

风廓线与测风塔资料在地面风场预报中的应用研究

张红华¹ 王桂臣^{1*} 曾明剑² 王鹏¹ 杨晓峰¹

(1 江苏省连云港市气象局, 连云港 222006; 2 江苏省气象科学研究所, 南京 210009)

摘要 运用四维同化方法将风廓线雷达和测风塔资料应用到 WRF 模式中, 通过对比资料同化前后模式对地面风场的预报效果可知, 加入风廓线雷达和测风塔资料后模式对风速的预报效果有明显提高, 对风向的预报也有一定程度的改善; 资料同化结束后, 模式预报在 49 h 内对地面风场预报效果仍有明显改善, 但随着模式预报时间的增加, 在模式积分 49 h 以后, 同化资料前后模式对地面风场的预报效果无明显变化。另外, 通过对资料同化前后模式对风速预报误差的分析可知, 在对模式风场预报的改进中风廓线雷达资料的贡献大于测风塔资料的贡献。

关键词 风廓线雷达 测风塔 四维同化 地面风场 WRF 模式

引言

随着工业的发展, 雾霾天气过程越来越多, 对人类生活及健康的影响也越来越严重, 因此, 对大气污染物扩散的研究也日益受到重视, 而大气边界层中的风场和温度场结构特征直接影响大气污染物的输送和扩散^[1]。D. L. Rife 等^[2]在 2004 年对低层风场的预报研究中提及由于大气污染物的排放不断增加, 精确的大气传输和扩散预报技术也越来越重要。另外, 在资源耗费巨大的今天, 风作为一种可再生资源也日益受到重视, 而风电预测系统准确率的提高, 很大程度上依赖于对风场的预报准确率的提高, 在业务上, 风场预报准确与否将直接关系到温度预报的准确率, 同时也关系到天气系统, 尤其是中小尺度系统的生消及持续情况。因此, 对地面风场的准确预报不仅是气象业务发展的需要, 同时关系到社会民生的方方面面。

当前对于风场的预测方法有两种: 一是统计的方法, 二是数值预报的方法。统计的方法是对已有规律的外延, 回报准确率高, 预报准确率偏低, 以统计为基础的预测模型的预报存在有效预报时效短的

缺点, 而借助于数值天气预报可有效延长预测时间, 目前的数值模式在 72 h 内的预测准确率达到到了 80% 以上^[3]。由于风场是天气系统、地形和地面非绝热加热等要素共同作用的产物, 因此, 在预报中综合各种物理方程为基础的数值天气预报成为预报风场最有效的方法之一。同时风场预报准确率的提高一定程度上也依赖于数值预报准确率的不断提高。

D. L. Rife 等^[4]评估了数值模式对风场变化的模拟效果, 认为数值模式模拟结果与实际观测基本一致, 且数值模式分辨率的提高可以提高模式对复杂地形区域的模拟效果; Welsh 等^[5]用 WRF 模式和 LAPS 同化本地资料预报佛罗里达大拐弯地区的 2003 年夏季气象要素, 结果发现 WRF 模式对风的预报明显好于 Eta 模式, 王舒畅等^[6]将 WRF 模式和 MM5 模式对江淮梅雨锋暴雨的模拟进行对比, 结果表明 WRF 模式对低空急流的风向风速的模拟好于 MM5 模式。安兴琴等^[7]用 WRF 模式对金塔绿洲边界层进行模拟, 结果表明 WRF 模式在边界层风场的日变化的模拟中有较好表现。苑海燕等^[8]对“神舟六号”飞船着陆时段主着陆场区风场进行数值模拟, 主着陆场区风场的数值模拟结果显示,

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906003, GYHY201106006, GYHY201206004)、江苏省气象局精细化预报科技创新团队基金、江苏省气象局青年基金项目(Q201104)、连云港市社会发展项目(SH1013, SH1207)、江苏省科技厅社会发展项目(BE2011720)、江苏省科技厅科技支撑计划(BE2013730) 共同资助

作者简介: 张红华, 女, 1979 年生, 硕士, 工程师, 主要从事数值模式和天气预报技术研究, Email: zhhzhiteng@163.com

收稿日期: 2013 年 5 月 20 日; 定稿日期: 2014 年 2 月 8 日

* 通信作者, Email: wgczzh@163.com

WRF 模式所预报的地面风和浅层风的风速、风向正确率较高,对于影响高空和地面风场的主要系统的发展、移动和减弱都有较好的模拟效果。

风廓线雷达是高空探测系统的重要组成部分,其探测资料很大程度上补充了探空站密度低的不足,为进一步了解天气系统的发展,研究天气系统的物理机制提供重要保障。国内对于风廓线雷达资料的应用进行了很多前期的工作,孙旭映等^[9]分析了风廓线仪探测风场资料的可靠性,研究结果表明风廓线仪探测的风向、风速与气球探测的风向风速值有一定偏差,但 200 m 高度以上风廓线仪和气球探空所测得的风场廓线具有很好的相关性。邓闯等^[10]对风廓线雷达 5 波束探测模式的数据进行测风精度评估分析,为日后 5 波束风廓线雷达资料的使用奠定了基础。江苏省连云港于 2012 年安装了边界层风廓线仪,风廓线资料在暴雨预报及物理机制分析中发挥了相当大的作用,张胜军等^[11]将风廓线雷达资料,通过 nudging 技术同化到模式中,一定程度上改善了对降水的数值模拟结果。董保举等^[12]对风廓线雷达资料在暴雨过程中的特征进行分析。在风廓线雷达资料的处理方面,惠建新等^[13],对风廓线雷达普数据的处理方法进行了探讨,研究了提高风廓线雷达探测范围和精度的方法。测风塔资料在风功率的计算方面具有重要作用,王志春等^[14]通过对测风塔资料的分析,研究了 10 m 风速资料计算风功率密度的方法。

