表明, 尽管 3 个瞄准区范围仅占全场的 1.7%, 但是 3 种瞄准区(分别对应 sensr-A、sensr-B 和 sensr-C)的误差发展能够在全场误差发展中起主要作用, 其贡献均超过 40%, 为全场误差增长的主模态。

表 2 检验区内 24 h 降水量预报误差方差
Table 2 The 24-hour rainfall forecast error variance in the verification region

试验方案	有误差的格点数	占全场总格点数的比例	引起的预报误差方差 (hPa^2)	与控制试验的比
控制试验	5760	100%	185.8185	100%
sensr-A 试验	98	1.7%	81.00139	43.59%
sensr-B 试验	99	1.7%	81.25246	43.73%
sensr-C 试验	98	1.7%	98.83977	53.19%

综上所述, 从定性和定量比较的结果来看, 不同的标准(引导性变量)识别的瞄准区位置可能会有差别, 从而导致瞄准区内初始误差增长引起的预报误差也有一定的差异; 从前面的分析和讨论可以看到, 在用 CNOP 作为瞄准方法时, 3 种引导性变量基本都可以用来有效地识别敏感区, 使用单位矩阵的引导性变量(第 2 种)定义简单、计算方便, 同时总体效

果也相当好。

3.2 瞄准区对减小检验区内对比试验预报误差的效果分析

为了进一步验证这 3 种引导性变量确定的瞄准区是否能有效地减小控制试验中检验区内的预报误差, 我们针对 24 h 检验区内降水量预报误差的个例, 新设计了 3 个敏感性试验(sensf): 在用第 1 种引导性变量确定的瞄准区(图 5a)内使用没有误差的自然试验的初始场, 瞄准区以外使用控制试验的初始场, 因此初始场只在瞄准区内无误差, 用模式积分 24 h, 称为 sensf-A。sensf-B 和 sensf-C 与 sensf-A 类似, 不同的是分别用第 2 种、第 3 种引导性变量确定瞄准区(图 5b、5c)。

对控制试验(图 6a)和 sensf 试验(图 7)在检验区内的 24 h 降水量预报误差(相对自然试验, 即假设的真实大气)进行定性和定量比较(表 3)。在检验区域内, 3 个 sensf 试验在台湾北部、海上的降水范围和强度明显减小, 上海西北部的降水误差基本消失。特别是控制试验中东海误差达 30 mm 以上, 甚至不少地方超过 50 mm, 而 sensf-B 和 sensf-C 中预报误差基本都减小到 30 mm 以下。不足的是, 它们在浙江以西地区都出现了一块正误差。在检验区内, 控制试验的 24 h 累积降水量预报误差方差 R_{rmse} 为 185.8185 mm^2 , 而瞄准区初值改善后(即 sensf 试验)预报误差方差都有不同程度的减小(表 3), sensf-C 的预报误差方差最小, 为 111.6327 mm^2 , 减小了约 40%。

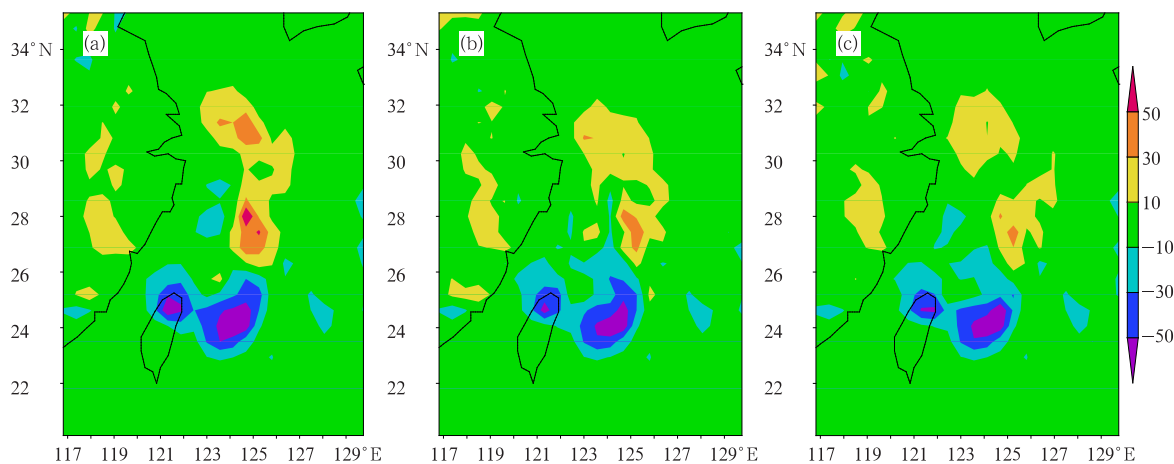


图 7 修正瞄准区内初始场误差之后, 检验区内 24 h 降水量预报误差(单位: mm)

