

数值模式评估系统MET及其初步应用

潘留杰¹ 张宏芳² 薛春芳³ 王建鹏¹ 刘勇¹

(1 陕西省气象台, 西安 710014; 2 陕西省气象服务中心, 西安 710014;

3 陕西省气象局, 西安 710014)

摘要: MET (Model Evaluation Tools) 是美国国家大气研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR) 数值预报发展试验中心 (Developmental Testbed Center, DTC) 最新研发的数值预报检验、评估系统, 其主要目的不仅在于为模式开发人员提供模式性能的测试工具, 而且方便最终用户通过MET来判别模式的预报能力, 进而获得预报相应的预报指标。MET系统提供了丰富的站点、格点数据接口程序, 它的核心组件集成了模式经典方法评估检验, 高分辨率模式诊断分析, 集合预报、概率预报、台风路径等多种最先进的模式检验评估算法。为了方便用户使用, MET系统还提供基于R语言的多种绘图脚本。在对MET系统简要阐述的基础上, 给出了基于MET系统的面向对象或基于目标的MODE (Method for Object-Based Diagnostic Evaluation) 方法、邻域法的具体降水检验个例, 为使用MET系统进行模式检验、评估提供参考。

关键词: MET, 概率预报, 集合预报, 空间诊断

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.04.005

Numerical Weather Prediction Model Testing and Evaluation Systems MET and Application

Pan Liujie¹, Zhang Hongfang², Xue Chunfang³, Wang Jianpeng¹, Liu Yong¹

(1 Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014 2 Shaanxi Meteorological Service Centre, Xi'an 710014

3 Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an 710014)

Abstract: The MET (Model Evaluation Tools) comprehensively uses many kinds of advanced model testing and evaluation algorithms, such as the classical methods, the analysis of high resolution mode diagnosis, ensemble prediction, probability forecast, and the typhoon path test. It is the newest numerical prediction test, evaluation system developed by DTC (The Developmental Tested Center) in the NCAR (National Center for Atmospheric Research, USA). The main purposes are not only to provide a mode performance test tool for mode developers, but also to give users a forecast ability of distinguishing mode and then getting the forecast index by using MET. MET provides abundant interfaces of stations and grid data; its core component integrates many advanced classic mode test methods above mentioned. In addition, it provides various drawing scripts based on language R for user's convenience. This article briefly explains the MET system, and gives a precipitation test example based on the MET object-oriented method and neighborhood method.

Keywords: MET, probability forecast, ensemble prediction, spatial diagnosis

0 引言

模式检验评估不仅是发展预报系统的重要组成部分, 而且可以用来评价模式预报的准确性^[1-3], 从而为用户提供客观的预报依据。事实上, 由于模式预报系统的底层物理过程十分复杂, 其预报结果存在很大的不确定性^[4-5], 因此, 通过评估检验来获得模式的特定

属性和外在表现就成为用户研究和应用模式的重要手段^[6-9]。模式检验中最古老的方法是通过目视进行误差主观对比分析, 尽管主观的目视误差分析或天气个例分析能够准确给出模式对降水系统诸如锋面、雨带预报性能的详细描述, 然而目视分析存在显著缺陷, 它一方面无法客观分析海量数据, 另一方面通过目视检验获得的结论也具有主观性和非定量性, 因此很难为用户提供有效的判别标准。随着模式检验需求的不断扩大和气象科研工作者的持续努力, 一系列客观的模式评估检验方法得到了快速发展^[10-15]。

MET (Model Evaluation Tools) 是由美国国家大气研究中心 (NCAR) 数值预报发展试验中心

收稿日期: 2014年11月20日; 修回日期: 2015年4月11日
第一作者: 潘留杰 (1978—), Email: pljmtgh57245@sina.com
资助信息: 陕西省自然科学基金 (2015JM4140); 陕西省气象局面上科研项目 (2016M-1); 中国气象局预报员专项 (CMAYBY2014-070)

(DTC)研发的功能强大的数值天气预报检验工具,其主要目的是为数值预报使用者、开发者搭建分析、评估数值模式预报产品的桥梁,它不仅为模式开发者提供实时的模式产品测试环境,为新的模式预报产品投入预报业务提供一揽子评估方案,而且为模式使用者客观把握模式的预报能力提供了有效手段。MET最初版本发行于2008年,主要针对于WRF数值模式产品的检验和评估,其最新版本MET5.0发行于2014年9月,提供各种通用数据格式的模式产品检验评估接口。本文在对MET系统的功能、数据流、算法进行阐述的基础上,给出部分基于MET系统的、国内外先进的、基于空间诊断方法的细网格模式产品检验个例,为使用MET系统进行模式评估提供参考。