连云港地处江苏省的东北端,境内以平原为主,兼有丘陵、山地、湖泊、滩涂等。海岸线绵延 167 km,大小山峰有 214 座,其中云台山主峰玉女峰海拔 624.4 m,为江苏省的最高峰。复杂的地理环境造成了连云港地区风场的复杂性,增加了连云港地区风场预报难度,尤其是沿海地区风场的预报难度更大。连云港田湾核电站的存在,沿海风能发电厂的建立,都要求对风场有准确的预报。研究表明,WRF 模式对地面风场有比较好的模拟效果,且风廓线雷达资料的使用可以一定程度上改进模式的模拟效果。为了更好的利用风廓线雷达和测风塔资料,解决目前地形资料精细程度不能完全反映连云港地理环境复杂性的情况下,如何进行连云港地区风场的预报问题,本文通过对 2012 年台风“达维”登陆时风场的情况的模拟研究,分析 WRF 模式对连云港

近地面风场的预报效果,并讨论风廓线雷达资料和测风塔资料在预报连云港地面风场中的作用。

1 资料与方法

1.1 资料

本文所用的分析资料采用国家气象中心下发的常规资料,包括地面和高空资料,其时间分辨率分别为 1 h 和 12 h。模式背景场资料采用美国 NCEP 提供的每 6 h 一次的 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料。用于对比分析的实况资料是连云港市自动站提供的风向、风速观测数据。

采用连云港市风廓线雷达和连云港与盐城沿海 9 个测风塔站,提供的 2012 年 7 月 31 日 12:00(世界时,下同)至 8 月 1 日 00:00 的 1 h 1 次的风向、风速、气压和气温等观测资料。风廓线雷达和测风塔的大致分布为,新埔站距离测风塔站的最近距离约 40 km,测风塔之间最小距离约 20 km,最大距离约 110 km。

连云港站风廓线雷达是对流层 5 波束雷达,使用的资料为该雷达提供的 3000 m 以下的产品数据中的风向、风速观测资料,其水平风的计算方法如下:

$$u = \frac{v_{re(w)} - \omega \cos \theta}{\sin \theta}, v = \frac{v_{rs(n)} - \omega \cos \theta}{\sin \theta}$$

$$v_h = \sqrt{u^2 + v^2}, \varphi_h = \arctan \frac{u}{v}$$

其中, u 、 v 为水平风分量, v_h 为水平风速, φ_h 为风向, $v_{re(w)}$ 为东西波束径向速度, $v_{rs(n)}$ 为南北波束的径向速度, θ 为倾斜波束的天顶角。

1.2 方法

1.2.1 资料的选取

测风塔资料的选取以测风塔本身提供的数据质量统计分析结果为依据,如表(表 1)所示,提取数据质量超过 90% 的数据,实际上在所选的过程中数据质量除二罍站为 72.7%,被剔除外,仅有东沙港站的可靠性为 97.75%,其余的各站的数据可靠性均为 99%~100%。通过分析,风廓线资料资料在 3000 m 以下的产品数据中水平方向的可信度较高,因此,仅使用 3000 m 以下的风廓线雷达产品数据,且对 3000 m 以下数据中,水平方向可信度低于 85% 的数据进行剔除。

表 1 测风塔数据质量

项目	九里	青口盐场	徐圩	二罾	东沙港	东川垦区 1	东川垦区 2	东川垦区 3	北凌垦区
可疑错误次数	0	0	0	107	9	0	4	0	0
数据正确次数	400	400	398	285	391	400	396	400	400
可靠性/%	100	100	100	72.7	97.75	100	99	100	100

1.2.2 模式设置及试验方案

采用美国环境预测中心(NCEP)等美国科研机构开发的中尺度预报模式 WRF V3.3 版本。模式设定如下:模式中心为 117.5°E,32.5°N,三重双向嵌套,水平格点数分别为 91×101、97×112、100×157,格距为 27 km、9 km 和 3 km,垂直层数设为 52 层,着重加密近地面层,分区和测站分布情况如图 1。

