

潘留杰, 张宏芳, 朱伟军, 等. 2013. ECMWF 模式对东北半球气象要素场预报能力的检验 [J]. 气候与环境研究, 18 (1): 111-123, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11097. Pan Liujie, Zhang Hongfang, Zhu Weijun, et al. 2013. Forecast performance verification of the ECMWF model over the Northeast Hemisphere [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (1): 111-123.

ECMWF 模式对东北半球气象要素场 预报能力的检验

潘留杰¹ 张宏芳² 朱伟军³ 王楠¹ 王建鹏⁴

¹ 陕西省气象台, 西安 710014

² 陕西省气象服务中心, 西安 710014

³ 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

⁴ 西安市气象台, 西安 710014

摘 要 利用 ECMWF 模式逐日分析场 (0 场) 序列和 7 d 预报场序列, 使用气候学方法客观检验 ECMWF 模式对东北半球的预报能力, 主要结果如下: 1) 模式对不同要素场的预报能力呈现出明显的季节性差异, 夏季特别是 7 月预报能力最弱。2) 总体来说, 850 hPa 温度场、500 hPa 高度场与 0 场相关最好, 850 hPa 湿度场与 0 场相关最弱; 随着预报时效的增加, 预报能力总体减弱。3) 大陆上温度场预报总体较 0 场偏高, 而在赤道低纬地区偏低, 模式对赤道附近温度场变率预报能力弱于中高纬地区, 这一特征在其它要素预报中也有不同程度的体现。4) 500 hPa 位势高度预报场与 0 场的差值表现出清楚的起源于里海并向东北传播经贝加尔湖、鄂霍次克海转向东南至日本东部海域的波列, 这一现象在 500 hPa 风场差值图中也有清楚的表现。5) 纬向风预报能力强于经向风, 30°N 附近存在纬向风与 0 场相关系数高值带。6) 总体来说, 模式对高层的预报能力优于低层, 但模式对 700 hPa 风场的预报存在显著差异。

关键词 ECMWF 模式 气候学方法 检验

文章编号 1006-9585 (2013) 01-0111-13

中图分类号 P437

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11097

Forecast Performance Verification of the ECMWF Model over the Northeast Hemisphere

PAN Liujie¹, ZHANG Hongfang², ZHU Weijun³, WANG Nan¹, and WANG Jianpeng⁴

¹ Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014

² Shaanxi Meteorological Service Centre, Xi'an 710014

³ Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

⁴ Xi'an Meteorological Observatory, Xi'an 710014

Abstract Using climatological methods, the forecast performance of the ECMWF model over the Northeast Hemisphere is discussed through analytic comparison between the ECMWF daily analysis and its seven-day forecast products. The results show that: 1) the time series verification indicates that the ECMWF's daily forecast exhibits a seasonal trend, that is the forecast performance for summer was worse than those for the other seasons and the forecast accuracy decreased to its minimum in July. 2) The prediction ability differed among the various meteorological fields. In general, the analysis

收稿日期 2011-06-25 收到, 2012-09-29 收到修定稿

资助项目 陕西省气象局科技创新基金 2012M-37, 陕西省气象局“火车头计划”数值模式应用团队, 陕西省气象局预报员专项 2012Y-6

作者简介 潘留杰, 男, 1978 年出生, 硕士, 主要从事天气预报与研究工作。E-mail: pljmtgh57245@sina.com

showed good correlation with the seven-day forecast 850-hPa temperature and 500-hPa geopotential height while the correlation with the 850-hPa relative humidity was poor. The forecast bias increased with extended prediction time. 3) The seven-day forecast temperature was higher than the ECMWF analysis over the land and lower over the tropical area; the forecast performance over the nearby area of the equator was weaker than over the higher latitude region, showing similar behavior to some degree in other meteorological prediction fields. 4) There was a remarkable OKJ wave chain in the 500-hPa geopotential height or a 500-hPa wind difference between the seven-day forecast and the analysis. 5) The zonal wind forecast was better than the meridional wind forecast field, and showed a high correlation with the analysis near 30°N. 6) Overall, the ECMWF model has better forecasting capability at the high level fields than at the lower level ones, with the exception of the 700-hPa wind fields.

