

基于观测与数值模式互动的华东地面气象观测站遴选布局

查亚峰¹ 李佰平² 孙敏² 何筱川³ 刘梦娟² 孙娟³ 江漫² 茅懋²

(1 上海市气象局, 上海 200030; 2 上海中心气象台, 上海 200030; 3 上海市气象信息与技术支持中心, 上海 200030)

摘要: 采用WRF四维变分同化系统, 针对华东地区台风、梅雨、强对流典型天气个例, 设计开展了不同密度地面站数据同化敏感性试验, 并综合评估了对数值预报的影响, 得出能较好满足数值预报需求又经济高效的华东地面站布局。结果表明: (1) 地面站资料对中尺度数值预报模式在华东区域的预报结果有直接影响, 且以正贡献为主, 总体而言同化站点越密, 改进效果越好。(2) 华东地面站平均布局间距在20 km时出现对数值模式影响正贡献相对高值。(3) 地面站对数值模式影响的程度和效果与天气系统的特点有直接关系。(4) 在华东地区现有区域站中, 遴选1532个增补到519个国家站网中, 形成总站数2051个、平均间距约20 km、天气系统关键区适度加密的华东地面站网, 在控制站网规模的同时, 能较好地满足区域数值预报需求。

关键词: 地面气象观测站, 四维变分同化, 地面站遴选

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.06.014

AWS Selection and Layout in East China Based on the Interaction with Observation and Numerical Weather Prediction

Zha Yafeng¹, Li Baiping², Sun Min², He Xiaochuan³, Liu Mengjuan², Sun Juan³, Jiang Man², Mao Mao²

(1 Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030 2 Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030 3 Shanghai Meteorological Information and Technology Support Centre, Shanghai 200030)

Abstract: In this paper, an assimilation sensitivity test is designed and performed, which focuses on typhoon, Meiyu and severe convective weather in East China, by using WRF4D-VAR assimilation method. By evaluating the impact of AWS data on NWP with different AWS density conditions, a reasonable layout of AWS in East China is proposed. It can scientifically and efficiently meet the needs of regional NWP. The study shows that: (1) AWS data has a positive correlation with the performance of NWP in East China. The greater the AWS density is, the better the NWP's positive effect will be. (2) The correlation coefficient presents a relatively high value when the average distance between different stations is about 20KM. (3) The impact of the AWS on the NWP is directly related to the characteristics of different weather systems. (4) A relatively reasonable layout of AWSs in East China is proposed that there are total sites, include 519 national stations and 1532 regional stations with average distance about 20KM, while the density is slightly greater for the key areas.

Keywords: surface automatic weather station, 4D-VAR, AWS selection

0 引言

中国气象局《综合气象观测系统发展规划(2014—2020年)》提出, 要利用数值预报模式, 通过预报对观测资料的敏感性研究, 分析评估观测系统变化对预报的影响, 开展基于适应性观测的观测站网和重大技术装备布局设计与优化研究。

华东地区现有国家地面天气站(简称国家站)

519个, 构成了空间分辨率平均为39.4 km的基本气象要素观测网, 对天气、气候监测和预报起到支撑作用。然而国家站的密度不足以监测中小尺度灾害天气, 也无法满足高分辨率数值预报系统对资料同化的应用和检验需求。华东区域气象观测站(简称区域站)迅速发展, 对地方政府服务形成支撑。但同时也存在区域站环境和仪器建设、运行维护水平和观测数据质量等参差不齐的情况, 使得区域站观测资料难以得到有效利用, 特别是数值预报系统, 对区域站观测资料的同化应用非常有限。遴选一批区域站, 与现有

收稿日期: 2017年7月18日; 修回日期: 2017年10月28日
第一作者: 查亚峰(1982-), Email: zhayafeng@163.com

国家站共同形成布局合理、运行稳定、质量可靠的地面气象观测站（简称地面站）网，形成满足不同需求层次的不同密度的地面观测网，对于落实站网分级管理、充分发挥地面站效益意义重大。

2014和2015年，全国层面已开展了基于探测基础能力评估、天气学检验需求的地面站遴选，并给出了华东地区519个国家站、2737个区域站组成的初选站网。本文从数值预报需求分析出发，采用华东区域数值预报模式，分析了不同密度的地面站同化对数值预报的贡献影响，探索基于观测与数值模式互动的华东地面站网遴选布局。

陶士伟等^[1]指出地面站观测资料具有站点分布密集、地形差异大、测站环境恶劣、数据采集和传输自动化程度高、资料实时性强、中小尺度天气现象明显等特点。这些中小尺度特征的信息对于强对流天气的触发起着重要的作用，所以同化地面站资料能够获得丰富的地面中小尺度大气信息，这对于大气边界层的准确模拟尤为重要。Zhang等^[2]认为若在中尺度数值模式的初始场中同化进更多的中尺度信息，则能够在一定程度上弥补一些丢失的重要中尺度特征。地面站数据的同化多集中在数据的质量控制、同化不同地面要素及采用不同同化方法的研究。