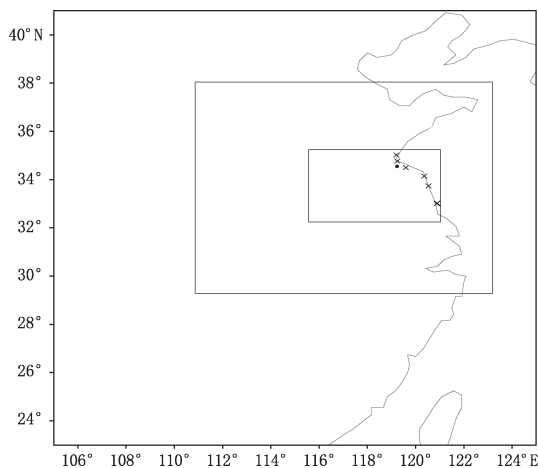


图 1 模式分区及同化测风塔(×)和风廓线雷达(·)分布

试验同化测风塔和风廓线资料的方法采用四维同化方法,四维同化方法是一种连续性的动力同化方法,它通过对模式控制方程的强迫使模式值逐步逼近观测值,这种修正过程中模式在每一时间步长都保持各要素场之间的平衡。本文同化的资料为站点资料,在四维同化中站点同化方案是以每一时间步上的站点资料为中心点,提前确定时间窗口内的观测值。模式值与观测值之间的差来自观测点上计算,然后把它分析到观测点周围的格点上去。对某一变量 α ,倾向方程为:

$$G_a P^* \frac{\partial P^* \alpha}{\partial t} = F(\alpha, X, t) + \frac{\sum_{i=1}^N W_i^2(X, t) \gamma_1(\alpha_0 - \alpha^-)}{\sum_{i=1}^N W_i(X, t)} \quad (1)$$

$$W(x, t) = w_{xy} w_\sigma w_t \quad (2)$$

$$\begin{cases} w_{xy} = \frac{R^2 - D^2}{R^2 + D^2} & 0 \leq D \leq R \\ w_{xy} = 0 & D > R \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} w_t = 1 & |t - t_0| < \frac{\tau}{2} \\ w_t = \frac{\tau - |t - t_0|}{\tau/2} & \frac{\tau}{2} \leq |t - t_0| \leq \tau \end{cases} \quad (4)$$

其中,其中 X 是空间变量, t 是时间, α 是模式的积分变量,公式(1)右端第 1 项 $F(\alpha, X, t)$ 为物理强迫项(平流、科里奥利力、物理过程等),第 2 项为同化项,其中 G_a 为逼近因子,它决定了模式中同化项相对于物理强迫项中所有模式物理过程的大小; W 为四维权重函数,它决定着同化的空间、时间的变化,由式(2)、(3)和(4)确定,其中式(3)中的 R 是影响半径, D 是格点离站点的距离,式(4)中的 t 为时间窗口;下标 i 为距某一个格点一定距离内的所有观测点数 N 中的第 i 个观测点; α_0 是变量的 α 观测值, α^- 是模式诊断变量在三维空间中插值到观测点位置处的值, γ 为观测资料的质量因子。

试验分为 3 步:①使用 WRF 模式对台风“达维”登陆前后连云港地区的地面风场进行模拟;②通过四维同化的方式逐小时加入测风塔实测资料;③通过四维同化的方式加入测风塔和风廓线实测资料,具体如图 2 所示,从模式运行开始逐小时加入风廓线雷达或测风塔资料,在同化 12 h 后停止加入外部资料,并继续积分至模式运行结束。

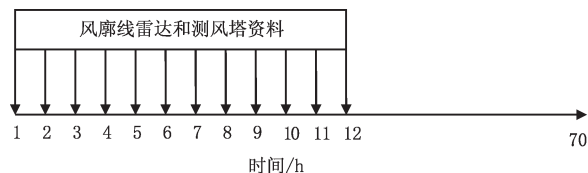


图 2 同化风廓线雷达和测风塔方案

将 3 次试验的结果进行对比,分析测风塔资料和风廓线雷达资料对模式模拟地面风场效果的影响。

2 结果分析

2.1 天气形势及实况

2012年7月31日12:00,淮北地区500 hPa处于588线控制之下,我国的东部洋面上有两个台风存在,2012年9号台风“苏拉”位于台湾以东洋面(124.2°E,21.6°N),中心最低气压970 hPa,10号台风“达维”位于137.1°E,29.0°N,中心最低气压980 hPa,随后副高东撤,9号、10号台风均向西北方向移动,在河套地区有西风槽东移。8月2日00:00,副高进一步北抬东撤,10号台风迅速向西偏北方向移动至江苏东部洋面,此时全省均处于台风两侧的偏北风场的控制下。10号台风“达维”于2日13:30左右在响水县陈家港镇附近登陆,登陆后继续向西北方向移动,14:00台风“达维”中心经燕尾港进入连云港市境内。

台风经过时连云港市西连岛站、北固山站和开山岛站均出现了44.4 m/s的瞬时极大风速,从风力的分布上来看连云港北部沿海风力最大,东海县风力相对较小。

2.2 模拟结果对比分析

2.2.1 西连岛站和新浦站同化前后预报效果

西连岛站7月31日12:00至8月3日09:00逐小时风速时间序列(图3a)可知,风速在2日08:00至20:00风速迅速增大至31.6 m/s,随后逐渐减小14.5 m/s,出现风速峰值时间为2日15:00。根据数值预报的风速时间序列(图3a)可知,模式预报风速也呈单峰型分布,整个预报时段内以数值预报风速大于实际风速为主,在台风影响时预报风速小于实际风速,且从预报效果来看,模式对于风速预报在48 h以内有较好的效果,但在风速变化趋势方面表现并不明显。

