

上海市无缝隙天气预报技术

储海 陈雷 戴建华 王海宾 李佰平 张欣 孙敏 刘梦娟
(上海中心气象台, 上海200030)

摘要: 介绍了支持上海市气象局无缝隙预报业务的几类客观预报方法和业务系统。上海市气象局无缝隙格点预报产品涵盖0~45 d的五类不同分辨率、不同要素产品。从0~6 h与实况相衔接的逐10 min定量降水预报, 24~240 h的要素最优集成订正预报, 到延伸期45 d的逐日趋势预报。依赖各类客观预报方法生成的格点预报背景产品, 结合格点预报制作和预报检验系统, 使得预报员在此基础上有效地制作发布格点预报, 在满足现代化格点预报要求精确度的同时, 最大程度地帮助预报员减轻了人工操作的负担。

关键词: 无缝隙预报, 客观订正, 集成预报, 非常规检验

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.06.007

Aspects on Seamless Weather Forecast Technologies for Shanghai city

Chu Hai, Chen Lei, Dai Jianhua, Wang Haibin, Li Baipin, Zhang Xin, Sun Min, Liu Mengjuan
(Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030)

Abstract: Shanghai meteorology bureau has built its seamless grid forecast products with different forecast elements and resolution for term rang from 0 to 45 days. In this article, the objective forecast technologies and operation systems used to form the grid forecast were briefly introduced. A background grid-forecast was made without manual intervention for the requirements on (1) 0-6 h blended quantitative precipitation forecast consisted with current observation; (2) 24-240 h consensus forecast of calibrated operation NWP; (3) 11-45 d extended-range forecast. Finally, forecasters would give edit and publication on to the grid forecast with the help of our integrated forecast system and forecast evaluation system. By means of these objective tools, the grid forecast was able to get demanded precision without adding more burdens to forecasters.

Keywords: seamless forecast, objective correction, consensus forecast, unconventional evaluation

0 引言

当前世界气象以精细化和自动化为发展趋势, 美国、英国、澳大利亚等均已建立了格点精细化的自动预报系统, 其产品相对于传统预报准确率有较大提高, 已成为预报员业务工作中的首选指导产品, 同时产品也能够直接服务于用户。从实际使用效果看, 在提供了更多预报产品的同时, 并未让预报员投入更多精力。上海及华东区域是我国经济发展中心, 实行精细化预报是未来上海气象局的工作重点, 是中国气象局深化气象预报预测业务改革要求, 也是社会经济发展和人民生活水平提高的保障。无缝隙预报最先由世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP)提出, 由于天气到气候的变化本身是一个连续的过程, 而实际预报本身是一个从天

气到气候的无缝隙的服务, 因而具有不同时间分辨率的各类天气气候模式应在具有普遍一致性的前提下, 描述同一大气系统的不同方面特征^[1]。尽管当前尚缺乏具备无缝隙预报能力的数值模式, 但自2012年起, 上海市气象局加快推进气象现代化的各项工作, 不断提升气象预警预报及气候预测技术能力。到2016年, 上海推出了覆盖华东地区0~45 d、时空分辨率最高达到10 min/3 km格点客观预报产品(表1), 并在此基础上推出了“上下班时段天气预报”、“3 h天气预报”、“未来10 d逐日天气预报”等一系列精细化预报产品, 建立了从邻近预报到年度预测的无缝隙预报服务体系, 预报质量稳步提升, 晴雨、气温等天气预报准确率在全国处于领先水平, 2015—2016年24 h晴雨预报准确率达89.75%, 最高气温预报准确率达到91.4%, 强对流天气预警能力不断提高, 预警时效延长到144.3 min。

本文主要介绍上海10 d以内无缝隙天气预报格点指导产品的相关制作技术及特点, 其中, 0~6 h逐10 min

收稿日期: 2017年7月24日; 修回日期: 2017年10月29日
第一作者: 储海(1985—), Email: chhai@163.com

表1 上海市气象局格点预报产品业务运行情况
Table 1 The operation for gridded products of SMS

预报时效	时间分辨率	空间分辨率	预报范围	更新频次	预报要素
0~6 h	10 min	3 km×3 km	长三角	每30 min	降水量
0~24 h	1 h	3 km×3 km	华东区域	每日4次	天气现象、温度、降水量、云量、风向风力、相对湿度
0~72 h	3 h	5 km×5 km	上海	每日2次	天气现象、温度、降水量、云量、风向风力、相对湿度
1~10 d	12 h	5 km×5 km	华东区域	每日2次	天气现象、温度、降水量、云量、风向风力、相对湿度
11~45 d	24 h	9 km×9 km	华东区域	每日1次	天气现象、温度、降水量、云量、风向风力、相对湿度

降水采用雷达实况外推与数值预报融合的Blending预报方法，分辨率为3 km，0~24 h逐1h、0~72 h逐3 h、1~10 d逐12 h要素产品则采用多模式综合订正集成的预报方法生成。