邵长亮等^[3]研究表明模式地形与观测站地形高度差异一直是地面资料同化面临的棘手问题，合理的同化方案能够将地面站资料有效地同化到中尺度数值模式中。张利红等^[4]利用WRF三维变分同化系统对地面站资料的不同观测要素开展同化和预报试验，研究表明同化地面站资料时，气压观测十分重要。

Bauer等^[5]指出支撑数值天气预报进步的四大基础支柱是模式初始化、物理方案、集合预报和并行超级运算。随着模式的不断发展完善，对初始条件的精确性要求也日趋提高，因而资料同化的作用也愈发凸显。资料同化发展至今经历了客观分析、三维同化到四维同化几个不同的阶段。资料同化方法是影响区域站资料对数值预报效果评估的关键因素。三维变分同化（3DVAR）是当前业务数值天气预报中最常用的数据同化方法^[6-8]，但是三维变分无法考虑时间维度的演变，具有一定的局限性。四维变分（4DVAR）的基本思想是要在整个事件序列的分析过程中保持变量的动力协调，是三维变分的推广，它可以使用时间上分布的观测资料，在一个时间段上做同化，但是由于四维变分包含了模式时间维，这会大大增加计算时间，更适合用于科研目的。

不同模式分辨率能够吸收的中小尺度天气的信息

量不同，本文在现有的华东区域模式9和3 km分辨率下，采用WRF模式的4DVAR方法在华东地区进行了不同区域站网密度数据同化敏感性试验，评估了不同密度站网资料对数值预报的影响。

1 资料和天气个例

1.1 站点资料

1.1.1 华东地面站基本情况

华东区域目前共有国家站519个，区域站12916个，总地面站的平均间距为7.73 km（表1）。

表1 华东现有地面站数量一览表
Table 1 List of AWS numbers in East China

省(市)	国家站数	区域站数	总站数	省(市)面积 (万km ²)	国家站间距 (km)	总地面站间距 (km)
上海	12	230	242	0.63	22.91	5.10
江苏	70	1723	1793	10.72	39.13	7.73
浙江	72	2480	2552	10.18	37.60	6.32
安徽	81	2364	2445	13.94	41.48	7.55
福建	70	1953	2023	12.4	42.09	7.83
江西	91	2452	2543	16.69	42.83	8.10
山东	123	1714	1837	15.79	35.83	9.27
合计	519	12916	13435	80.35	39.35	7.73

1.1.2 初选地面站情况

全国层面已开展了基于探测基础能力评估和天气学检验需求分析，给出了华东地区519个国家站和2737个区域站组成的初选站网。在2737个初选区域站中，51.90%为4要素观测站（温度、降水、风向和风速），24.49%为6要素观测站（温度、气压、降水、湿度、风向和风速）。

1.2 天气个例

台风、梅雨和强对流是影响华东地区较为典型的天气系统。按照天气影响程度、覆盖面等要素综合考虑，遴选近三年2个强对流、1个梅雨期降水、1个台风共计4个个例作为试验个例对象。具体为：

1) 台风麦德姆过程。2014年10号台风麦德姆于2014年7月23日00:15在台湾省台东沿海登陆，登陆时中心附近最大风力42 m/s；23日15:30在福建福清市登陆，中心附近最大风力30 m/s。登陆后向偏北方向移动，途径江西、安徽、江苏，转向入黄海，给沿途省份带来了大范围的强降水。24—25日华东中北部地区出现大暴雨，边界层东北风急流为大暴雨提供了充足的水汽，边界层中尺度切变的存在配合弱冷空气、地形等因素则为暴雨提供了强辐合上升运动。

2) 梅雨期间静止锋暴雨过程。2015年6月25—29日梅雨期静止锋暴雨发生在切变线南侧和低空急流左前方的重合区，伴有雷暴。充足的水汽、强烈的垂直

上升运动和不稳定能量条件均有利于出现暴雨。天气形势的稳定维持及对流单体不断沿切变线生成东移,使得降水维持时间较长。

3) 前倾槽强对流过程。2014年3月19日伴有冰雹大风强对流过程,剧烈天气主要集中在高空冷槽与低空暖脊叠加区。浙赣在高空急流轴出口区左侧,位于强辐散区,并配合有低空切变线,在此区域形成了强的上升运动。当日午后,地面辐合线配合干线触发强对流天气发生。19日午后至上半夜,浙江省多地出现强冰雹、雷雨大风等对流性天气,部分地区的冰雹达到强冰雹量级。

4) 后向传播的午后局地强对流天气过程。2013年9月13日为局地型的后向传播的雷暴过程,过程最强降雨时段为16—17时,最大小时雨量超过100 mm,伴有8~10级雷雨大风。此类局地型的后向传播雷暴过

程,在上海地区较为典型,地面切变线为此次强对流提供了对流单体初生阶段中小尺度触发条件,后期新生雷暴的触发区随着雷暴的发生、发展不断地向西南方向移动^[9]。

2 方法设计

2.1 不同密度地面站敏感性试验

为检验不同密度地面站资料对数值预报的影响,按照均匀、随机分布原则,分别设计了仅同化探空站(控制试验,简称Ctrl)、同化探空站和国家站试验(简称NS方案),并按照2737个初选站点40%、60%、80%、100%的密度,设计平均间距为别为29、25、21、19 km试验的6种站网密度敏感性试验(图1、表2)。其中19 km分辨率方案对应前期2737个初选区域站。