(a. sensf-A 试验, b. sensf-B 试验, c. sensf-C 试验)

Fig. 7 24-hour rainfall forecast errors (unit: mm) in the verification area after the initial errors in the targeting area are corrected for (a) sensf-A experiment, (b) sensf-B experiment and (c) sensf-C experiment

表3 修正瞄准区内初始场误差之后
检验区内 24 h 降水量预报误差方差

Table 3 The 24-hour rainfall forecast error variance in the verification region after the initial errors in the targeting area are corrected

试验方案	有误差的格点数	占全场格点数的比例	引起的预报误差方差 (hPa ²)	与控制试验的比
控制试验	5760	100%	185.8185	0
sensf-A 试验	98	1.7%	151.5837	18.42%
sensf-B 试验	99	1.7%	118.9138	36.01%
sensf-C 试验	98	1.7%	111.6327	39.92%

在进行可预报性研究的过程中, Zhang 等(2003)为了量化模拟的各层变量的偏差, 引入了一个偏差的积分模, 即(每单位质量的)偏差总能量(DTE): $E_{DT} = \frac{1}{2} \sum (u'_{ijk}{}^2 + v'_{ijk}{}^2 + \kappa T'_{ijk}{}^2)$, 其中 u' 、 v' 、 T' 是两次模拟之间的水平风偏差和温度偏差, $\kappa = \frac{C_p}{R} \approx \frac{C_p}{T_r}$, ($T_r = 287 \text{ K}^{-1}$), i, j, k 是 x, y, σ 格点。Tan 等(2004)的工作中也使用了偏差总能量随时间的演变来研究误差增长的非线性机制。在本论文的研究过程中, 也使用偏差总能量作为检验预报改善的一个定量分析工具, 说明检验区内误差减小的情况。

从预报 24 h 检验区内的偏差总能量(图 8)来看, 在前 24 h 内, 偏差总能量是迅速下降的, 而且 sensf-C 的偏差总能量比控制试验小很多。如果不考虑前 6 h 初始场与模式协调过程的偏差总能量,

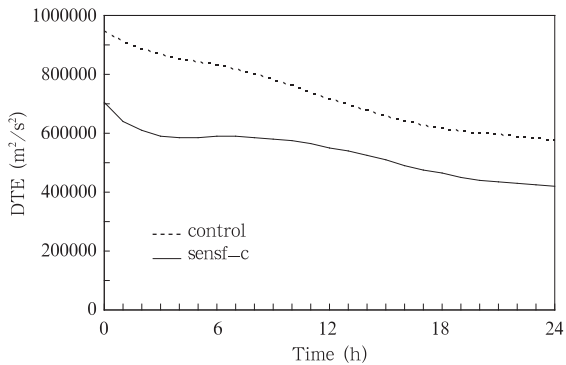


图8 检验区内的偏差总能量(m^2/s^2)随时间的变化
Fig. 8 Evolution of the deviation total energy (DTE, unit: m^2/s^2) in the verification region for the control experiment (dashed line) and the sensf-C experiment (solid line) against the “nature” experiment

sensf-C 在预报 24 h 的时候其偏差总能量相对控制试验减小最多。

无论从定性还是定量的结果来看, 3 个敏感性试验都使检验区内的 24 h 降水量预报有不同程度的改善, sensf-B 和 sensf-C 改进比较明显。

3.3 扩大瞄准区范围对检验区内预报误差的影响

Morss(1999)和 Bergot 等(1999)的工作认为瞄准的范围越大, 预报效果可能越好。因此, 在这里将对瞄准区范围对目标观测效果的影响进行一些初步研究。通过前面的分析, 可见 CNOP 方法确定的瞄准区对改善检验区内的预报有明显的效果。为了考察瞄准范围在目标观测中的影响作用, 我们从范围扩大的瞄准区对检验区内预报误差的潜在减小程度方面进行分析。