1 预报方法介绍

1.1 0—6 h 降水融合 Blending 方法

当前对于短时定量降水预报，主流观点认为，将常规短临预报技术（主要是雷达外推技术）与数值预报融合是将预报时效提高至2 h以上的根本途径^[2]。如英国的NIMROD系统通过给予外推与NWP预报不同时效上不同权重来进行短临强降水预报^[3]；美国国家大气研究中心（NCAR）的NIWOT系统则通过NWP预报调整外推回波范围^[4]；香港天文台的SWIRLS系统中^[5]，通过位相修正和强度修正技术订正NWP预报，并由一个双曲函数确定外推与NWP的融合权重因子，有效提高了0~6 h的降水预报效果。由于SWIRLS系统相对较为成熟，并有较好的开放性，目前国内如北京市气象局、浙江省气象局等也都与其合作开展了相关工作。上海中心气象台在前期丰富的雷达应用经验基础上，利用长三角地区10部天气雷达的反射率因子观测实时外推和区域高分辨率数值模式模拟的雷达反射率因子预报，经过尺度分解、实时目标订正及权重融合、分类Z-R关系转换等技术，建立了0~6 h短时临近

精细化客观预报定量降水融合产品。

1.1.1 雷达实况外推

采用陈雷等^[6]改进的COTREC外推预报方法，首先对选取的长三角地区雷达资料进行实时质量控制，去除超折射和地物回波等非气象回波。非气象回波在低仰角资料中比较集中，通过高低仰角资料对比分析去除只存在于低仰角资料中的杂波。然后采用交叉相关法（Tracking Radar Echoes by Correlation, TREC）求出TREC风场，对求出的风场先进行平滑处理，去掉明显失真的风（风速极大或为0），本文采用的是九点平滑方法。TREC法反演的风场只在有回波的区域有值，而没有回波的区域缺值（为0），这样经过水平无辐散处理后得到的COTREC风场会受到一定程度的削弱，特别是孤立的块状回波或线状回波受到的削弱更加明显。采用引入数值预报平均风场作为TREC风场引导流场的方法，较好地解决了TREC风场经过水平无辐散处理所受到的削弱问题。应用的是GFS模式3 h间隔预报风场，将数值预报各层次风场取矢量平均，并插值到TREC风场格点上，代替TREC风场中的缺值点，经过这一步骤后得到新TREC风场 $(nu^0(i, j), nv^0(i, j))$ ，对新的风场进行水平无辐散限制求出COTREC风场 $(u(i, j), v(i, j))$ 。最后，用COTREC风场将 t_2 时刻的回波外推到 $t_2+\Delta t$ 时刻，完成回波的外推。

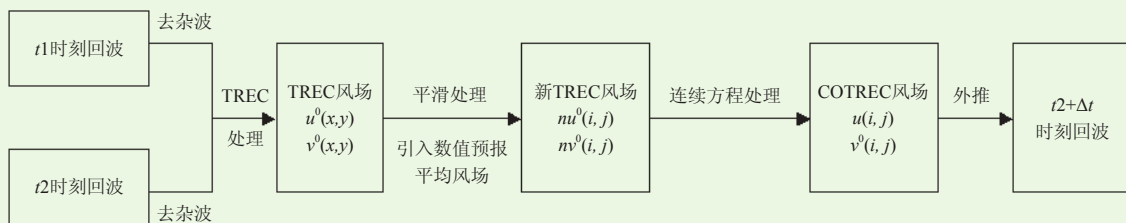


图1 COTREC法外推预报具体流程

Fig. 1 Flow chart of COTREC radar extrapolation

1.1.2 区域模式预报反射率订正

为与雷达外推产品进行有效融合，以提高对短时降水、对流回波的预报效果，必然需要选用包含有雷达反射率等资料同化的区域高分辨率数值模式结果。

然而，由于模式预报的时效性相比外推预报仍有1~2 h左右的延迟，并且与实况观测相比，模式降水系统仍不可避免地存在着强度及位置上的误差，因此在与外推结果进行融合之前必须先对模式的反射率预报进

行订正。

首先需要模式预报反射率的总体强度进行误差修正,采用程从兰等^[7]的方法,用韦布尔(Weibull)函数对当前实况雷达反射率因子和模式对当前时次的反射率因子预报分别进行拟合,通过实况与预报的反射率因子概率分布对比,计算表征模拟与实况的Weibull函数分布态特征量,通过调整预报数据的量级、周期等,使其拟合的特征值接近实况,达到强度修正的目的。

经过强度误差修正之后,预报反射率因子达到与实况相似的强度频谱分布特征,之后才可以进行模式反射率因子位相误差修正。对于实况雷达回波与高分辨率模式预报,其原始图像中包含的信息往往过于复杂,不利于此后的目标识别及匹配,因此对于降水系统的位相误差,本方法重点关注模式对于中尺度对流系统、天气尺度雨带这类目标的预报效果。在进行位相修正之前,首先使用快速傅里叶变换对预报与实况回波进行滤波,去除小尺度杂波和局地分散性降水的影响。然后使用上海中心气象台研发的自动目标识别检验方法,对预报与当前实况回波的目标进行匹配,计算两者的位置偏差,将其用于未来模式预报目标反射率的调整,以达到位相调整之目的。