1 MET系统架构和数据流

MET的初始研发理念是为短期天气预报提供最为先进的数值天气预报模式产品评估检验方案,这种理念使得MET系统不仅囊括了传统的经典模式检验方法,同时不断地吸纳包括空间分析、诊断分析等在内的一系列新的检验方法。此外,MET增加了模式评估结果置信度检验等功能,这也使得MET快速取代传统的模式评估系统,比如MET已经取代了NCEP的模式实时校验系统。

MET是一种开放系统,可以在DTC网站自由下载(<http://www.dtcenter.org/met/users/>)。MET4.1以前的版本不包括台风路径检验,MET4.1及以后的版本增加了模式预报台风路径检验模块,但MET开发组认为台风路径检验本质上和模式其他要素检验是不同的,DTC给出的无论是台风检验程序包,还是说明文档,均为单独的一个部分:MET-TC,因此本文将在第2节单独阐述MET-TC。MET采用模块化设计,具有很强的适应性,一种方法的检验模块可以独立运行而不依赖于其他组件,这种设计使得MET不仅能够具有复杂数据输入、输出接口的各种大型数据库系统上运行,而且也方便运行于个人计算机。按照MET系统组件的功能的差异,可以将其分为格式转换模块、核心算法模块、统计输出模块以及绘图输出模块四个部分。

图1给出了MET系统的基本架构及数据流。图中带阴影的椭圆表示MET的实际可执行程序,卷角方框表示数据输入或输出。可以看出,MET主要接收五类观测数据:格点数据、MODIS卫星观测数据、WWMCA格式云分析数据、ASCII格式站点观测数据、PrepBuf格式观测数据以及MADIS格式观测数据,其中PrepBuf是NCEP的一种站点格式的观测数据,而MADIS是NCAR的气象数据同化集成系统的站

点格式数据文件。这些数据格式均被转换成NetCDF格式进行计算。在新版本中也可以直接输入Grib或Grib2格式数据。数据绘图程序可以显示转码后的格点或站点数据,生成PS格式图表。MET的核心模块包括格点检验、站点检验、集合预报检验、小波检验、面向对象(基于目标)的MODE检验和时序检验六个部分,其中概率预报检验分别包含于站点检验和格点检验之中。MET的输出主要包括三类:NetCDF、ASCII格式计算结果以及PS格式或PNG格式图片文件。为了清楚反映模式的预报性能,通常还需要对输出结果进行再分析。表1列出了MET5.0部分程序及其功能介绍。

2 台风检验(MET-TC)

MET模式评估系统将台风检验(MET-TC)作为一个独立的部分单独列出。MET-TC的输入文件的数据格式包括两个部分:涡旋追踪软件和实时模式预报产生的ATCF(Automated Tropical Cyclone Forecast)格式的台风路径文件以及ASCII码格式的海岸、岛屿的经纬度文件,输出文件包括两类:NetCDF格式和ASCII码格式的中间文件以及ASCII码格式的评估结果。

MET-TC有三个可执行程序:TC-DLAND、TC-Pairs、TC-STAT。TC-DLAND主要任务在于快速解析限定范围、满足条件的水域到陆地或岛屿的距离。从4.1版本到5.0版本,TC-DLAND的主要变化是将可解析的范围从地球的1/4扩大至全球,解析结果更加精确,但相比以前版本,计算速度下降。由于TC-DLAND解析出的NetCDF格式文件可以重复使用,因此TC-DLAND并不需要在模式检验中实时运行,这也是提高运算效率的一种方法。TC-Pairs主要功能是检验模式对台风位置、强度预报的准确性。TC-Pairs接收两类AFCF格式的文件:1)台风路径预报文件ADECK;2)观测追踪的最佳台风路径BDECK,从而计算模式预报台风的位置、海平面气压、强度等误差。TC-STAT对TC-Pairs的多个计算结果再进行统计分析,给出模式预报性能的具体评估结果。图2给出了MET-TC系统的基本架构及数据流,需要说明的是,作为后处理部分,MET-TC给出了R脚本的绘图程序plot_tcmpr.R,一些相关的脚本并未包含在程序的架构框图中。

3 MET部分检验方法及应用

MET系统包括了传统的经典检验方法,这些方法在模式检验中已得到了较好的应用,因此这里仅简单列出MET计算的一些主要统计技巧评分。在计算这些评分时,MET也利用了两变量的列联表来将事件进行分类,然后将预报事件与观测事件进行匹配并计算一系列评分指数,对于可分为两种类型的离散形变量主