针对检验区内 24 h 降水量预报, 使用 3 种引导性变量寻找瞄准区位置时, 通过降低引导性变量的阈值, 分别将瞄准区范围扩大原来的 20% (图 9), 使瞄准区占全场范围的比率由 1.7% 增加到约 2.1%。图 9 给出了 3 个引导性变量识别的瞄准区在范围扩大后的位置图, 阴影范围内是原来约 99 个格点的位置, 实线内是增加格点数之后的瞄准区范围。

本小节设计了 3 个与 3.2 节中 sensf 试验类似的敏感性试验(称为 sizef), 在瞄准区内(图 9)使用没有误差的自然试验的初始场, 瞄准区以外使用控制试验的初始场, 即初始场只在瞄准区内无误差, 模式积分 24 h。自然试验和控制试验与 3.1.2 小节相同。在敏感性试验 sizef 中, 根据采用的瞄准区是使用第 1 种引导性变量(图 9a)、第 2 种引导性变量(图 9b)或第 3 种引导性变量(图 9c)确定的不同, 又将 sizef 对应地分别记为 sizef-A、sizef-B 和 sizef-C。

表 4 给出了检验区内累积降水预报误差方差的定量计算结果, 对于第 1 和第 2 种引导性变量(sizef-A 和 sizef-B), 与瞄准区范围较小时(表 3)相比, 预报效果都有改善, 预报误差方差分别减小约 3% 和 6%, 但是对于第 3 种引导性变量(sizef-C), 瞄准区范围扩大之后, 对检验区内 24 h 累积降水量预报的改善效果略有下降。

综上所述, 增加瞄准区格点数, 有可能使预报效果得到改善, 但是试验结果也同时暗示了单纯靠增加瞄准区范围未必一定能减小预报误差。

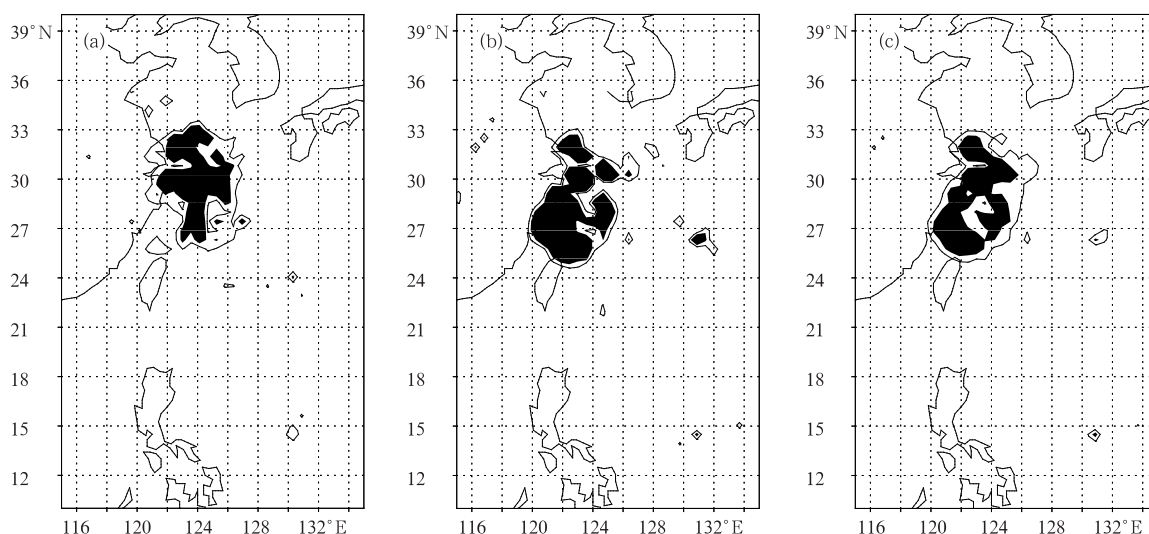


图9 针对检验区内 24 h 降水量预报误差用 CNOP 确定的瞄准区

(a. 试验 sizef-A, b. 试验 sizef-B, c. 试验 sizef-C)

Fig.9 Locations of the targeting area to improve the 24-hour rainfall forecast in the verification region for