Keywords ECMWF model, Climatological method, Verification

1 引言

在现代天气预报业务中,数值预报具有越来越重要的地位,和一般用天气学方法并结合经验制作出来的天气预报不同,数值天气预报在一定初值和边值条件下,通过数值计算,求解描写天气演变过程的流体力学和热力学方程组,并对未来做出定量和客观的预报 (Haltiner, 1971)。ECMWF 模式是欧洲中心的中期天气预报模式,业务应用表明,该模式产品具有较高的预报水平,对中短期天气预报具有重要的指示意义。

伴随着模式的快速发展,对模式预报能力的客观检验显得尤为重要,实时预报模式通常具有完备的校验系统,譬如NCEP的逐日自动校验组件 (<http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/STATS/STATS.html>[2011-04-01]),这些校验具有实时检验能力并能够将其预报结果和其它模式进行对比。除去实时运转模式自动校验之外,许多气象工作者对模式的预报表现进行评估,Pinson and Hagedorn (2011)使用欧洲区域测站观测资料检验ECMWF集合预报对近地层风场(10 m)的预报能力;Wang et al. (2008)使用2003年1月至2005年11月T213预报场与分析场(0场)资料检验T213L31全球谱模式的预报能力并与ECMWF进行了比较;郑飞等(2007)利用1995~2005年的观测资料对一个热带太平洋海气耦合集合预报系统进行了确定性检验;陈红等(2008)利用IAP数值气候预测系统(IAP DCP-II)和IAP9层大气环流模式(IAP9L-AGCM)对2007年冬季我国气候异常进行了预测,并检验了两个不同系统和模式对2008年1月我国气候异常的预测能力;陈海山和孙照渤(2005)利用大量的陆面外场观测资料,针对不同类型的陆面过程,对所发展的

陆面模式CLSM的性能进行检验;卫捷等(2005)分析了2004年夏季短期气候集成预测产品的预报能力并对其进行了检验;管成功等(2006)利用2002~2005年T213模式的降水预报值和全国100个标准测站的降水实况资料,检验T213对我国不同区域、时段降水过程的预报能力;李旭等(1998)检验了中国科学院大气物理研究所的全球海洋环流模式对ENSO事件的三维结构特征及其演变的模拟能力;鲍媛媛(2006)对2006年6~8月T213模式中期96 h数值预报产品进行了统计和天气学检验,并与ECMWF模式同类产品进行了对比分析;蔡芎宁(2010)利用T639模式对2009年9~11月预报产品进行天气学检验并与ECMWF、日本预报模式进行比较;王雨和李莉(2010)应用TS评分等统计方法对比2008年2月至2009年3月GRAPES_Meso V3.0模式与WRF、MM5等其它模式预报能力的差异。这些检验有利于加深对数值模式的认识,为更好地利用模式产品做出有效的天气预报有重要的作用。但这些工作要么是针对不同过程模式产品预报能力的天气学检验,要么是对气候模式的预测能力检验,中短期模式产品的预报能力客观检验分析相对较少,然而作为中短期模式逐日预报产品,随着时间的累积,可以将其预报序列与分析场序列进行统计分析来做气候学检验,客观评估模式预报能力。

模式的性能在气候学上主要表现为两个方面:一是平均态,二是变率(张宏芳和陈海山,2011a,2011b)。平均态表征了模式在一定时间尺度下对气候背景的刻画能力,而变率对正确预报逐日天气至关重要。本文利用ECMWF模式逐日分析场序列和7 d预报序列客观检验模式对东北半球的预报能力,在分析模式预报场对平均态的刻画能力的基础上,进一步检验预报场与分析场的相关性,为预报