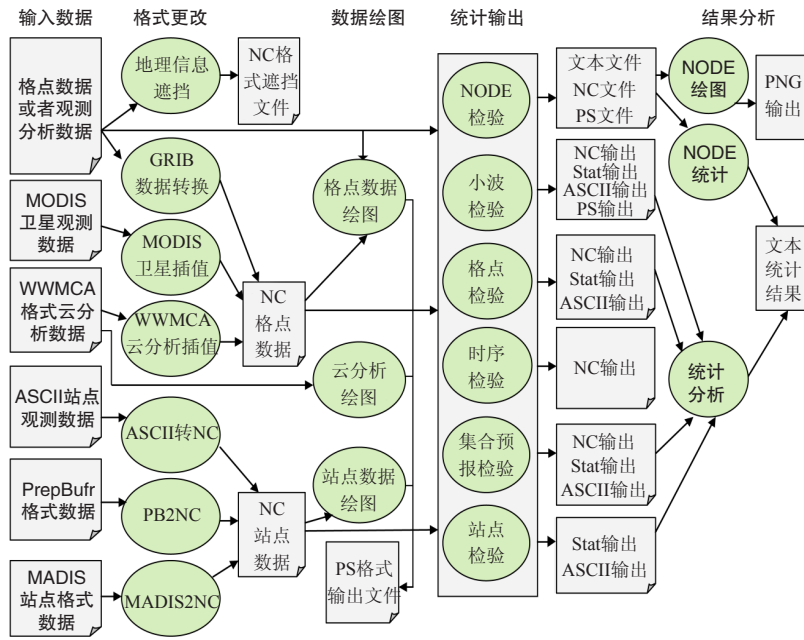


图1 MET系统的基本架构及数据流 (卷角方框表示数据的输入或输出, 带阴影的椭圆表示可执行程序, 箭头表示数据流)
 Fig. 1 The basic architecture of MET systems and data flow (the block represents the input and output data, shaded oval denotes an executable program, arrows indicate the data flow)

要包括: 预报偏差Bias、胜算比OR (Odds Ratio)、GSS (Gilbert Skill Score) 或ETS (Equitable Threat Score) 评分、准确率ACC (Accuracy) 等。对于可分为多种类型的离散型变量来说, 采用了 $n \times 2$ 的列联表将不同分级上事件发生的频率分别归类来计算评分指数, 这种方法也用于检验概率预报中不同事件发生概率的准确性。针对离散型变量, MET主要计算了标准差 (STDEV)、距平相关系数 (ACC)、斯皮尔曼相关系数 (SP_CORR)、Kendall等级相关系数 (KT_CORR)、均方根误差 (RMSE)、误差百分位数等相关指标。

由于近两年概率预报、集合预报、高分辨模式预报产品在预报业务中推广, 因此着重介绍MET系统的概率预报、集合预报和高分辨率空间诊断检验方法。

3.1 概率预报和集合预报

对于普通的概率预报, MET系统通过 $n \times 2$ 的列联表, 按照用户给定的阈值将发生总概率为0~1的事件分为 n 种不同的类别, 以此来评估概率预报的性能, 如果获得事件发生的概率是通过公式计算产生的, 则指定分段区间的中值为事件发生的概率。当然这种方法也可以用来检验集合预报系统所产生的概率预报, 之所以单独列出, 是因为MET针对集合预报及其概

表1 MET主要的模块程序及功能
 Table 1 The main program modules and functions of MET

组件类别	应用程序名称	功能描述
数据转换	Gen-Ploy-Mask	产生指定区域的地理信息文件, 掩盖区域之外的数据
	Pcp-Combine	Grib码数据计算、融合并转换成NetCDF格点观测数据
	ASCII2NC	ASCII站点观测数据转换成NetCDF格点观测数据
	MADIS2NC	MADIS站点格式的同化数据转换成标准的NetCDF格式
核心算法	grid_stat	模式格点预报检验, 要求观测数据与模式数据格点一致
	point_stat	将模式输出数据插值到站点, 计算评分指数
	series_analysis	计算区域内同一格点上一段时间内的模式预报评分指数
	mode_analysis	采用面向对象方法进行空间评估, 计算预报和观测对象的属性差异
	wavelet_stat	将二维的数据分解为强度和尺度, 评估预报在空间上的不确定性
	Ensemble_stat	集合预报检验, 输出等级直方图、离散度、连续等级概率评分等
数据绘图	plot_point_obs	绘制转换格式后的站点数据, 输出PS格式站点图形文件
	plot_data_plane	绘制格点格式的模式预报或观测数据, 输出PS格式格点图形文件
	wwmca_plot	绘制WWMCA格式的云分析数据, 输出PS格式的图形文件
	Mode-Script	用R脚本绘制MODE检验的分析结果, 输出PS格式的图形文件