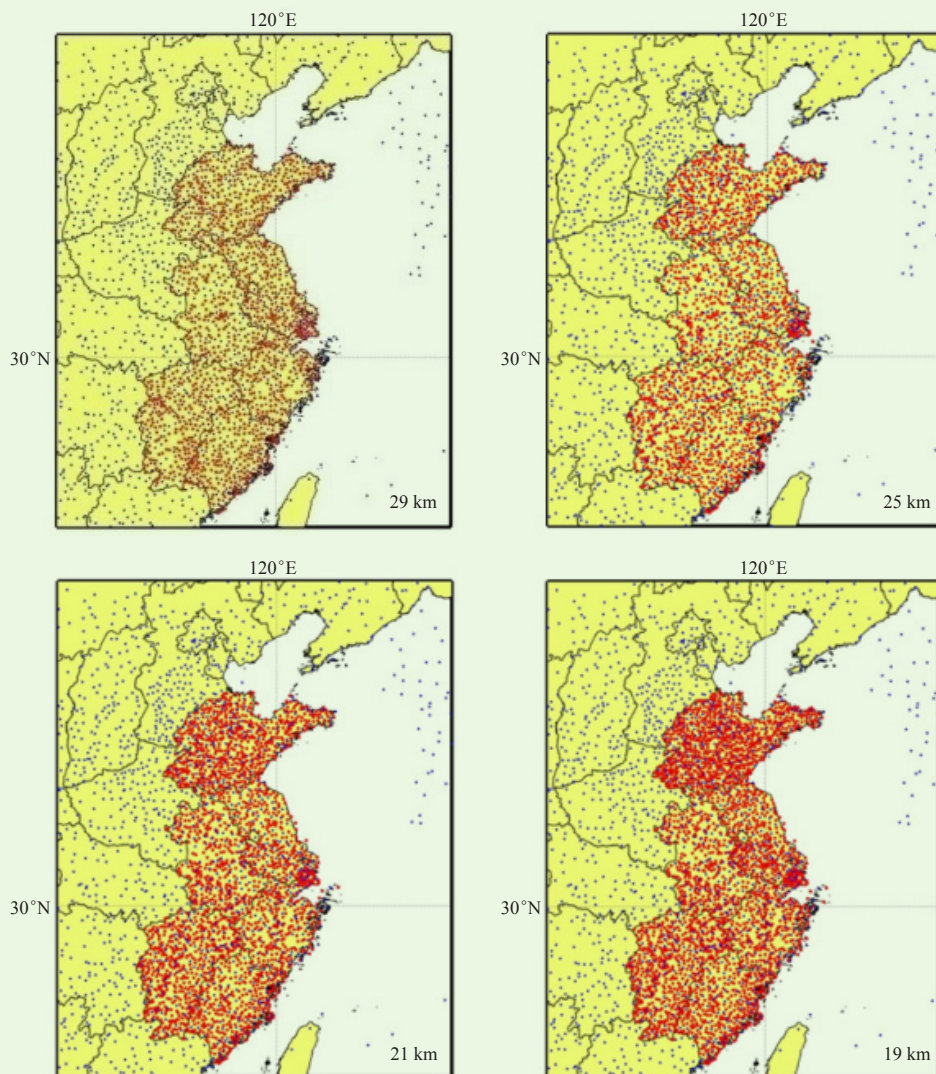


图1 不同密度方案站点分布示意图
Fig. 1 Locations of AWSs in different density

表2 不同站点密度的试验方案 (单位: 站数)
Table 2 Test Scheme for different density of sites

	无地面站	仅国家级地面站	29 km	25 km	21 km	19 km
华东国家级站	0	519	519	519	519	519
区域站	0	0	1195	1593	2258	2737
未能同化站	-	-	736	797	900	988
实际同化站	0	519	978	1315	1877	2268

注: 站点间距按照实际同化入模式的平均站点数计算; 实际同化模拟试验区内的全部国家级地面站, 落在华东区域内的国家站为519个; 各试验均在同化探空站基础上开展。

由于气压观测在地面资料同化中十分重要^[4], 而国家级地面观测站的观测场海拔高度与气压传感器海拔高度存在一定差异, 因此在数据进入同化系统前, 需要利用静力学平衡方程将本站气压观测订正到观测场海拔高度上的气压值。自动站数据的质量控制采用业务上常用的单站气候极值检查、要素间内部一致性检查及时间一致性检查方法^[10]。