员整体把握模式的预报能力提供参考,从而有助于预报员在日常预报业务中利用模式产品做出更加有效的预报。

2 资料和方法

2.1 资料

采用资料为 ECMWF 北半球逐日 08:00 (北京时间,下同)气象要素(海平面气压,500 hPa 位势高度,200 hPa、500 hPa、700 hPa、850 hPa 风场,700 hPa、850 hPa 相对湿度,850 hPa 温度)7 d 的预报场与 0 场(分析场),0 场资料长度为 2009 年 5 月 4 日至 2010 年 12 月 31 日,与 0 场对应的预报场资料逐日向前递推,分辨率为 2.5° (纬度) $\times$ 2.5° (经度),ECMWF 逐日分析场与预报场资料由中国气象局下发用于日常预报业务。时限约为 2 a 的资料显然难以用来做气候分析,然而本文目的在于检验模式对气象要素逐日的预报能力,而不考虑预报能力的年际变化,时限约为 2 a 的资料序列基本可以满足要求。此外,地形对气象要素场有重要影响,研究中通常不考虑高原地区,但本文主要研究 0 场与预报场之间的关系,高原地区仍然可以用来比较分析。

2.2 方法

2.2.1 异常相关系数、均方根误差

在模式预报能力检验方面,异常相关系数(abnormal correlation coefficient, ACC)和均方根误差(root-mean-square error, RMSE)是最普遍实用的方法(Joliffe and Stephenson, 2003)。异常相关系数最大为 1.0,在预报检验中,当异常相关系数大于 0.6 时,通常认为预报是成功的(Wang et al., 2008),ACC 与 RMSE 的表达式为:

$$ACC = \frac{\sum_i (y_{ip} - \bar{y}_{ip})(y_{ia} - \bar{y}_{ia})}{N \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (y_{ip} - \bar{y}_{ip})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (y_{ia} - \bar{y}_{ia})^2}}, \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (y_{ip} - y_{ia})^2}, \quad (2)$$

其中, y_{ip} 为格点 i 上的预报值, y_{ia} 表示相应格点上的分析值, $\bar{y}_{ip}$ 、 $\bar{y}_{ia}$ 分别表示第 i 个格点上的预报和分析平均值。在计算时间相关时, N 表示每个格点上对应的有效时次的总数,得到的相关系数为一个二维的空间平面,反映了预报能力在时间上的空

间变化;计算空间相关时, N 为空间上总格点数,相关系数为一个时间序列,表示预报能力在空间上的时间变化。

2.2.2 泰勒图

泰勒图方法(Taylor, 2001)主要评估多模式的预报能力,它能够多模式模拟结果与分析场的相关、标准差、均方根误差 3 个变量显示在 Taylor 图中以全面清楚地反映模式的模拟能力,文中虽然检验单模式的预报能力,但同样可以使用泰勒图方法。所要说明的是在泰勒图中的相关系数为不同要素的异常场先按空间求相关,再按时间求相关。不同要素预报场相对于分析场的标准差为

$$\sigma = \sigma_p / \sigma_A, \quad (3)$$

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ip} - \bar{X}_p)^2}, \quad \sigma_A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ia} - \bar{X}_a)^2}, \quad (4)$$

其中, σ_p 表示模式预报场的标准差, σ_A 表示模式分析场的标准差, N 为空间上总格点数, X_{ip} 、 X_{ia} 分别为第 i 个格点上预报值与分析值, $\bar{X}_p$ 、 $\bar{X}_a$ 分别为预报场和分析场的平均值。