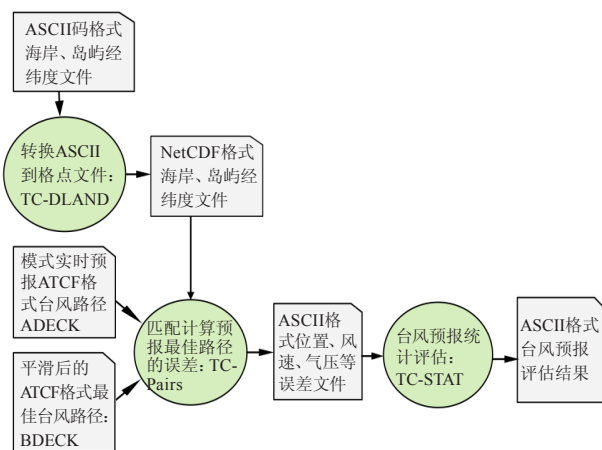


图2 MET-TC系统的基本架构及数据流（方框表示数据的输入或输出，带阴影的椭圆表示可执行程序，箭头表示数据流）

Fig. 2 The basic architecture of MET-TC systems and data flow (the block represents the input and output data, shaded oval denotes an executable program, arrows indicate the data flow)

率给出了独立的评估工具Ensemble_stat。表2给出了MET系统中概率预报检验的列联表，在表2中将每一个概率预报区间内事件出现的概率分为发生和不发生两种情况，“F”代表预报，“O”代表观测； N_{ij} 表示相应类型“预报—观测”发生的次数，其中，N的下标*i*表示预报，*j*表示观测，因此 N_{11} 、 N_{10} 分别表示第一个概率预报区间内降水事件发生和空报的次数； N_{21} 、 N_{20} 则表示第二个概率预报区间，以此类推。然后，分别统计各种可能性出现的次数，在此基础上计算各种评分技巧，计算的评分指数主要包括Brier评分^[16]、联合分布、似然基准率、可靠性图、ROC（Relative Operating Characteristic）分析等。

MET系统检验集合预报时采用通用的方法。首

表2 MET系统概率预报检验采用的 $n \times 2$ 列联表（ N_{ij} 表示不同预报、观测事件发生的种类，其中下标*i*代表预报，*j*代表观测）

Table 2 Contingency table in terms of counts for precipitation (the N_{ij} values in the table represent the counts in each forecast-observation category, where *i* represent the forecasts and *j* represents the observations)

预报	观测		合计
	O=1 (事件发生)	O=0 (事件不发生)	
P_1 =概率区间0~1的中值	N_{11}	N_{10}	$N_{11}+N_{10}$
P_2 =阈值1—阈值2的中值	N_{21}	N_{20}	$N_{21}+N_{20}$
...
P_i =阈值 <i>i</i> —概率1的中值	N_{i1}	N_{i0}	$N_{i1}+N_{i0}$
合计	$N_1=\sum N_{i1}$	$N_0=\sum N_{i0}$	$T=\sum N_i$

先将集合预报转换成单个值的确定性预报或离散事件的概率预报。计算的评分指数包括四类：1) 连续分级概率评分CRPS（Continuous Ranked Probability Score）；2) 等级直方图或Talagrand图；3) “未知”评分IGN（Ignorance score）；4) 概率积分变换PIT（Probability Integral Transform），PIT是模拟的预报成员与观测值离散程度的概率分布表现，其解释意义与Talagrand图一致。其中，CRPS在检验连续变量的概率预报应用最为广泛。CRPS是所有可能阈值Brier技巧的积分，本质上表现的是集合预报变量的累计概率分布函数（CDF）与观测值Heaviside函数之间的差异。MET系统在计算CRPS评分时去除了确定性预报中的平均绝对误差，因此能够直接用来比较集合预报与确定性预报之间的准确性，CRPS越小，表示预报准确率越高，理想情况下CRPS=0。

MET采用Talagrand图来衡量集合预报成员与观测值离散程度分布是否一致。当集合预报与观测具有相同的变化时，观测的等级排名将按照预报成员的离散度均匀分布，绘制出的Talagrand图应该是平直的，但是在大多数情况下集合预报各成员的离散度不够，落在两端的概率要比落在中间的概率要大。Talagrand图并不用来反映预报的准确性，此外，Talagrand图仅仅针对集合成员固定的情况下才有意义^[13]，因此MET给出的Talagrand图更多是针对模式开发者对模式的检验。

IGN是MET给出的集合预报的负向的对数概率密度分布函数，用来检验预报与观测要素的概率分布函数的相似程度，其值越小，表示预报效果越好。在MET中，IGN指数计算时基于集合预报的成员的预报结果满足正态分布，对非正态分布的气象要素，IGN指数并不适用。