地面观测资料受地形、地貌的影响较大, 且一般模式地形与实际观测站地形存在一定的高度差异, 本文采用WRF默认的处理模式地形与实际观测站地形高度差异的方法, 利用近地层相似理论同化地面观测资料, 并分三种情况进行处理: 当测站地形高度大于模式最低层高度, 则将地面观测资料作为高空资料反演到模式; 当模式最低层高度高出测站地形的高度超过100 m, 该站点资料则剔除不用; 当模式最低层高度比测站地形高度高, 且模式最低层高度高出测站地形的高度小于100 m时, 该站点资料则利用背景场信息将观测资料反演到模式最低层^[11]。

2.2 模式设置

本文采用WRF模式双重单向嵌套, 水平分辨率分别为9和3 km。全部试验的物理过程均选取了YSU边界层参数化方案, Morrison 2-moment微物理过程参数化方案, 外层采用新Grell对流参数化方案。模式的初始场和侧边界场均采用0.5°分辨率GFS每3 h间隔的预报, 四维变分的同化窗为6 h, 同化的要素包括所有能采集到的温、压、湿、风数据。

2.3 站点遴选

1) 形成站点密度对数值预报影响曲线。根据检验结果, 针对不同类型个例, 形成站点密度对数值预报的影响曲线, 寻找地面站经济高效布局密度的最优值。

2) 确定遴选站点。①根据站点对数值预报的影响最优密度, 确定华东区域遴选站点建议数量(暨站网平均密度); ②在总体均匀分布的基础上, 根据数值模式同化试验结果和各省(市)预报服务实际, 在预报敏感区域和服务重点区域适度加密; ③适度调整未能进入模式同化的站点。

3 结果分析

3.1 个例同化结果检验

3.1.1 台风麦德姆过程

对于“麦德姆”天气过程, 不同比例地面站的同化试验较控制试验预报效果均有改善, 且随着比例的增加, 改善效果越明显。如图2所示, 2014年7月24日08时—25日08时24 h累计降水落区分为两块, 即台风本体在闽赣浙引起的强降水、台风与冷空气结合在苏皖地区引起的强降水。模式预报均对这两块降水有所反应, 但强度和落区存在一些差异。同化地面站试验预报的雨带位置更接近实况。

25日02—08时, “麦德姆”给安徽、江苏部分地区带来了较强降水。利用传统TS评分方法对控制试验和不同同化方案试验开展客观检验。从不同阈值的TS评分(图3)来看, 对于不同量级的降水, 相较控制试验, 只同化国家站的试验降水预报效果并没有显著改进, 加入不同密度的区域站后, TS评分均有明显持续的改进。尤其是对于较大量级的降水。如对于25 mm/h阈值的降水, 控制试验的评分接近为0, 而同化试验均有所提高。以25日07时为例, 控制试验TS评分为0, 而29 km区域站密度同化试验TS评分为0.04, 19 km试验为0.09, 预报技巧有显著的改善。

尺度模糊检验方法, 又称为领域检验法(HK评分), 在中尺度数值预报模式的预报检验中有较高的应用价值^[12], 从多事件列联表检验结果(图4)来看, 只同化国家站的试验效果并不理想, 传统点对点的HK评分显著地低于区域站同化试验, 只有当窗区尺度达到50 km时, HK评分才基本与同化试验接近, 说明当搜索半径在50 km时, 命中率的增加才大于虚警率的增加, 模式降水预报强度与区域站同化试验相当, 但落区误差较大。而区域站同化试验结果, 对于大部分的窗区尺度和阈值, HK评分均有显著提高。

3.1.2 梅雨期间静止锋暴雨过程

对于此次梅雨天气过程, 不同比例区域站的同化试验较控制试验预报效果有所改善, 尤其是高阈值降水, 且随着比例的增加改善效果趋于明显。

图5给出了6月26日08时—27日08时的24 h降水实况以及数值模式预报结果的对比。对于江苏南部的雨带, NS方案只预报了南京附近的强降水中心, 而南京以东的降水预报明显比实况偏弱, 安徽西部的强降水中心明显偏南。同化了区域站的试验对江苏南部的雨带预报效果明显提高, 特别是19和21 km区域站的预报与实况降水量级更为接近, 对安徽西部的强降水中心位置把握也较好; 而25和29 km密度区域站试验虽