比较西连岛站同化测风塔和风廓线雷达资料前后模式对风速的预报效果可知,同化刚开始的9 h内,模式预报的风速有较为明显的变化,且从预报效果上讲同化测风塔和风廓线雷达资料后模式预报风速不如同化前。但模式在继续同化的3 h之内,同化后模式的预报误差迅速减小,跟风速实况的最大误差约为1 m/s,随后停止同化。从预报结果来看,模式在停止同化后对风速的变化还有一段适应过程,从模式预报24 h开始至预报47 h,预报误差和预报风速变化趋势均有了明显的改善,其预报效果

明显优于未同化风廓线雷达资料模式预报结果,该段时间内同化前模式的平均预报误差为1.8 m/s,而同化后模式的平均预报误差为0.4 m/s。48 h以后同化风廓线雷达和测风塔资料前后的模式预报效果和变化趋势基本趋于一致,这表明开始的12 h资料同化对于地面风场的影响基本结束。

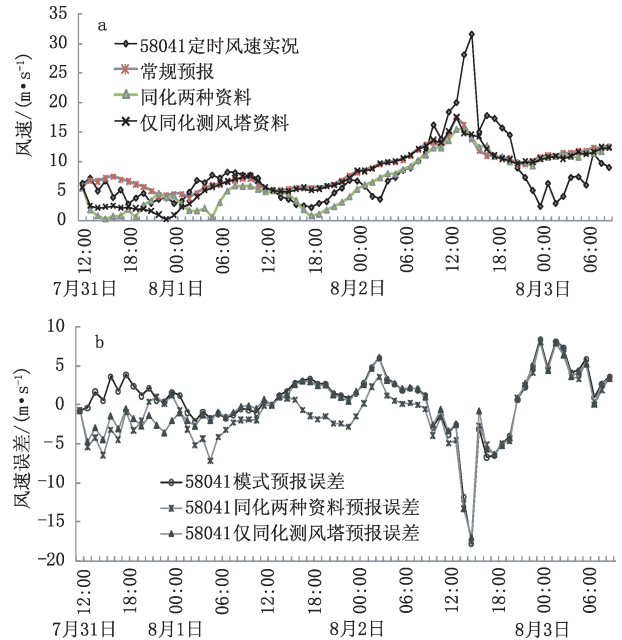


图3 2012年7月31日12:00至8月3日09:00西连岛站(58041)逐小时风速时间序列(a),资料同化前后西连岛站风速误差(b)

对于西连岛站仅同化测风塔资料,模式对于风速的预报16 h以内比未同化任何资料的模式预报结果偏低,从17 h开始同化测风塔资料后模式的预报结果与未同化任何资料的模式预报基本相同,从误差的情况来看(图3b),在西连岛站测风塔资料同化对于模式在最初8 h的预报误差比同化两种资料的误差小。

由于所用的测风塔资料均位于沿海一带,在新浦站用于资料同化的仅有新浦站的风廓线雷达资料,为了研究风廓线雷达和测风塔资料同化后模式预报在同化资料密度不同区域的反映,对新浦站的风速预报效果进行分析。新浦站风速在预报时段内变化较大,最小出现在1日23:00,风速为0 m/s,最大出现在2日17:00和18:00,风速为13.4 m/s。从风速变化趋势上看,2012年7月31日13:00至8月3日09:00(图4a)风速呈双峰型,第1次峰值出现在1日08:00,第2次峰值出现在2日17:00。从

数值预报结果来看, 同化风廓线雷达和测风塔资料前后, 模式均预报出了风速变化的双峰结构, 区别在于同化风廓线雷达和测风塔资料前, 模式预报风速变化较为平稳, 对主要趋势的变化情况预报较好, 但对于较为细致的风速逐时变化表现不明显, 这与背景场资料的时空分辨率有密切关系。同化风廓线雷达和测风塔资料后, 模式在 12~38 h 内对风速变化趋势的预报更接近实况。从风速预报误差来看(图 4b), 同化后模式预报 25~48 h 内模式的预报误差明显小于同化前模式的预报结果。从 54 h 开始同化前后模式的预报误差和变化趋势趋于一致, 即对本次过程来说, 风廓线雷达和测风塔资料对新浦站预报结果的影响较西连岛站长。比较同化风廓线雷达和测风塔资料前后 48 h 风速预报平均误差可知, 同化前模式预报风速的误差为 1.8 m/s, 远大于同化后模式预报风速的误差 0.1 m/s。

从仅同化测风塔资料的情况来看, 在同化测风塔资料的前 12 h 内, 模式对风速的预报有所反应, 同化结束 2 h 后, 模式对于新浦站的风速预报与未同化模式的预报结果基本相同, 无明显区别。从预报误差来看(图 4b), 同化两种资料的模式对风场的预报误差小于仅同化测风塔资料模式预报结果。

综上所述, 同化测风塔和风廓线雷达资料后, 沿海的西连岛站和内陆新浦站, 模式对站点风速的预报效果均有较为明显的改善, 尤其是在模式预报 13~48 h, 模式预报风速值和变化趋势效果均较同化前更接近实际, 在 49 h 以后资料同化对模式预报效果的影响不大。