3.2 空间诊断分析

天气变量在空间上具有连续性。点对点的传统检验方法拆离了变量的空间关系，其检验结果不仅不具有明确的物理意义^[17-18]，而且近年来新出现的高分辨率模式产品在空间上具有更多的小尺度的变化^[19]，使得传统检验方法无法正确评估模式的预报技巧，因此随着模式的改进，诊断检验方法孕育而生。MET系统提供多种空间诊断检验方法，本文着重叙述其中的MODE及邻域检验方法。

MODE方法的基本观念来自Davis等^[20-21]，实现时首先通过给定的卷积半径R对原始降水场卷积，然后按给定的阈值解析出满足条件的空间降水对象，在此基础上计算各对象的降水强度、质心、轴角、面积复

杂度等各种属性。MET系统可以根据设定的判别标准对独立的降水对象进行组合，并计算组合对象的各种属性。考虑到一个对象的不同属性可能有不同的表现，MET采用模糊逻辑来综合考虑各种属性的总体表现，从而计算预报对象的总收益函数。

式(1)给出了收益函数 $T(a)$ 的计算表达式，式中 a_i 表示对象的第 i 个属性， w_i 表示对象第 i 个属性的权重系数， $C_i(a)$ 表示第 i 个属性的置信水平。 $I_i(a)$ 表示预报对象的第 i 个属性的收益函数，是 a_i 的函数。计算时主要考虑降水强度比率、面积比率、质心距离、轴角偏差、复杂度比率和对象重叠面积比率。

$$T(a) = \frac{\sum_i w_i C_i(a) I_i(a)}{\sum_i w_i C_i(a)} \quad (1)$$

图3给出了日本细网格模式2012年7月4日20时起报，7月6日02—05时的3h降水量预报的中国区域MODE方法检验结果，其中降水观测数据为来自中国气象科学数据网的CMORPH (NOAA Climate Prediction Center Morphing Method) 卫星与自动站逐小时降水融合资料。从图中可以看出识别模式降水预报对象25个(图3a)，观测降水对象18个(图3b)，主要不足在于存在较大范围的空报。