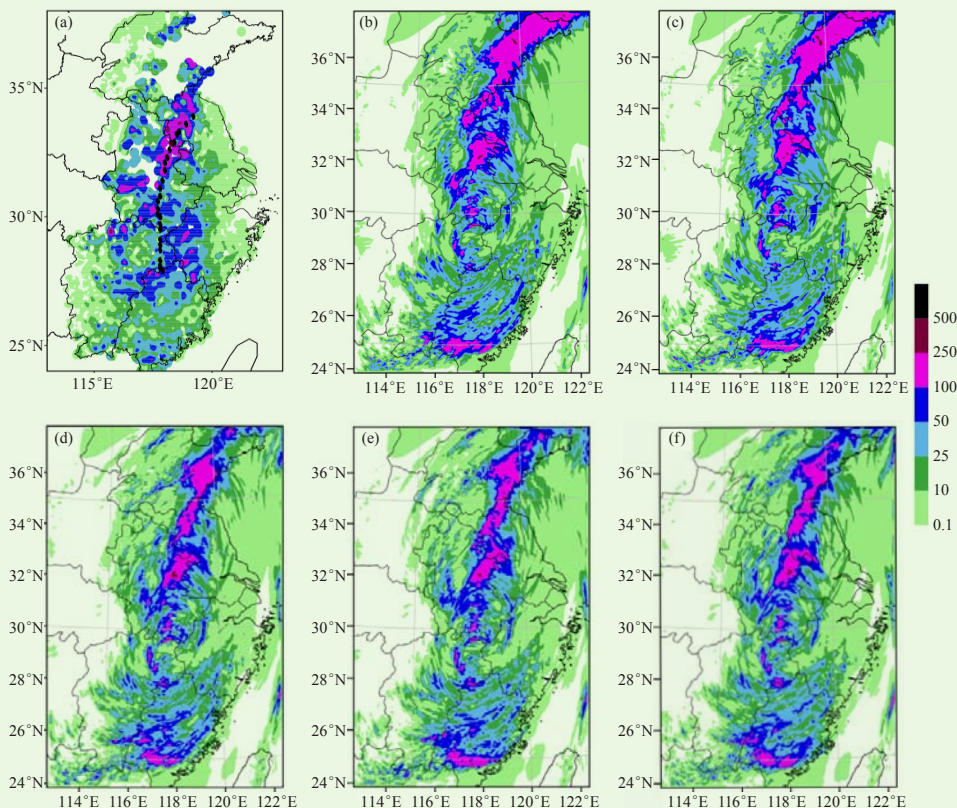


图2 数值模式模拟24 h降水与华东区域自动站观测的比较 (单位: mm/h)

(a) 自动站观测, (b) 仅同化探空站 (即控制试验, 简称Ctrl), (c) 同化了探空站和国家站 (简称NS方案), (d) 29 km区域站, (e) 25 km区域站, (f) 19 km区域站

Fig. 2 Comparison of 24h accumulated precipitation simulated by NWP using different density of surface AWS data assimilation scheme to the observations at AWSs for different density (unit:mm/h): (a) for AWSs only, (b) for radiosonde data only (control experiment), (c) for radisonde and nation station, (d) for AWS density of 29km, (e)for 25km, (f) for 19km

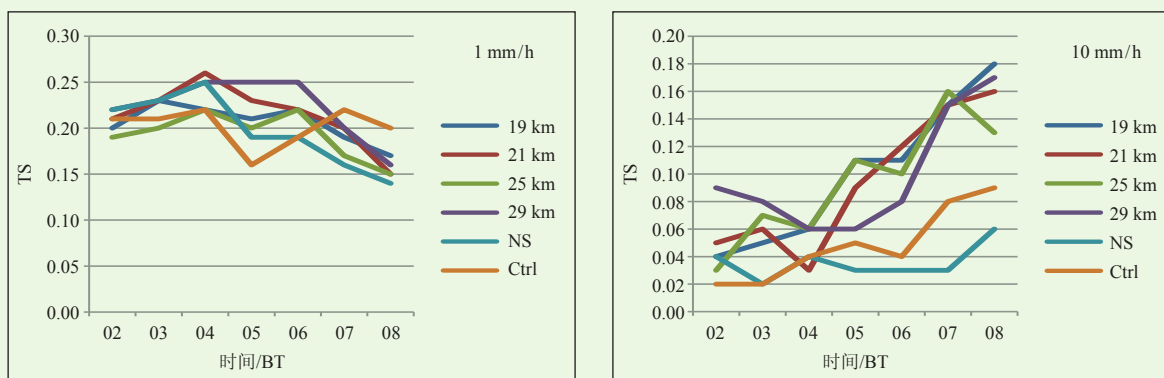


图3 2014年7月25日02—08时逐小时的TS评分分布

Fig. 3 Hourly TS score for 02:00–08:00 BT, 25 July 2014

然对于安徽西部和江苏南部的强降水也有体现, 但对整体系统东移的速度预报偏慢, 效果不及19和21 km的区域站同化试验。

选择暴雨云团影响江苏南部的时段作为检验重点。26日20时, 梅雨带上的暴雨云团在南京一带开始发展, 并向下游无锡、苏州、上海一带传播。此次过

程降水效率较高, 局部有超过50 mm/h的短时强降水中心。

从不同阈值的TS评分 (图6) 来看, 对于小阈值降水, 控制试验预报评分略高, 加入国家站同化后评分有所降低, 随着区域站的加入, 预报又有所改善, 但评分仍低于控制预报; 对于较大量级的降水, 在大

HK评分 (单位: mm/h) NS				
窗区尺度 (km)	5	10	25	50
50	0.46	0.52	0.56	
20	0.25	0.26	0.00	
10	0.17	0.15	-0.02	
1	0.08	0.05	-0.01	

HK评分 (单位: mm/h) 29km				
窗区尺度 (km)	5	10	25	50
50	0.45	0.60	0.47	
20	0.32	0.48	0.24	
10	0.26	0.40	0.17	
1	0.19	0.26	0.11	