2.2.2 同化前后预报场比较

根据上述分析, 分别对预报 12 h、25 h 和 49 h 的地面风场进行分析, 主要研究资料同化风廓线雷达和测风塔资料后模式对整个预报区域内风场的影响。

由图 5a, b 可知同化风廓线雷达和测风塔资料前后模式预报的风场变化较大, 在同化前风向为一致的东南气流, 在同化后模式预报区域的中部出现了一个反气旋, 也因此使得预报区域的北部地区风向误差较大, 在地面实况图(图 5a)上大部分地区是偏东风, 沿海及海上是东南风, 陆上沿海地区个别转为西南风, 且在灌南的南部有明显的小尺度的地面气旋和反气旋存在。因此, 从风向上来看, 资料同化在地面小尺度系统的预报方面有一定的正作用, 但

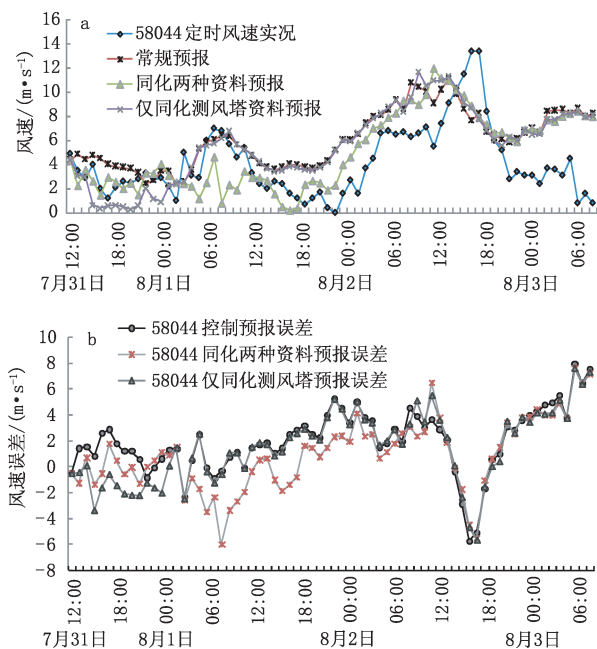


图 4 2012 年 7 月 31 日 12:00 至 8 月 3 日 09:00 新浦站(58044)逐小时风速时间序列(a), 资料同化前后新浦站风速误差(b)

由于同化站数有限, 模式对整个区域风向的预报效果并不十分理想, 同化风廓线雷达和测风塔资料后模式在沿海岸线地区的风向有明显的变化。

风速等值线图(图 6a, b), 同化前后模式预报风速场分布有明显的区别, 同化前全市及周边地区的风速大都在 3 m/s 以上, 仅有连云港东部地区有较小范围的风速小值区; 同化后模式预报的连云港市风速明显小于其他地区, 除位于预报边界赣榆及其北部地区外, 风速大值区主要位于沿海地区和一条西北东南走向的风速带上。而根据实况(图 7a), 本市及周边大部分地区的风速小于等于 2 m/s, 风大的区域主要位于连云港市的东部城区和海岸线上, 在同化后模式预报的西北东南走向风速带上共有 6 个站的风速在 4 m/s 左右。

2012 年 8 月 1 日 12:00(模式预报 25 h)同化风廓线雷达和测风塔资料前后模式的预报效果与 8 月 1 日 07:00(图略)的差别类似, 同化前后模式预报风向(图 5c, d)均为较为一致的偏东气流, 同化前模式预报连云港范围内风向主要是偏东风, 而海上为东北风, 同化后模式预报连云港范围内主要以东风或东南风为主, 海上为东南风, 这与实况风场(图 7b)较为一致。资料同化后模式预报的风速(图 6d)较同化前(图 6c)有明显的减小, 且预报出了海上及沿