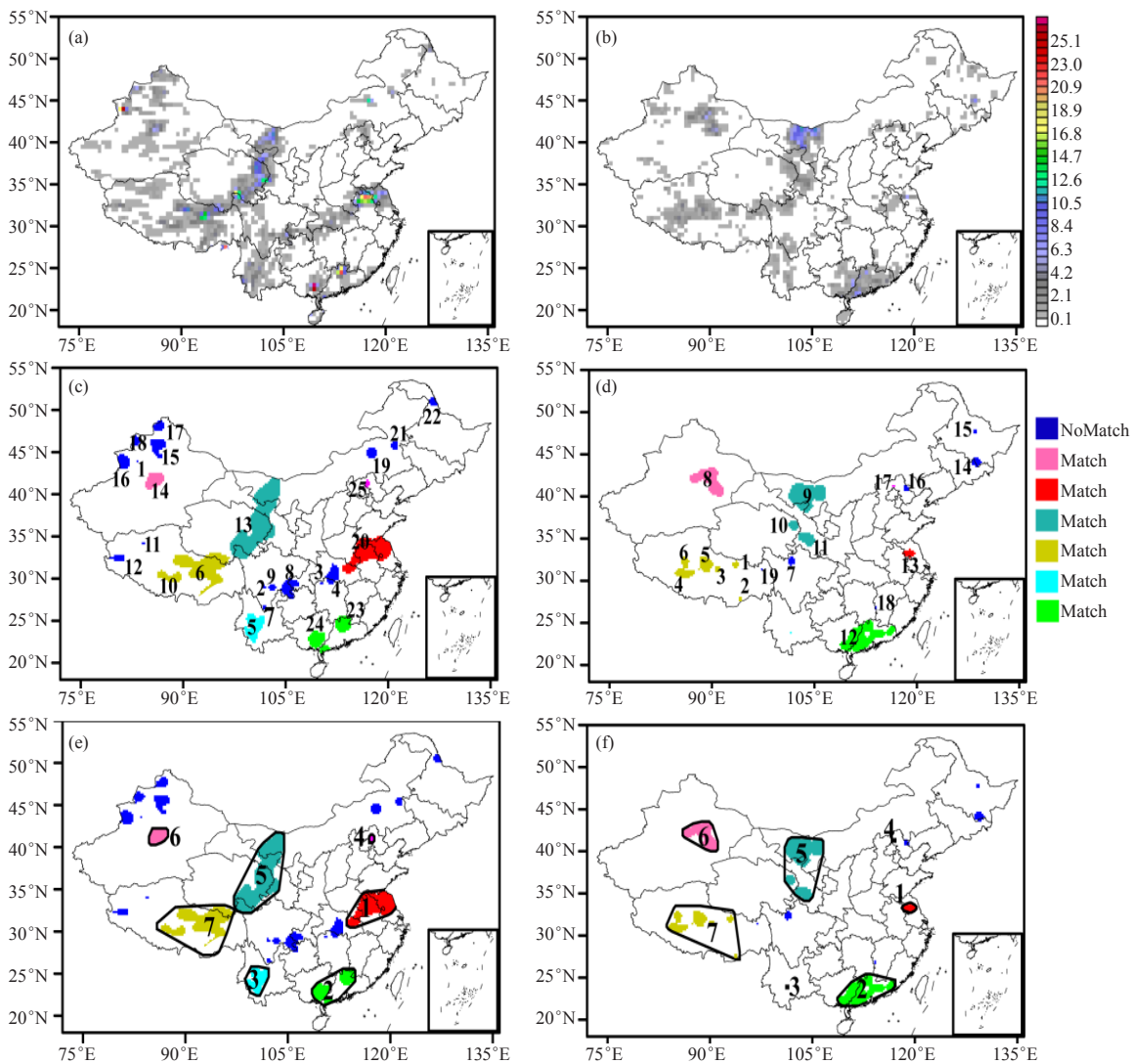


图3 MODE方法评估个例: 卷积半径2个格点, 降水阈值1.0mm时日本模式3h降水量对象解析、识别结果 (a) 模式预报; (b) 观测; (c)、(d) 分别为预报和观测场解析、识别的独立对象; (e)、(f) 分别为预报和观测场解析、识别的组合对象

Fig. 3 A case of MODE method verified. The results of identifying objects at 2 grids of the convolution radius and 1.0 mm of precipitation threshold: (a) model forecast, (b) observation, (c), (d) for the independent objects of forecasting and observation fields respectively, (e), (f) for the composite objects of forecasting and observation fields respectively

相互匹配的预报场独立对象10个(图3c), 观测场独立对象12个(图3d)。按照阈值进行组合后匹配对象7个(图3e、3f)。通过匹配关系就可以计算模式预报与观测独立、组合对象的强度、质心、面积、轴角、复杂度等各种属性的不同表现。表3给出了预报与观测场组合匹配对象的各种属性差异, 可以看出模式能够较好地把握降水的空间位置, 多数组合对象的质心距离小于15km, 轴角偏差多在50°之内, 没有轴角偏差大于90°的匹配对象, 但预报面积显著偏大, 最多偏大6倍以上。从降水强度来看, 模式预报降水的50%分位数与观测基本一致, 90%分位数则预报显著偏强, 组合对象1、2偏强3倍左右。因此对该个例来说预报的整体表现为: 1) 存在显著的空报现象; 2) 预报降水面积显著偏大; 3) 降水强度整体一致, 但雨强中心量级偏大。

表3 组合对象属性及总收益

Table 3 Attributes and total interests of composite objects

组合对象	质心距离 (km)	轴角偏差 (°)	面积 (km ²)			F雨强分位数		O雨强分位数		总收益
			观测	预报	重叠	50%	90%	50%	90%	
1	7.04	22.13	308	36	36	2.5	13.39	1.29	3.3	0.884
2	3.96	12.56	190	298	119	1.34	12.85	1.53	4.01	0.966
3	5.30	48.64	149	4	1	1.38	3.19	0.98	1.25	0.862
4	2.97	74.83	17	6	1	1.09	2.01	1.13	1.81	0.818
5	13.84	24.44	574	366	201	2.38	7.80	2.27	8.25	0.900
6	13.62	51.02	86	189	8	1.53	4.33	1.52	3.67	0.744
7	17.54	2.78	504	208	82	1.68	5.75	1.22	2.38	0.873

MET针对高分辨率数值模式能够更好揭示预报气象要素的空间结构, 但技巧评分却低于粗网格模式的“两难”现象, 采用了邻域法或相邻格点法^[22]来评估高分辨率数值预报模式。

邻域法也被称为模糊法, 是通过比较预报和观测场中对应点临近区域内的特征而命名, 其优点是能

够更好地区别不同尺度上模式预报能力的差异, 与传统校验的差别在于模糊校验假定当预报值相对于观测点位置有偏移时, 预报仍然是可用的, 能够接受的位移的大小或程度被定义为邻域。图4给出了传统检验与邻域检验方法空间匹配差异, 可以看出, 邻域法可以更好地建立高分辨率模式与稀疏的观测站点对应关系, 使检验结果更加合理。