HK评分 (单位: mm/h) 25km				
窗区尺度 (km)	5	10	25	50
50	0.41	0.61	0.48	
20	0.32	0.47	0.30	
10	0.27	0.39	0.23	
1	0.19	0.27	0.15	

HK评分 (单位: mm/h) 19km				
窗区尺度 (km)	5	10	25	50
50	0.44	0.53	0.48	
20	0.34	0.44	0.50	
10	0.29	0.38	0.47	
1	0.20	0.26	0.25	

图4 对模式积分23 h后的1 h降水尺度模糊检验结果-多事件联列表

Fig. 4 Fuzzy verification (multi-event contingency table) on 1 hour total precipitation forecast 23 hour after model initial time

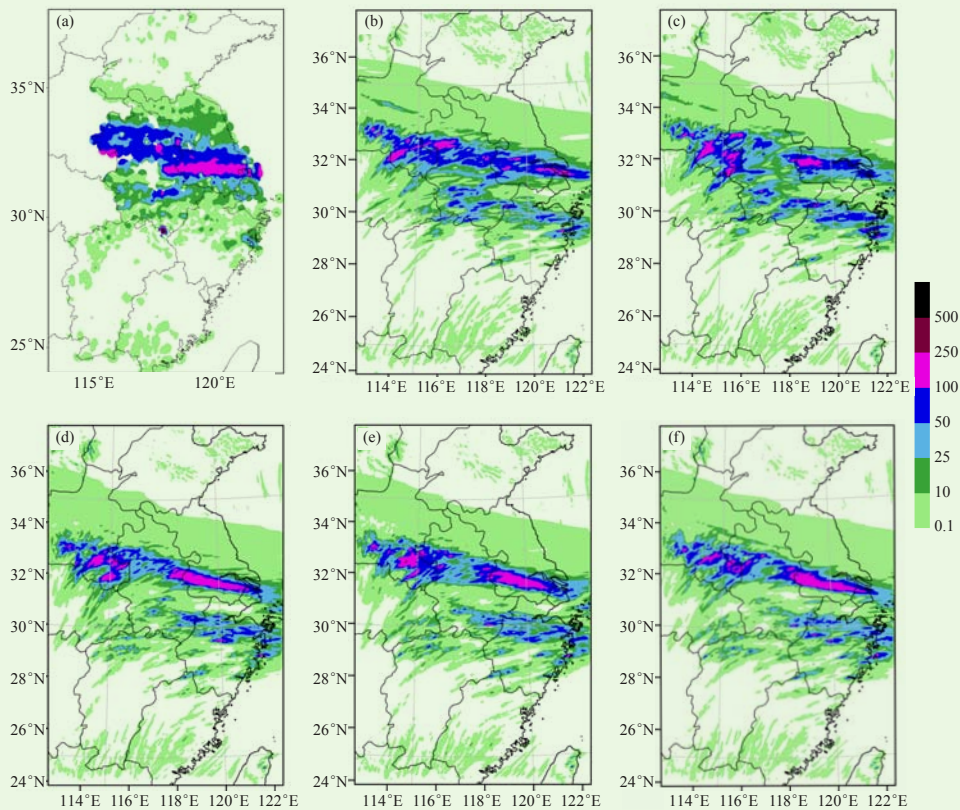


图5 数值模式模拟24 h降水与华东区域自动站观测的比较 (单位: mm/h)

(a) 自动站观测, (b) Ctrl, (c) NS方案, (d) 29 km区域站, (e) 25 km区域站, (f) 19 km区域站

Fig. 5 Comparison of 24 h accumulated precipitation simulated by NWP using surface AWS data assimilation scheme in East China AWS with observation different density:(unit: mm/h). (a) for observation, (b) for radiosonde data only (control experiment), (c) for radisonde and nation station, (d) for AWS density of 29 km, (e) for 25 km, (f) for 19 km

部分时间段里, 加入区域站同化的试验降水预报的TS评分均有明显持续的改进。

目标对象检验方法可以对检验对象(降水落区等)的尺度、形态、结构、强度和大小进行检验^[13]。

从24 h降水的目标对象检验来看, 对于苏皖地区的梅雨暴雨带, 同化试验较控制试验有所提高, 同化自动站比仅同化探空站效果好, 其中以19 km预报总体评分最高。