3 预报能力检验

3.1 时间变化

ACC 相关系数的时间变化序列整体表明,随着预报时效的增长,ACC 逐渐下降,850 hPa 温度场时间变率预报最好,500 hPa 位势高度次之,700 hPa 相对湿度最弱,但 500 hPa 位势高度场 24~72 h ACC 时间相关系数优于 850 hPa 温度场。24 h 高度场与 0 场时间变化相关系数基本维持为 1 左右(图 1c),这表明在实际预报中,模式对 24 h 500 hPa 高度场预报可以看成是观测场。以 ACC 相关系数 ≥ 0.6 来表示预报准确性,分析表明 850 hPa 温度场(图 1a)、500 hPa 位势高度场(图 1c)预报整体比较成功,168 h 内 ACC 均在 0.76 以上;72 h 内 700 hPa 相对湿度(图 1b)、120 h 内 500 hPa 风场(图 1d)预报相对成功。除相对湿度 ACC 时间变化趋势相对较弱外,其它要素场 ACC 时间序列存在明显的季节变化,7 月左右,ACC 表现最差,Wang et al. (2008) 的研究认为模式对 7 月气象要素场预报能力较差主要是由于受东亚夏季季风的影响,多数模式对东亚夏季季风的预报表现不理想,导致北半球夏季 ACC 偏弱。

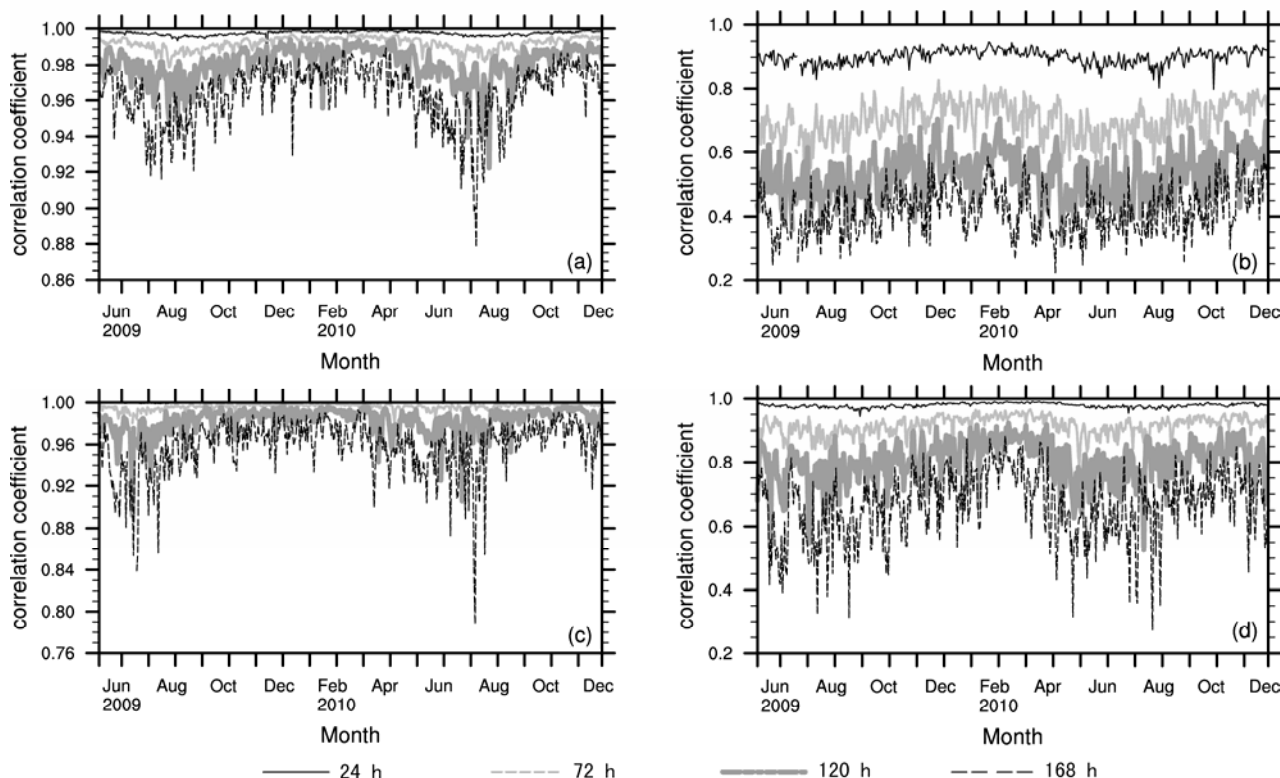


图1 ECMWF模式异常相关系数的时间序列: (a) 850 hPa温度; (b) 700 hPa相对湿度; (c) 500 hPa位势高度; (d) 500 hPa风