MET基于邻域法评估细网格模式产品计算的主要评分指数有FSS (Fractions Skill Score) 评分、ETS, FSS、ETS分别反映了模式预报的面积和强度与观测的差异。图5给出了利用2011年6月—2013年12月暖季(5—9月) ECMWF细网格模式降水预报资料对秦岭及周边地区降水预报性能的检验实例, 观测资料为与预报时段一致的CMORPH卫星与自动站逐小时降水融合资料, 以此来分辨模式在多大尺度上降水预报性能最佳。从图中可以看出, 在低阈值降水时, 增大模式的尺度有利于同时提高模式降水面积和强度的预报准确率, 而在高阈值降水增大空间尺度尽管有可能提高面积预报准确率, 但使得降水强度预报性能急剧下降。

4 结论和讨论

MET是DTC最新研究的、功能强大的数值预报检验评估工具, 它包括通用数值模式产品检验模块MET及台风路径检验模块MET-TC两个部分。其中, MET模块囊括了模式评估方法中的经典检验技术、概率预报检验技术、集合预报检验技术以及伴随着高分辨率数值预报产品的出现而出现的模式空间诊断检验技术。本文首先阐述了MET、MET-TC的系统架构、数据流, 给出了MET、MET-TC系统的核心程序组件及功能描述; 其次简述了MET系统针对经典检验技术所计算的评分指数, 详细叙述了MET系统针对概率预报、集合预报的检验方法; 最后阐述了随着高分辨率

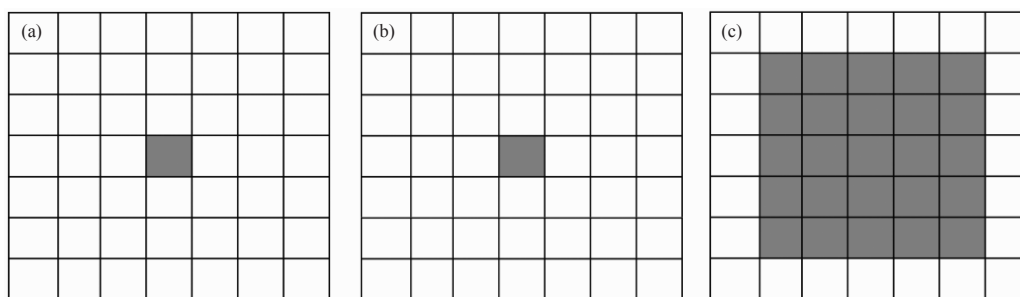


图4 MET系统的邻域法匹配示意图

(a) 观测场; (b) 传统方法检验的匹配模式; (c) 邻域法匹配

Fig. 4 The schematical matching map of the neighborhood methods: (a) the observation field in the domain, (b) matching model of the traditional verification methods at the same grid box in forecast, (c) Fuzzy verification considering a neighborhood surrounding the observations

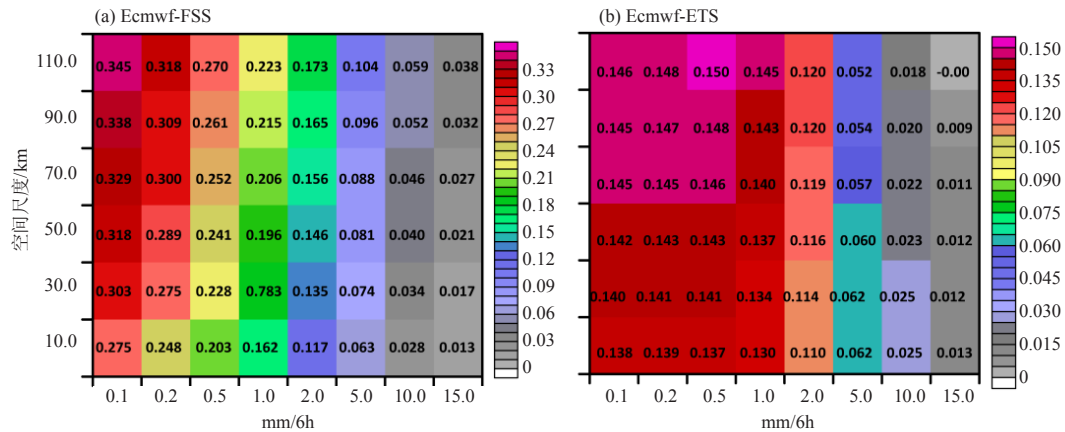


图5 邻域法检验个例：不同空间尺度下ECMWF模式6h降水预报的FSS (a) 和ETS (b) 随不同降水阈值的变化图 (图中数字表示对应尺度、量级下评分的数值大小)

Fig. 5 A case of Neighborhood method verified. Aggregated scores of the ECMWF at different precipitation thresholds and spatial scales: (a) FSS and (b) ETS (the bold numbers refer to the score values at corresponding threshold and scale)