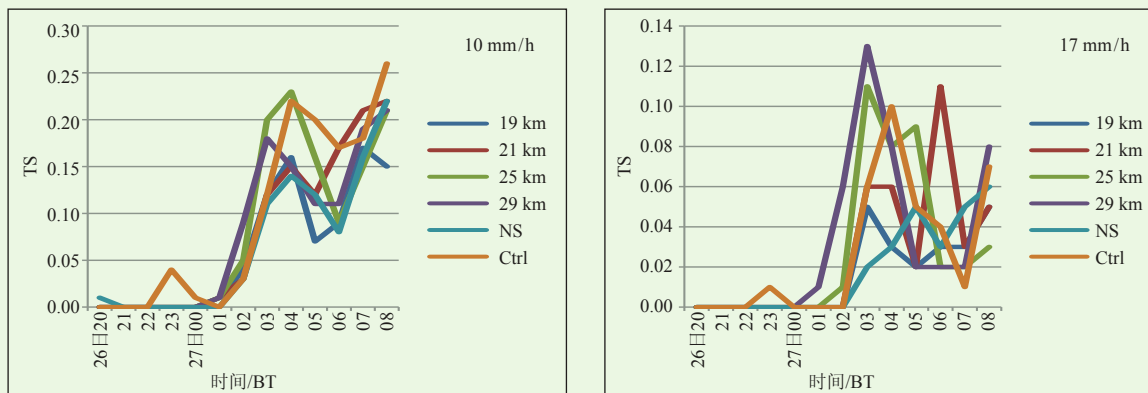


图6 2015年6月26日20时—27日08时逐小时的TS评分分布
Fig. 6 Hourly TS score for 20:00 BT 26 June–08:00 BT, 27 June 2015

3.1.3 两次强对流过程

对于2014年3月19日前倾槽强对流过程。随着区域站比例的增加，预报效果略有改善，但同化区域站数据后模式所改善的效果并不稳定。对于2013年9月13日后向传播的午后局地强对流天气过程，各同化试验的预报结果之间并没有明显的差异。

3.2 不同密度地面站同化结果综合检验

综合考虑天气学主观检验、传统TS评分和目标对象法等客观检验结果，采用等权平均的方法，得出了四个个例检验评分随站点密度变化的曲线图，再通过计算四个个例评分平均，得到同化不同密度地面站资料对数值预报的平均影响曲线（图7）。

从平均影响曲线和影响趋势线来看：

(1) 相对于只同化探空站的控制试验，地面站资料的使用对中尺度数值预报模式在华东区域的预报有直接影响，且整体以正贡献为主。总体而言同化站点越密，改进效果越好。

(2) 地面站对数值模式影响的程度和效果与天气系统的特点有直接关系。本研究在前期全国地面站初选的基础上开展，试验设计的地面站最密方案为站点平均间距19 km。就试验个例来看，在地面站平均

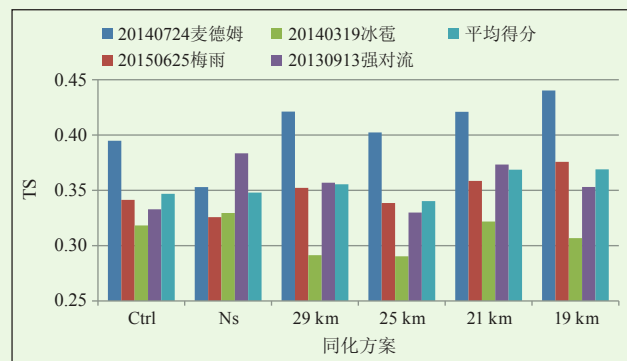


图7 站点密度对数值预报的影响曲线
Fig. 7 Impact curve of different site density on NWP

间距为19 km及以上时，地面站的资料对大尺度天气过程（文中所述的“麦德姆”台风和梅雨过程）预报结果有较好改善，但两次强对流天气过程改善并不明显，这可能与试验采用的区域站密度过于稀疏不足以捕捉触发局地分散性强对流的中小尺度系统有关。结合2015年长三角地区天气观测网适应性布局试验结论，要有效提高数值预报对局地强对流天气的预报贡献，地面站站间距建议达到10 km或更密。

(3) 在全国地面站初选的基础上（初选站点平均间距19 km），华东地区地面气象观测站（包括国家级地面站和区域站）平均间距约20 km时出现资料正贡献度和站点密度比的相对高值。

3.3 地面站遴选布局

在华东地区519个国家站基础上遴选增补1532个区域站，形成总站数2051个，平均间距约20 km，天气系统关键区和服务重点区适度加密的华东地区国家地面天气网（图8和表3）。

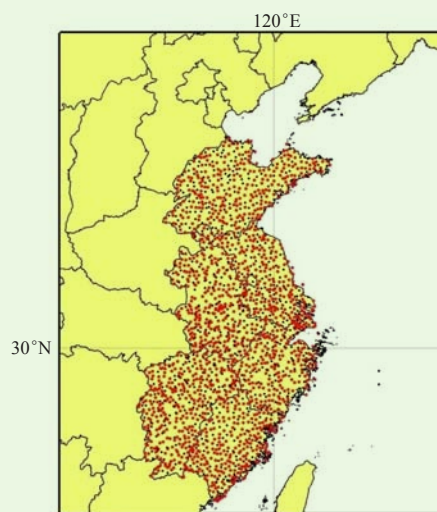


图8 华东区域地面站遴选分布示意图
Fig. 8 Locations of the selected AWS in East China

表3 华东区域地面站遴选各省站点分布表
Table 3 List of the selected AWS in East China

省(市)	省(市)面积 (万km ²)	建议站间距 (km)	国家级站 (站数)	总地面站 (站数)
上海	0.63	20	12	41
江苏	10.72	20	70	278
浙江	10.18	20	72	255
安徽	13.94	20	81	349
福建	12.4	20	70	310
江西	16.69	20	91	417
山东	15.79	20	123	401
合计	80.35	20	519	2051