Fig. 1 Time series of the ECMWF model anomaly correlation coefficients (ACCs): (a) Temperature at 850 hPa; (b) relative humidity at 700 hPa; (c) geopotential height at 500 hPa; (d) wind at 500 hPa

3.2 空间分布

平均态和变率是模式性能的重要体现,故在检验模式预报能力时主要从这两个方面进行分析,根据不同时次预报场与0场资料有效时段内平均态的差值场来体现模式对平均态的预报能力;检验变率时,主要讨论有效时段内,预报场与0场时间相关系数ACC的空间变化。

3.2.1 温度场

图2显示,欧亚大陆上主要为正值区,海洋上存在负值区,正值中心位于高原的东北区域,负值中心位于印度洋以西的洋面上。值得注意的是在大陆上巴尔喀什湖[$(45^{\circ}\text{N}, 65^{\circ}\text{E})$ 附近]以西的地区存在弱的负值中心,这个负值中心从24~168 h预报场上一直存在,分析认为,巴尔喀什湖附近的冷空气强度无论是冬季或夏季对我国天气都有较大影响,冬季经西伯利亚从西北路入侵我国的冷空气大多数在此堆积,然后向南爆发,夏季该处的冷气团向南入侵,与南方暖湿空气交汇,经常造成大范围的降水,该处的冷空气强度预报偏强,说明模式对受该地区冷空气影响的寒潮预报偏强或降水预

报偏大。当然,受所用资料的限制,结论的普遍意义有待于进一步检验。

图2还显示,随着预报时效的增加,差值逐渐增大,24 h预报场中,差值最大为 1.21°C ,最小值为 -0.86°C ;到168 h预报场中,差值最大为 1.67°C ,最小为 -1.99°C ,表明随着预报时效的增加,模式误差线性增长。

预报场与0场的时间ACC相关系数空间分布显示,赤道附近相关系数明显偏小,24 h预报场中, 18°N 以北地区相关系数达0.9以上, 160°E 的赤道附近达到最小为0.464。随着预报时效的增加,相关系数低值区有所增大,但24~120 h预报场ACC变化不显著,144~168 h预报场ACC明显减小, 160°E 的赤道附近ACC最小值仅为0.06, 65°N 子午线附近相关系数减小到0.731,以ACC大于0.6为阈值,表明144~168 h 160°E 赤道附近太平洋地区的温度预报对日常预报业务指示意义不大,但在中高纬度,6~7 d的温度预报仍然比较成功,特别是在 90°E 以东的我国大部分地区,ACC一直维持在0.9以上。在日常预报业务中,冷空气入侵常常