(a) sizef-A experiment, (b) sizef-B experiment, and (c) sizef-C experiment

表4 修正扩大后的瞄准区内初始场误差之后检验区内 24 h 降水量预报误差方差
Table 4 The 24-hour rainfall forecast error variance in the verification region for the larger targeting areas after the initial errors in the targeting area are corrected

试验方案	有误差的格点数	占全场格点数的比例	引起的预报误差方差(hPa ²)	与控制试验的比
控制试验	5760	100%	185.8185	0
sizef-A 试验	119	2.1%	146.2202	21.31%
sizef-B 试验	121	2.1%	107.5749	42.11%
sizef-C 试验	120	2.1%	112.8510	39.27%

4 总结与讨论

本文以 0509 号台风“麦莎”为例,用快速算法计算的 CNOP 确定瞄准区,进行台风目标观测研究,对识别瞄准区时使用的不同引导性变量的有效性和瞄准区范围大小对预报误差的影响进行讨论,得到如下的结论。

(1) 在分别针对检验区内 24 h 海平面气压和 24 h 累积降水量预报设计的目标观测试验中,用不同的引导性变量识别的敏感区(即瞄准区)是有差别的,有的比较相近、有的差别较大。总体上看,文中使用的 3 种标准(引导性变量)都是有效的,特别是第 2 和第 3 种的效果更好些,且两者识别的瞄准区

常显示出类似的特点。因此,建议相关的工作中,可以多使用第 2 或第 3 种引导性变量,计算简单而且效果又好。

(2) 在针对检验区内 24 h 降水预报的瞄准区中,提高初始场精度之后,能很好地改善检验区内 24 h 累积降水量的预报效果。

(3) 将瞄准区范围扩大 20% 左右时,在瞄准区内用准确的初始场进行修正的试验结果表明,将瞄准区范围从 1.7% 扩大到 2% 左右时,对于第 1 和第 2 种引导性变量,检验区内 24 h 累积降水预报可以得到进一步的提高,预报误差方差分别再次减小了约 3% 和 6%;但是对于第 3 种引导性变量,检验区内 24 h 累积降水量的预报效果略有下降。Morss (1999) 讨论了理想条件下目标观测的瞄准策略,指出增加瞄准格点数,有可能使预报效果得到改善,也暗示了单纯靠增加了瞄准区的范围未必一定能减小预报误差,这与本文在业务模式下得到的结论是一致的。本文的试验结果也进一步揭示了这一问题,说明了不同的引导性变量对瞄准区范围大小的敏感性各不相同。对不敏感的引导性变量,在实际应用中具有优势,可以选取比较小的瞄准区范围。