1.1.3 权重融合及实时 Z-R 关系转化

通过采用一个双曲函数^[8]计算权重系数,对实况COTREC外推及订正后的数值预报结果进行分时效加权平均,使得融合结果在前期与COTREC实况保持一致,而当时效延长外推预报失去效果时,平滑过渡至数值预报。对2017年9—10月影响上海地区的四次降

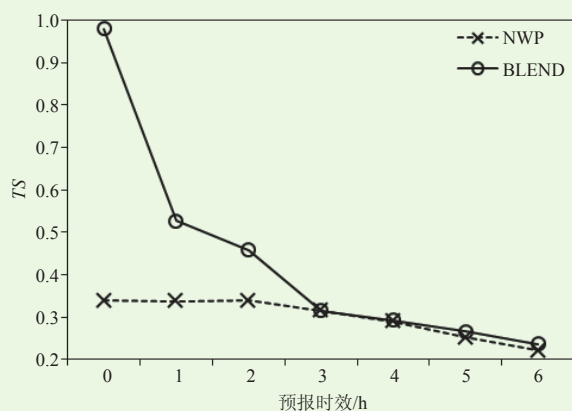


图2 2017年秋季四次降水过程0~6 h反射率预报TS评分检验(阈值: 20 dBz, 实线为融合方法评分, 虚线为数值模式评分)

Fig. 2 TS score of 0-6 h forecasted radar reflectivity for 4 autumn rainfall events during 2017. (Threshold: 20dBz; black line indicate the blended method, dashed line indicate original NWP forecast)

水过程(9月20日低槽切变线降水过程, 9月25日副热带高压边缘强对流降水过程, 10月2日系统性降水过程, 10月15日台风倒槽暴雨过程)进行20 dBz以上组合反射率TS评分预报检验。结果显示, 相对于高分辨率数值模式, 融合方法对0~3 h的降水预报有明显提高, 而对3 h以后降水融合方法在提高了外推时效的同时也对数值预报有一定的订正技巧(图2)。

最后, 通过实时Z-R关系转换, 将反射率融合结果转化为降水率, 通过上海中心气象台前期的分类Z-R关系统计结果, 统计临近时段内周边区域站点1 h降水量与雷达反射率因子数据, 选取最佳的Z-R关系结果用于当前最新预报, 最终得到10 min分辨率的融合定量降水预报结果(图3)。

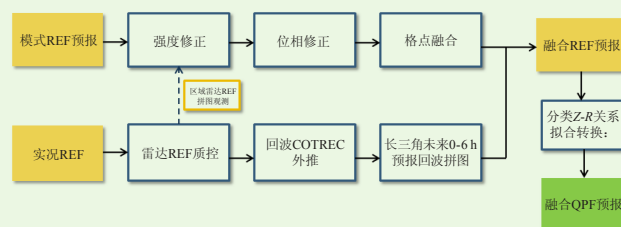


图3 短临降水融合方法流程图

Fig. 3 Flow chart of blended nowcasting QPF

1.2 多模式最优集成方法

1.2.1 集成方法

对于中短期要素预报, 当前的客观预报主要以数值预报为主要核心, 而数值预报的迅速发展和提高使得以长期样本统计为基础的传统释用方法(如MOS法^[9-10])难以取得稳定及可信的统计基础, 同时, 日业务中存在诸多不稳定因素, 如资料缺失、时空分辨率不一致等, 也制约了单一模式的实际业务化应用效果。多种模式或多种预报方法的综合集成是当前国际上的发展趋势。多模式或多预报方法的集成, 既能综合各预报结果的优势, 又能减少单个预报成员预报偏差对最终结果的影响, 增强了预报的稳定性。上海中心气象台使用数值模式作为指导产品, 基于多模式最优集成技术(optimal consensus forecast, OCF)进行中短期要素的订正及格点预报产品制作^[11]。选取的业务模式资料, 包括欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)全球高分辨模式(EC模式)、日本细网格模式、T639全球模式、全球预报系统(global forecast system, GFS)模式以及上海SMB-WARMS区域模式, 实况资料则来自上海的乡镇自动站资料库(147站)及国家信息中心通过卫星下发的常规地面观测资料(531站)。集成方法分为两步:

首先, 对各集成成员的预报结果进行预报偏差校正: (1) 计算出各集成成员在过去30 d中的平均预报相对误差; (2) 根据平均预报相对误差, 对将各集成成员的预报结果进行系统偏差校正。

然后, 对各集成成员的预报结果进行绝对误差权重平均:

(1) 定义预报误差 (b):

$$b_{i,k,r,f} = F_{i,j,k,r,f} - A_{i,j,r+f}, \quad (1)$$

式中, F 代表预报值, A 代表观测值, i 代表站点位置, k 代表集成成员, r 代表起报时间, f 代表预报时效。

计算各集成成员在过去一段时间内的平均预报绝对误差:

$$\hat{b}_{i,k,f} = \frac{Q_1 + 2Q_2 + Q_3}{4}, \quad (2)$$

式中, Q_1, Q_2, Q_3 分别代表各成员过去一段时间内预报误差序列 b 的第一、第二、第三个四分位数, 平均预报绝对误差是对各成员过去时间内预报系统误差的一个近似估计, 取四分位数的平均估计系统误差能够去除极端成员的影响, 从而得到预报值的无偏估计:

$$FB_{i,k,r,f} = F_{i,j,k,r,f} - \hat{b}_{i,j,k,f}; \quad (3)$$

(2) 由预报值的无偏估计, 得到过去集成成员的预报平均绝对误差:

$$MAE_{i,k,f} = \frac{1}{N} \sum_r |FB_{i,k,r,f} - A_{i,r+f}|, \quad (4)$$

根据平均预报绝对误差的大小, 计算相应的权重系数 (w), 对各集成成员进行加权平均, 平均预报绝对误差越大的成员, 权重系数越小。

$$\hat{w}_{i,k,f} = MAE_{i,k,f}^{-1} \left(\sum_k MAE_{i,k,f}^{-1} \right)^{-1}, \quad (5)$$

最终, 使用计算所得 w 对最新时次各集成成员的预报值无偏估计进行加权平均, 得到OCF预报结果:

$$OCF_{i,k,r,f} = \sum_k \hat{w}_{i,k,f} FB_{i,k,r,f}. \quad (6)$$

针对在实际应用出现的一些问题, 对误差订正方案进行了更改, 采用类递减平均 (decaying average) 的方法改进相对误差计算。在计算 b 时, 增加最近时次预报误差权重, 降低较早时次的误差权重, 同时剔除预报误差特别大的预报样本。同时, 考虑到转折性天气情况, 在进行最新时次预报误差订正时, 对预报要素明显偏离前期平均态的, 则降低其订正效果。

对于风的集成采用略为不同的方案。由于风向变化的不连续性和随机性, 上述“偏差校正+权重平均”的集成方法不适合风向, 实际操作中也无法取得满意的结果。因此采用了“择优集成方法”, 具体计

算时, 集成结果是选择过去30 d预报平均绝对误差最小的集成成员, 定义为:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(Fu_i - Ou_i)^2 + (Fv_i - Ov_i)^2}, \quad (7)$$

式中, Fu 表示预报 u 风分量, Ou 表示观测 u 风分量, Fv 表示预报 v 风分量, Ov 表示观测 v 风分量。

对于OCF降水预报, 由于其为非连续变量, 单纯的平均 (或加权平均) 往往会使预报降水范围相对于单一模式的预报偏大, 目前简单采用“晴雨+集成”的方法修正。首先计算过去30 d各家模式预报的降水晴雨率及雨量绝对误差, 集成方案挑选前30 d中晴雨预报效果最佳的模式雨区预报结果作为OCF的降雨区预报, 雨区降水量采用根据绝对误差计算的加权平均值得到。

释用方法于2013年开始试运行, 期间经过若干调整, 到2016年稳定运行。对2016年上海地区11个标准站24, 48和72 h的最高、最低温度的检验可见, 该方法能够有效订正数值模式预报误差, 相比中国气象局的MOS客观预报指导产品也有一定的优势 (图4)。

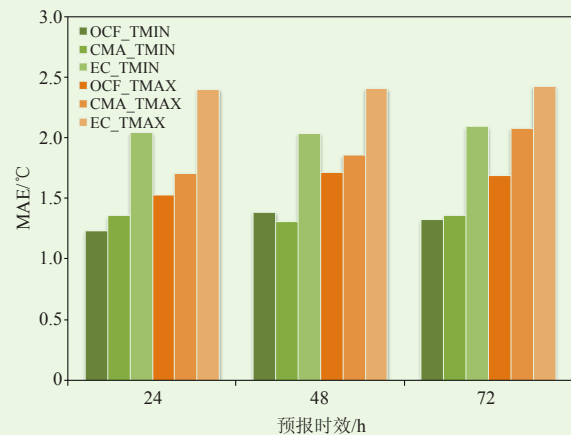


图4 2016年24, 48和72 h的OCF释用方法、MOS、欧洲细网格对上海11站点最高、最低温度预报的平均绝对误差
Fig. 4 Averaged error of 24/48/72 h max/min temperature forecasts by the OCF, CMA MOS and ECMWF NWP

1.2.2 格点转换

以上结果是对站点的模式订正, 要进一步得到格点精细化预报, 还需对站点集成结果进行格点化订正及转换。目前精细化预报业务对于格点化的分辨率, 要求12 h内达到3 km, 72 h内达到5 km, 而集成成员的分辨率最高在9 km, 无法达到要求。因此, 一方面对于上海地区, 通过147个加密自动站的误差订正能够一定程度上做出高分辨率的订正, 另一方面, 在进行格点转化时, 综合考虑地形、下垫面分布因素进行修正, 以提高产品精细化程度。