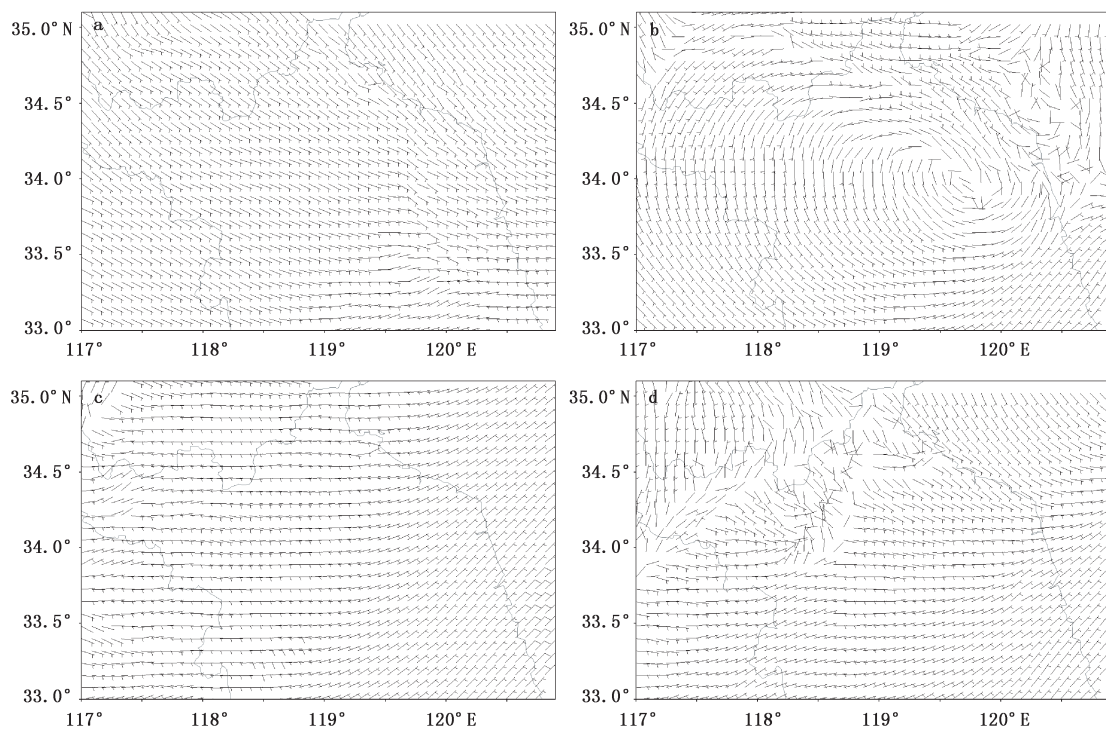


图5 2012年7月31日23:00风场在资料同化前(a)、同化后(b)和
8月1日12:00风场在资料同化前(c)、同化后(d)

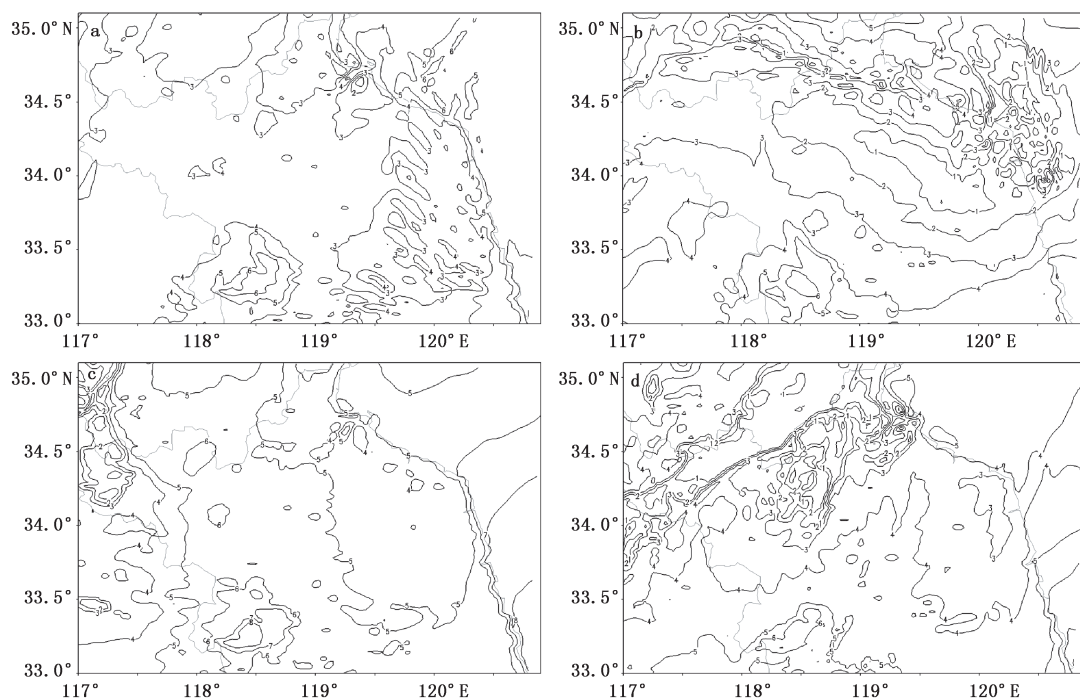


图6 2012年7月31日23:00风速(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)在资料同化前(a)、同化后(b)和
8月1日12:00风速在资料同化前(c)、同化后(d)