在以后的工作中,将使用更多个例,以及其他确定瞄准区的方法来对以上的两个问题进行进一步的分析研究。对于这些问题的讨论,将有助于目标

观测试验的设计和理论上的处理。本文目前还是从理论上进行一些研究,以后将会应用实际观测资料进行进一步的研究。

致谢:感谢中国科学院大气物理研究所 LASG 实验室的穆穆院士给予的细心指导和段晚锁副研究员给予的热心帮助。

参考文献

- 陈德辉,沈学顺. 2006. 新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展. *应用气象学报*, 17(6):773-777
- 陈联寿,丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论. 北京:科学出版社,174-435
- 黄伟,端义宏,薛纪善等. 2007. 热带气旋路径数值模式业务试验性能分析. *气象学报*, 65(4):578-587
- 冀春晓,陈联寿,赵放. 2007. 登陆台风 Matsa 维持机理的数值研究. *气象学报*, 65(6): 888-895
- 穆穆,王洪利,周非凡. 2007. 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. *大气科学*, 31(6):1102-1112
- 王斌,谭晓伟. 2009. 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检验. *气象学报*, 67(2): 175-188
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文等. 1992. 天气学原理和方法. 北京:气象出版社,521-550
- Aberson S D. 2002. Two years of operational hurricane synoptic surveillance. *Wea Forec*, 17:1101-1110
- Aberson S D, Franklin J L. 1999. Impact on hurricane track and intensity forecasts of GPS dropwindsonde observations from the firstseason flights of the NOAA Gulfstream-IV jet aircraft. *Bull Amer Meteor Soc*, 80: 421-427
- Bergot T. 1999. Adaptive observations during FASTEX: A systematic survey of upstream flights. *Quart J Roy Meteor Soc*, 125: 3271-3298
- Bergot T, Hello G, Joly A, et al. 1999. Adaptive observations: a feasibility study. *Mon Wea Rev*, 127: 743-765
- Bishop C H, Toth Z. 1999. Ensemble transformation and adaptive observations. *J Atmos Sci*, 56: 1748-1765
- Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J. 2001. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretical aspects. *Mon Wea Rev*, 129: 420-436
- Boybeyi Z, Bacon D P, Kaplan M L. 2002. The Use of Adaptive (targeted) Observations in Operational Numerical Weather Forecasting. Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference Proceedings
- Buizza R, Montani A. 1999. Targeted observations using singular vectors. *J Atmos Sci*, 56: 2965-2985
- Burpee R W, Franklin J L, Lord S J, et al. 1996. The impact of Omega dropwindsondes on operational hurricane track forecast models. *Bull Amer Meteor Soc*, 77: 925-933
- Duan W-S, Mu M, Wang B. 2004. Conditional nonlinear optimal perturbation as the optimal precursors for El Niño-Southern oscillation events. *J Geophys Res*, 109: D23105, doi:10.1029/2004JD004756
- Langland R H, and Coauthors. 1999a. The North Pacific Experiment (NORPEX-98): Targeted observations for improved North American weather forecasts. *Bull Amer Meteor Soc*, 80: 1363-1384
- Langland R H, Gelaro R, Rohaly G D, et al. 1999b. Targeted observations in FASTEX: Adjoint-based targeting procedures and data impact experiments in IOP 17 and IOP 18. *Quart J Roy Meteor Soc*, 125: 3241-3270
- Majumdar S J, Aberson S D, Bishop C H, et al. 2006. A comparison of adaptive observing guidance for Atlantic tropical cyclones. *Mon Wea Rev*, 134: 2354-2372
- Majumdar S J, Aberson S D, Etherton B J, et al. 2002a. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part II: Field program implementation. *Mon Wea Rev*, 130: 1356-1369
- Majumdar S J, Aberson S D, Buizza R, et al. 2002b. A comparison of ensemble transform Kalman filter targeting guidance with ECMWF and NRL total energy singular vector guidance. *Quart J Roy Meteor Soc*, 128: 2527-2549
- Morss R E. 1999. Adaptive observations: Idealized sampling strategies for improving numerical weather prediction [D]. Massachusetts Institute of Technology, 225pp. [Available from private correspondence]
- Mu M, Duan W S, Wang B. 2003. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications. *Nonlinear Processes Geophys*, 10: 493-501
- Palmer T N, Gelaro R, Barkmeijer J, et al. 1998. Singular vectors, metrics, and adaptive observations. *J Atmos Sci*, 55: 633-653
- Szunyogh I, Toth Z, Morss R E, et al. 2000. The effect of targeted dropsonde observations during the 1999 winter storm reconnaissance program. *Mon Wea Rev*, 128: 3520-3537
- Szunyogh I, Toth Z, Emanuel K A, et al. 1999. Ensemblebased targeting experiments during FASTEX: The effect of dropsonde data from the Lear jet. *Quart J Roy Meteor Soc*, 125: 3189-3217
- Tan Z-M, Zhang F, Rotunno R, et al. 2004. Mesoscale predictability of moist baroclinic waves: experiments with parameterized convection. *Amer Meteor Soc*, 61: 1794-1804
- Toth Z, Szunyogh I, Majumdar S J, et al. 1999. The 1999 Winter Storm Reconnaissance Program//Preprints, 13th Conf on Numerical Weather Prediction. Denver, CO, Amer Meteor Soc, 27-32
- Wu C C, Chen J H, Lin P H, et al. 2007. Targeted observations of tropical cyclone movement based on the adjoint-derived sensitivity steering vector. *J Atmos Sci*, 64: 2611-2626
- Wu C C, et al. 2005. Dropwindsonde observations for typhoon surveillance near the Taiwan region (DOTSTAR): An overview. *Bull Amer Meteor Soc*, 86: 787-790
- Zhang F, Snyder C, Rotunno R. 2003. Effects of moist convection on mesoscale predictability. *J Atmos Sci*, 60: 1173-1185