对站点预报结果进行格点化插值，采用多重cressman插值方案。特别地，在进行2 m气温的格点化时，考虑格点地形高度差异进行插值订正。具体订正方法为：利用高分辨率地形高程数据（shuttle radar topography mission, SRTM；分辨率90 m）插值得到的格点地形高度，采用经验温度递减率 $\gamma=0.65^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$ ，在cressman方法中，将格点周围站点温度从其原来不同的站点地形高度订正至同一标准高度（ z_0 ）上，然后进行格点插值，得到该格点在 z_0 高度的插值温度 T_0 ，然后根据SRTM资料插值的格点地形高度，将 T_0 再次用 γ 订正回到格点高度得到最终值（ T ）（图5）。

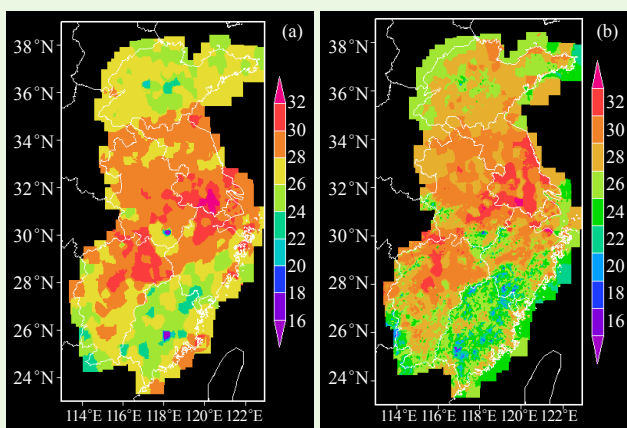


图5 2 m温度预报试验

(a) 高程订正前；(b) 高程订正后

Fig. 5 2 m temperature forecast sample: (a) Before terrain height calibration. (b) After terrain height calibration

对于2 m温度预报，在项目释用前期，由于部分模式预报资料在120 h之后的分辨率较粗，有的在12 h，因而在计算最高、最低温度时需要进行时间插值：

$$T(t_i) = T(t_1) + [Tc(h_i) - Tc(h_1)] + \frac{t_i - t_1}{t_2 - t_1} [(T(t_2) - T(t_1)) - (Tc(h_2) - Tc(h_1))] \quad (8)$$

式中， $T(t_i)$ 为插值时间温度， $Tc(h_i)$ 为历史统计 t_i 时刻温度， $T(t_1)$ 、 $T(t_2)$ 为离 $T(t_i)$ 最近的相邻两个时次OCF预报温度。

然而，后期由于各家模式预报资料分辨率的提升，在120 h后均可达到6 h，因而当前预报中直接使用模式预报场而不需进行插值。

对于不同下垫面的处理，目前仅对于海陆格点进行区分，在进行格点插值时，对于陆面格点，仅使用陆面站点OCF订正进行插值，而对于海面站点，由于缺乏海上观测资料，暂时只由模式直接预报值处理，因此格点温度场上具有明显的海陆差异（图6）。

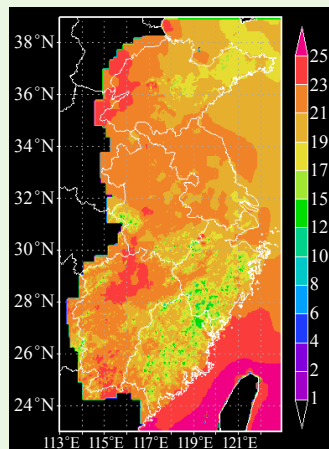


图6 2 m温度格点预报海陆分布对比

Fig. 6 2m temperature forecast sample for land and ocean

2 无缝隙预报支持

2.1 一体化预报制作

上海市气象局针对上海大城市天气预报服务和精细化预报业务需求，借鉴美国的GFE和中国气象局的MICAPS系统，于2013年研究建成基于WebGIS技术的一体化天气预报制作系统。该系统以大城市精细化预报服务需求为引领，学习国际先进技术发展，重点攻关模式客观释用关键技术、交互式格点预报编辑平台、智能工具库、基于格点预报的自动生成技术等关键技术，建立较为完善的精细化气象格点预报技术体系支撑。

目前，上海数值模式指导产品包括区域中尺度模式（STI-WARMS）、EC高分辨模式、日本高分辨模式（JAPAN）、OCF等，预报时效最长达240 h，其中，对于0~72 h短时临近/短期预报，采用OCF作为默认指导产品，在业务化使用中，每日两次起报，实现了华东区域分辨率5 km，上海地区分辨率3 km，240 h内逐6 h、96 h内逐3 h、24 h内逐1 h的中短期无缝隙客观精细化预报。其中直接集成的预报要素包括2 m温度、10 m风、定量降水、2 m相对湿度；诊断预报要素包括24 h最高/最低温度、云量、天气现象。同时，利用历史缺失查找补齐保证运行稳定性，目前使用情况良好。