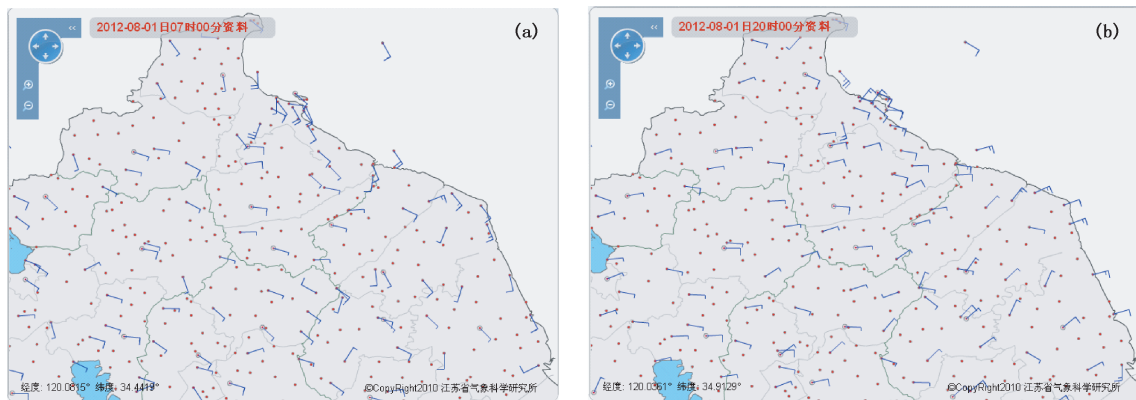


图 7 台风“达维”影响期间风场实况:(a)2012 年 7 月 31 日 23:00,(b)2012 年 8 月 1 日 12:00

海风速相对较大的特点。

模式预报 49 h 的结果(图略)显示无论同化风廓线和雷达资料与否,模式对台风位置的预报都略有偏西偏南,一定程度上决定了模式对风向预报的效果。从风速预报的情况来看,同化前后模式预报的效果具有一定的相似性。

2.2.3 同化风廓线雷达和测风塔资料影响范围

由同化测风塔资料前后(图 8a,b)模式对风场预报误差图可知,同化测风塔资料后连云港地区风速的预报误差有一定程度的降低,未同化测风塔资料前风速预报误差最大中心在 3 m/s,同化测风塔资料后除了赣榆西北角外,最大误差中心为 2 m/s。风速预报在整个连云港地区都有一定程度的改进,但改进的效果还有待于进一步提高。

根据同化风廓线雷达资料前后模式对风速预报误差图(图 9a,b)来看,除赣榆西北角外,同化风廓

线雷达资料后,模式对连云港地区风速的预报误差明显减小,改善最大地区风速误差减小 2 m/s,在赣榆西北角风速误差在 3 m/s 以上的范围明显减小。分析原因可能是由于赣榆西北角地形变化,使得同化风廓线雷达资料后模式对风速的预报误差增加。

比较各时刻风速同化风廓线和同时同化两种资料的模式预报风速误差(图略)可知,同时同化两种资料 and 同化测风塔资料对模式风速预报误差的影响效果类似,即在同时同化两种资料时,风廓线雷达资料在同化后模式对风场的预报中占据主要作用,且在整个过程中模式同化风廓线资料对沿海地区误差的改进较同化测风塔资料慢,这可能与测风塔的位置有很大的关系。

从影响范围来看,模式在同化测风塔和风廓线资料时,均对连云港整个地区有一定的改进,但效果有所不同,且影响时间也有所差异。

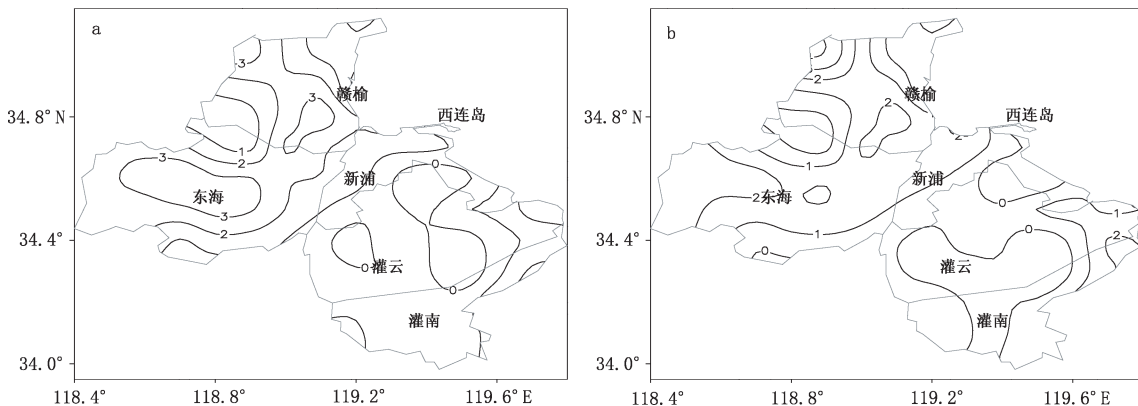


图 8 未同化预报(a)和测风塔同化后(b)模式风场预报误差(单位: $m \cdot s^{-1}$)

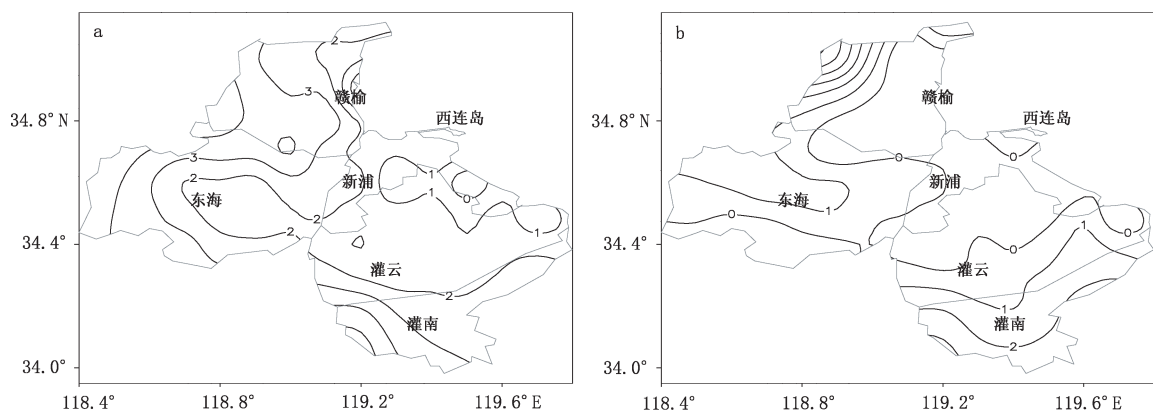


图9 未同化(a)仅同化风廓线雷达(b)模式风场预报误差(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