数值预报产品而出现的空间诊断检验方法，并利用两种前沿检验技术MODE、邻域法，对日本、ECMWF细网格模式预报产品进行检验，给出了具体应用个例。从分析的个例来看，MODE方法更适合于综合分析模式预报降水面积、强度、轴角、质心距离等各种不同属性的表现特征，而邻域法在判别模式在不同空间尺度上的预报能力上具有较大的优势，是检验模式预报性能不同方面的有效方法，因此两者结合使用往往能更加全面地分析模式的预报表现。

MET系统对模式产品检验评估的方法齐全、功能强大，本文在综合分析、研究MET系统架构、功能的基础上，对MET系统做了较为详细的阐述及简单应用，以此方便模式使用者、开发者利用MET系统更好地对模式产品进行评估。需要说明的是，MET涉及的各种检验方法繁多，文中的一些方法仅为简单介绍，还有一些评分技巧也没有做出具体说明，更为深入、全面地理解和应用有待于在后期工作中展开。

参考文献

- [1] 陈海山, 孙照渤. 陆面模式CLSM的设计及性能检验II: 模式检验. 大气科学, 2005, 29(2): 272-282.
- [2] 潘留杰, 张宏芳, 朱伟军, 等. ECMWF模式对东北半球气象要素场预报能力的检验. 气候与环境研究, 2013, 18(1): 112-123.
- [3] 潘留杰, 张宏芳, 王建鹏, 等. 日本高分辨率模式对中国降水预报能力的客观检验. 高原气象, 2014, 33(2): 483-494.
- [4] 刘建国, 谢正辉, 赵琳娜, 等. 基于多模式集合的小时气温概率预报. 大气科学, 2013, 37(1): 43-53.
- [5] 陈超君, 王东海, 李国平, 等. 冬季高海拔复杂地形下GRAPES-Meso要素预报的检验评估. 气象, 2012, 38(6): 657-668.

- [6] Skok G, Tribbla J, Rakovec J. Object-based analysis of satellite-derived precipitation systems over the low- and midlatitude Pacific Ocean. Mon Wea Rev, 2009, 137: 4561-4575.
- [7] 何立富, 周庆亮, 谌芸, 等. 国家级强对流潜势预报业务进展与检验评估. 气象, 2011, 37(7): 777-784.
- [8] 贾丽红, 张慧岚, 肖开提·多莱特, 等. T639数值产品对影响新疆主要系统的预报检验评估. 气象, 2012, 38(8): 971-976.
- [9] 刘君, 黄江平, 董佩明, 等. 卫星资料循环同化应用对区域数值预报效果影响分析. 气象, 2013, 39(2): 156-165.
- [10] 闵晶晶. BJ-RUC系统模式地面气象要素预报效果评估. 应用气象学报, 2014, 25(3): 265-273.
- [11] 潘留杰, 张宏芳, 王建鹏. 数值天气预报检验方法研究进展. 地球科学进展, 2014, 29(3): 327-335.
- [12] 杜良敏, 柯宗建. 一种适用于延伸期过程事件预报的检验方法. 应用气象学报, 2013, 24(6): 686-694.
- [13] 张宏芳, 潘留杰, 杨新. ECMWF、日本高分辨率模式降水预报能力的对比分析. 气象, 2014, 40(4): 424-432.
- [14] 邓国, 龚建东, 邓莲堂, 等. 国家级区域集合预报系统研发和性能检验. 应用气象学报, 2010, 21(5): 513-523.
- [15] Brier G W. Verification of forecasts expressed in terms of probability. Mon Wea Rev, 1950, 78: 1-3.
- [16] Hamill T M. Interpretation of rank histograms for verifying ensemble forecasts. Mon Wea Rev, 2001, 129: 550-560.
- [17] Gilleland E, David A, Brown G. Intercomparison of spatial forecast verification methods. Wea Forecasting, 2009, 24:1416-1429.
- [18] Marsigli C, Montani A, Paccagnella T. A spatial verification method applied to the evaluation of high-resolution ensemble forecasts. Meteorol Appl, 2008, 15: 125-143.
- [19] Hoffman R N, Liu Z, Louis J F, et al. Distortion representation of forecast errors. Mon Wea Rev, 1995, 123: 2758-2770.
- [20] Davis C B, Brown B G, Bullock R G. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: methods and application to mesoscale rain areas. Mon Wea Rev, 2006, 134: 1772-1784.
- [21] Davis C A, Brown B G, Bullock R G. Object-based verification of precipitation forecasts, Part II: application to convective rain systems. Mon Wea Rev, 2006, 134: 1785-1795.
- [22] 杜钧, 李俊. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用. 气象科技进展, 2014, 4(5): 6-20.