图7显示上海市气象局一体化格点预报制作系统示意图，虚线部分是精细化格点预报系统功能结构图，其包括三个核心功能模块：数值模式指导产品、格点编辑工具库和预报产品生成器。格点预报系统是上海市气象局一体化预报制作业务的核心部分。业务系统界面如图8所示，预报员可以基于指导产品，通过格点编辑工具对其进行人工订正，最终经产品生成

模块形成每个格点、城镇或者区域上的天气预报，形成各类产品。

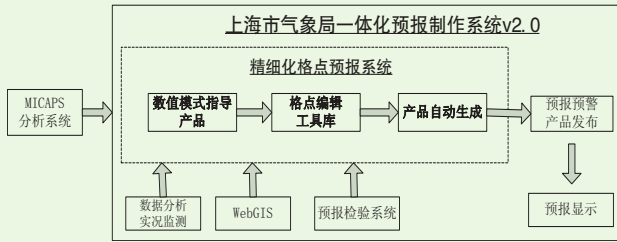


图7 上海一体化预报制作业务示意图
Fig. 7 Flow chart of the integrated forecast of SMS

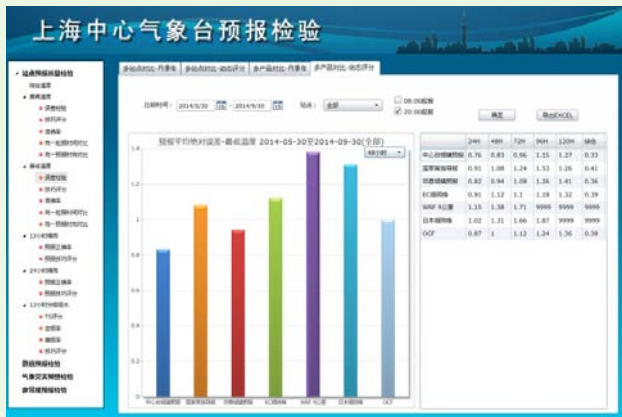


图8 上海中心气象台在线预报检验界面
Fig. 8 Online forecast evaluation system at Shanghai Central Meteorological Observatory

格点编辑工具主要实现将天气概念模型应用到交互式图形化预报制作中，并使格点数据订正结果在WebGIS界面中同步更新(图9)。上海精细化格点预报系统实现了包括平滑、过滤、增减、调整、插值、平移、区域操作等多种编辑工具。另外，实现了格点与站点的转换反演及时空的影响反演计算，建立了依赖基准站的曲线订正反演模型和站点预报影响模型，将模型中基准站点反演到面预报，面反演与时间序列反演结合，实现多时次预报快速订正。系统建立了时空、天气要素一致性调整基数，避免了天气现象、降水量、云量等不同气象要素可能出现的预报不一致现象(引自王海宾等^[21])。

2.2 预报检验

对于上海地区常规要素检验如温度绝对误差、降水分级TS评分等，预报员能够通过在线检验平台(图8)直接进行自定义查询，对各类主客观预报做出定量评估判断，帮助进行预报决策。除此之外，针对本地影响较大的强对流天气，常规的误差、TS评分无法满足预报员对于系统发展特征的误差判断，特别进行了针对强对流天气的一些新的检验方法的开发，如目

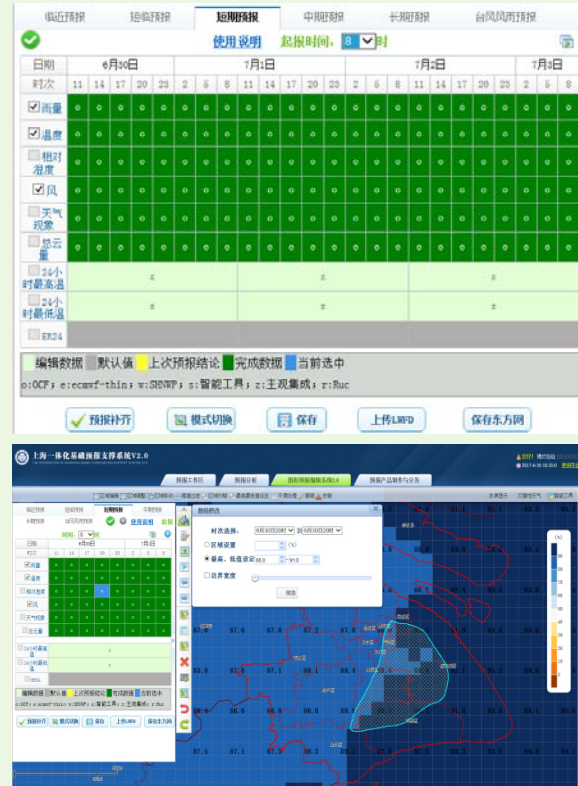


图9 格点管理器及格点编辑工具示意图
Fig. 9 Grid manager and grid edit tools

标对象法、尺度分离和模糊检验算法，与传统的检验方法一起，为局地灾害性天气检验预报业务提供技术支撑。

2.2.1 目标对象检验

目标对象检验法(图10)分为两部分——识别匹配和检验评价。选取预报对象落区预报中的强度分布、区域面积、区域形态(长轴、短轴、轴向)、区域重心位置等诸多要素，与实况分布进行对比，并进行重新校正后的区域相似度分析(交叉相关)，采用加权法综合各项检验指标对总体检验的集合贡献，从而最终获取强对流对象落区预报的检验结果。