3 结论和讨论

通过分析同化风廓线雷达和测风塔资料前后模式预报风速和风向的情况得出以下结论:

(1)同化测风塔和风廓线雷达资料,可改善对地面风场的预报,对风速预报改善的结果尤其明显,资料同化后模式对中小尺度系统有一定的反应。

(2)同化风廓线雷达和测风塔资料 12 h 后,模式的预报效果在预报 49 h 内有较为明显的改善,随后同化前后模式的预报效果趋于一致。

(3)资料同化后模式对测风塔资料较为密集的沿海一带的风向和风力的预报效果明显好于资料同化前模式的预报效果。

(4)风廓线雷达和测风塔资料在对模式风场预报的改进中风廓线雷达资料的贡献大于测风塔资料的贡献。

本文进行了台风“达维”登陆连云港前,同化风廓线雷达和测风塔资料的试验,由于同化资料仅有 8 个沿海测风塔站观测资料和 1 个风廓线雷达资料,模式的预报效果有了明显的改善,要使模式对地面风场预报准确率得到更进一步的提高,需要将更多的自动观测资料同化到模式,同化后模式的预报效果还需要更多的试验和分析。

致谢: 特别感谢南京信息工程大学管兆勇教授在模式及方法方面给予的无私帮助和悉心指导。

参考文献

[1] 蒋维楣,苗世光,张宁,等.城市气象与边界层数值模拟研究

[J].地球科学进展,2010,25(5):463-473.

[2] Rife D L, Davis C A, Liu Yubao. Predictability of low level winds by mesoscale meteorological models [J]. Monthly Weather Review, 2004,132: 2553-2569.

[3] Kalnay E. Atmospheric Modeling Data Assimilation and Prediction [M]. Cambridge, United Kingdom, 2003:1-3.

[4] Rife D L, Davis C A. Verification of temporal variations in mesoscale numerical wind forecasts [J]. Monthly Weather Review, 2005, 133: 3368-3381.

[5] 章国材.美国 WRF 模式的进展和应用前景[J].气象,2004,30(12): 27-31.

[6] 王舒畅,季亮,潘晓滨,等.一次梅雨锋暴雨过程的中尺度对比模拟分析[J].气象科学,2005,25(6): 569-578.

[7] 安兴琴,吕世华.金塔绿洲大气边界层特征的数值模拟研究[J].应用气象学报,2006,17(4): 403-411.

[8] 苑海燕,杜继稳,侯建忠,等.“神舟六号”飞船着陆时段主着陆场区风场的数值模拟[J].气象科学,2008,28(1): 56-61.

[9] 孙旭映,韩晖,段海霞,等.风廓线仪与气球测风资料的对比分析[J].干旱气象,2008,26(3): 48-52.

[10] 邓闯,阮征,魏鸣,等.风廓线雷达测风精度评估[J].应用气象学报,2012,23(5): 523-533.

[11] 张光智,徐祥德,王继志,等.“中国登陆台风外场科学试验”风廓线仪探测资料在四维同化中的初步应用研究[J].应用气象学报,2004,15(增刊):110-115.

[12] 董保举,付志嘉,李明,等.风廓线雷达资料在暴雨天气过程特征分析中的应用[J].气象科技,2012,40(1):74-78.

[13] 惠建新,吴蕾,高玉春,等.基于极大似然算法的风廓线雷达谱矩估计[J].气象科技,2012,40(1):9-14.

[14] 王志春,丁凌云,黄天宋,等.利用 10 m 高度风速推算风机轮毂高度平均风功率密度[J].气象科技,2012,40(4):680-684.

Application of Wind Profile and Wind Tower Data in Surface Wind Field Prediction

Zhang Honghua¹ Wang Guichen¹ Zeng Mingjian² Wang Peng¹ Yang Xiaofeng¹

(1 Lianyungang Meteorological Service, Jiangsu, Lianyungang 222006;

2 Jiangsu Institute of Meteorological Science, Nanjing 210009)

Abstract: Using the four-dimensional data assimilation method, the wind profile radar and wind tower data are applied to the WRF model, and the comparison of the prediction effects before and after data assimilation of the surface wind field shows that wind speed forecasting is improved obviously after using the wind profile radar and wind tower data model, and the wind direction prediction is also improved to a certain extent; after the data assimilation, the model prediction within 49 hours of the surface wind field is also improved obviously, but there is no obvious variation in the effectiveness of assimilation data in the surface wind field prediction before and after data assimilation with the increased model lead time after 49 hours. By analyzing the errors of the WRF model in wind speed prediction before and after data assimilation, it is shown that the contribution of profile radar data is much greater than that of wind tower data.

Key words: wind profile radar, wind tower, data assimilation, surface wind, WRF model