4 方法的推广应用

2016年,基于观测与数值模式互动的地面气象观测站遴选方法在全国各区域中心推广。在前期根据探测基础能力评估和天气学检验需求分析初选的区域站基础上,八大区域中心结合本地区业务模式特点,优化此方法,分析了不同密度的区域站同化对数值预报的贡献影响,进行综合遴选决策,遴选出8174个区域站作为国家地面天气站。2017年,中国气象局正式印发遴选后的地面自动气象站布局优化方案。

5 结论

以典型天气个例的数值预报结果对地面站观测资料的敏感性评估为依据,通过开展不同站点密度的数据敏感性试验得到地面站布局对数值预报的贡献评价。结论如下:

1) 地面站资料的使用对中尺度数值预报模式在华东区域的预报有直接影响,且整体以正贡献为主。总体而言同化站点越密,改进效果越好。

2) 在全国地面站初选基础上,华东地区地面站平均间距约在20 km时出现站点资料贡献度随站点密度增长的相对高值。

3) 地面站对数值模式影响的程度和效果与天气系统的特点有直接关系。不同密度方案同化试验表明,华东地区地面站平均间距大于19 km(初选站点平均间距)时,地面站的资料对大尺度天气过程(台风和梅雨)预报结果仍有较好改善,但对局地强对流天气过程,改善并不明显。结合2015年长三角地区天气观测网适应性布局试验结论,要有效提高数值预报对局地强对流天气的预报贡献,地面站站点间距建议达到10 km或以上。

4) 在华东地区519个国家站基础上遴选增补1532个区域站,形成总站数2051个、平均间距约20 km、

天气系统关键区和服务重点区适度加密的华东地区国家地面天气网,在控制站网规模的同时,能较好地满足区域数值预报需求。

6 问题与讨论

1) 地面站网的遴选结果最终确定仍需综合考虑。数值预报贡献评价是遴选地面站网的重要参考指标,但地面站网的最终遴选结果仍需考虑站点布局环境、站点维护实际,也需要考虑预报和气象服务需求。

2) 密度试验不能得到精确到站的遴选结果。基于不同密度的数值预报敏感性试验开展地面站网遴选只能给出最优站点密度建议,但不能具体到每一个站点。

3) 个例试验仍有局限性。本文地面站的遴选工作只针对个例做试验,未开展批量试验,试验得出的结果仍有较大局限性。此外天气系统是相互关联和影响的,华东区域和外区域交互处的站点具体需求等问题还待优化试验和研究。

4) 四维变分效果较好,然而非现阶段日常业务模式。但四维变分方法是未来数值预报的同化方案发展趋势之一,可采用四维变分同化方法较好地匹配华东区域模式未来发展方向。

参考文献

- [1] 陶士伟,仲跻芹,徐枝芳,等.地面自动站资料控制方案及应.高原气象,2009,28(5): 1202-1210.
- [2] Zhang D L, Fritsch J M. A case study of the sensitivity of numerical model simulation of mesoscale convective systems to varying initial condition. Mon Wea Rev, 1986, 114(12): 2481-2431.
- [3] 邵长亮,闵锦忠.集合均方根滤波同化地面自动站资料的技术研究.大气科学,2015,39(1): 1-11.
- [4] 张利红,陶士伟,何光碧.自动站资料在WRF 3DVAR中的同化敏感性试验.高原山地气象研究,2011,31(4): 29-35.
- [5] Bauer P, Alan T, Gilbert B. The quiet revolution of numerical weather prediction. Nature, 2015, 525(7567): 47-55.
- [6] Barker D M, Huang W, Guo Y R, et al. A Three Dimensional Variational (3DVAR) data assimilation system for use with MM5: implementation and initial results. Mon Wea Rev, 2004, 132(4): 897-914.
- [7] Gao J, Xue M, Brewster K, et al. A 3DVAR data assimilation scheme for storm-scale model[C]. 14th Conference on NWP, AMS, 2001: 72-74.
- [8] 薛纪善,庄世宇,朱国富,等. GRAPES 新一代全球/区域变分同化系统研究.科学通报,2008,53(20): 2408-2417.
- [9] 孙敏,戴建华,袁招洪,陶岚.双多普勒雷达风场反演对一次后向传播雷暴过程的分析.气象学报,2015,73(2): 247-262.
- [10] 任芝花,熊安元.地面自动站观测资料三级质量控制业务系统的研制.气象,2007,33(1): 19-24.
- [11] Ruggiero F H, Sashegyi K D, Madala R V, et al. The use of surface observations in four-dimensional data assimilation using a mesoscale model. Mon Wea Rev, 1996, 124(5): 1018-1033.
- [12] 李佰平,戴建华,张欣,等.三类强对流天气临近预报的模糊检验试验与对比.气象,2016,42(2): 129-143.
- [13] 茅懋,戴建华,李佰平,等.不同类型强对流预报产品的目标对象检验与分析评价.气象,2016,42(2): 389-397.