2.2.2 尺度分离和模糊检验

采用不同的时间、空间尺度的匹配方法，对选定的强对流预报对象进行评价和检验，即在对应预报格点周围一定的范围(尺度可变)内选取观测格点，将这些观测格点与预报格点进行匹配，再对该区域内预报值和观测值分别进行取平均、取阈值、分等级、计算概率分布等数学方法，然后进行对比检验与评价，采用TS、击中率(POD)等评分办法提供预报产品在不同尺度分布情况下的检验结果。主要的检验技术包括：尺度模糊法、升尺度法、阈值对比法、最小覆盖法、基于概率分布的模糊逻辑法、多等级对比法等。

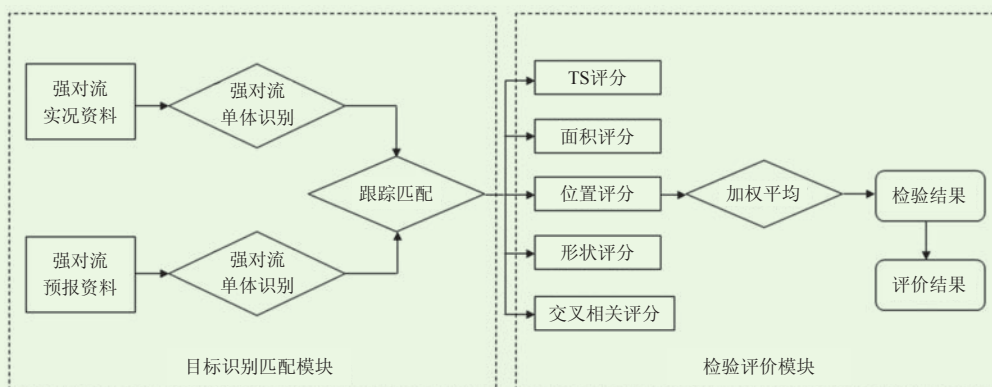


图10 目标对象检验法流程图
Fig. 10 Flow chart of objective recognition and evaluation

2.2.3 强对流预报检验系统

基于以上强对流检验新方法，开发了基于网页版的强对流实时预报检验系统，最先主要针对灾害天气短时临近预报业务系统（SWAN）和NoCAWS的雷达回波外推和定量降水预报（quantitative precipitation forecast, QPF）进行实时预报检验，并根据业务实际运行中出现的问题，不断对后台运行脚本和前端显示界面进行开发和完善。后期又增加了高分辨率EC模式和上海市气象局区域模式的降水预报检验结果，开发了对强对流天气落区展望预报的检验产品。针对部分

检验产品增加了检验评估部分，并针对不同用户（预报员、水文、航空）的需求特点，给出推荐的参数配置和产品显示。后期又将检验技术开发为“短临预报检验评估模块”，集成至MICAPS/SWAN系统中（图11）。从2014年7月开始，在上海中心气象台开展业务试验运行，并在江苏、安徽、湖北、江西等地试验运行并得以应用，为2014年南京青年奥林匹克运动会气象服务提供检验技术支持。系统运行稳定、产品丰富，可以弥补原有检验方法和产品的不足，在各省级部门均实现了业务运行。



图11 SWAN版强对流检验系统界面
Fig. 11 Strong convection evaluation system for SWAN

3 结论与展望

上海市气象局自2014年开展精细化格点预报订正业务，到2016年一体化无缝隙预报业务正式投入，当前能够稳定提供从0~240 h从短临到中短期，以及

10 d以上的华东地区格点天气预报产品，预报要素包括降水率、天气现象、云量、温度、风、湿度、降水等，空间分辨率3~9 km，时间分辨率10 min~12 h。利用本文中介绍的客观化技术生成的格点预报为上海市

格点精细化业务的默认指导产品，为每日的格点精细化预报业务提供依据，并且所有预报结果在一体化平台上显示，结合实时检验平台，为预报工作提供参考。

1) 融合雷达实况外推与数值模式预报，制作0~6 h短时临近精细化客观预报定量降水融合产品。范围覆盖长三角地区，空间分辨率3 km，时间分辨率10 min。利用高分辨率雷达组网观测数据及区域数值模式预报产品，采用COTREC方法进行外推预报，通过强度误差修正及位相误差修正订正数值模式预报反射率，结合实时检验与历史统计方法进行产品订正及融合，进行分钟级的短时临近客观降水预测。

2) 集成全球及区域各主流数值模式预报，制作0~24 h逐1 h、0~72 h逐3 h、1~10 d逐12 h的中短期多模式集成要素预报产品。通过实时对各家模式前期预报误差进行历史统计来订正当前最新时次的模式预报，再通过误差权重进行集成，能够有效校正模式系统误差。此外，采用地形高程、海陆分布资料对预报进行格点转换订正，使产品精细化程度进一步改进。

3) 结合上海中心气象台预报检验系统及强对流实时预报检验系统，上海市气象局一体化格点预报制作系统，现已成为上海市气象局预报员进行日常预报业务的主要支撑平台，预报员在平台格点预报指导产品的基础上订正、编辑并制作各类短时临近、中短期精细化格点和站点预报产品，极大提高了无缝隙预报的工作效率，丰富了各类预报产品的发布形式。

4) 上海无缝隙预报取得了初步进展。然而，当前格点客观预报主要作为背景指导产品，需要在预报员对其进行订正、编辑之后才形成各类最终用户服务产品，离直接应用尚有差距。而在一些先进国家，如德国气象局的AutoWARN系统，能够利用客观系统完

成事件观测识别、自动报警、自动预报、预报员互动决策、自动决策服务的一系列预报服务流程。未来若要进一步提高预报现代化水平，一方面要利用各类新技术如超级集合预报释用、机器学习技术等，减少预报员人工订正不确定性，提高客观预报水平；另一方面，需要面向服务对象，利用大数据分析及人工智能系统，实现传统人工天气预报向自动化影响天气预报的转变。

参考文献

- [1] WCRP. The World Climate Research Programme's recent strategic framework 2005-2015. WMO/TD-No. 1291, 2005[2015-11-15]. http://wcrp.wmo.int/pdf/WCRP_strategImpl_LowRes.pdf.
- [2] World Meteorological Organization World Weather Research Programme. Strategic Plan for the Implementation of WMO's World Weather Research Programme (WWRP) (2009-2017). WMO/TD No. 1505, 2009: 121(37pp) http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/final_WWRP_SP_6_Oct.pdf.
- [3] Golding B W. A system for generating automated very short range forecasts. Meteor Appl, 1998, 5(1):1-16.
- [4] Wilson J, Feng, Y, Chen M, et al. Nowcasting challenges during the Beijing Olympics: successes, failures, and implications for future nowcasting systems. Wea Forecasting, 2010, 25(6): 1691-1714.
- [5] Li P W, Wong W K, Chan K Y, et al. SWIRLS - an evolving nowcasting system. Hong Kong Observatory Technical Note No. 100, 2000.
- [6] 陈雷, 戴建华, 陶岚. 一种改进后的交叉相关法 (COTREC) 在降水临近预报中的应用. 热带气象学报, 2009, 25(1):117-122.
- [7] 程从兰, 陈明轩, 王建捷, 等. 基于雷达外推临近预报和中尺度数值预报融合技术的短时定量降水预报试验. 气象学报, 2013, 71(3): 397-415.
- [8] 杨丹丹, 申双和, 邵玲玲, 等. 雷达资料和数值模式产品融合技术研究. 气象, 2010, 36(8): 53-60.
- [9] 刘还珠, 赵声蓉, 陆志善, 等. 国家气象中心气象要素的客观预报—MOS系统. 应用气象学报, 2004, 15(2): 181-191.
- [10] 赵翠光, 赵声蓉. 华北及周边地区夏季分区降水客观预报. 应用气象学报, 2011, 22(5): 558-566.
- [11] 漆梁波, 曹晓岗, 夏立, 等. 上海区域要素客观预报方法效果检验. 气象, 2007, 33(9): 9-18.
- [12] 王海宾, 杨引明, 范旭亮, 等. 上海精细化格点预报业务进展与思考. 气象科技进展, 2016, 6(4): 18-23.

上海气象现代化推进情况总体评估

气象现代化是一个动态的过程。在本次评估中，上海气象现代化综合评估得分为95.5分。从评估结果看，上海把气象现代化与建设具有全球影响力的科技创新中心、“四个中心”和现代化国际大都市紧密结合，突出“上海风格、中国气派、世界水平、科技引领”，总体上成效十分显著，《实施意见》提出的目标任务已全部完成，上海在全国率先建成结构完善、布局科学、功能先进、技术领先的气象现代化体系，气象监测预报预警体系进一步健

全，气象科技创新能力显著增强，气象公共服务水平明显提高，服务全国、服务华东区域、服务上海的能力全面提升，部分领域接近或达到世界大城市先进水平。同时，上海气象现代化在一些领域还存在短板和不足，应持续加大推进力度。

——摘自《迈向国际一流的大都市气象现代化体系》：上海率先实现气象现代化第三方评估，肖林，陈振林 主编，气象出版社，2016年