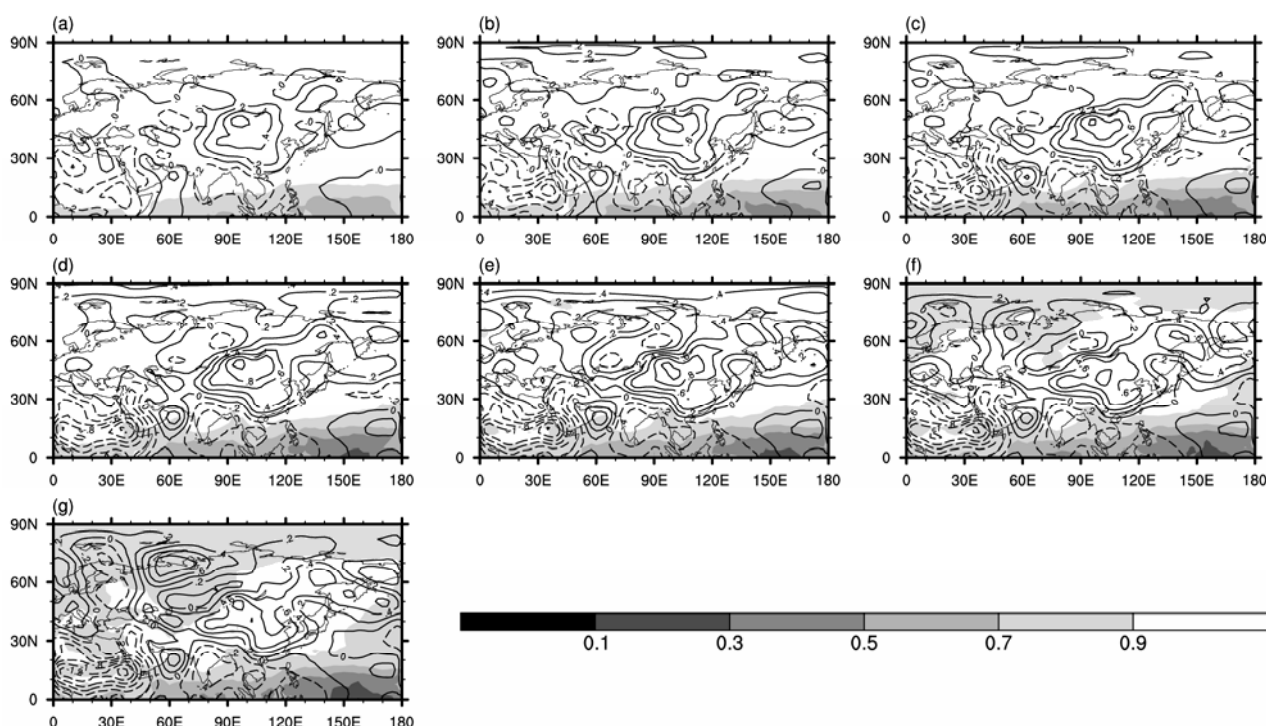


图2 (a) 24 h、(b) 48 h、(c) 72 h、(d) 96 h、(e) 120 h、(f) 144 h、(g) 168 h ECMWF 850 hPa 温度预报场与分析场的差值(等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和时间 ACC (阴影)

Fig. 2 The ACC (shadings) and the difference (isolines, units: $^{\circ}\text{C}$) between (a) 24-h, (b) 48-h, (c) 72-h, (d) 96-h, (e) 120-h, (f) 144-h, and (g) 168-h temperature forecast fields and the analysis fields at 850 hPa

造成系统性的降水。温度场的成功预报使得这一类降水的定量判断更加有效。此外, 通过对比分析 850 hPa 温度预报场与地面测站观测资料, 有助于逐日气温的准确预报。

3.2.2 相对湿度

图 3 给出了 700 hPa、850 hPa 相对湿度预报场与 0 场的差值及 ACC 相关系数。24 h 700 hPa 预报场上显示巴尔喀什湖以北、贝加尔湖以东存在小片的差值负值区; 其余均为正值区, 最大正值 5.765 位于赤道附近, 最大负值为 -6.0。随着预报时效的增加, 负值区的范围逐渐向南、向北扩展, 差值振幅也快速增大。168 h 预报场上 35°N 以北基本均为负值区, 最大正值为 10.41, 最大负值为 -11.79, 正负值中心位置不变。850 hPa 上 24 h 差值负值中心位于贝加尔湖、巴尔喀什湖及以南的区域, 最小值为 -5.99; 其余地区均为正值, 正值中心位于中南半岛, 最大值为 5.728, 72 h 以后高纬度上出现负差值区。随着预报时效的增加, 差值逐渐增大, 负值中心位置少动, 最小值为 -8.287, 正值中心移到 (15°N , 40°E) 附近的沙特阿拉伯境内。

700 hPa 湿度场差值图显示, 赤道低纬度地区, 预报场较实际偏强, 大陆高纬度地区预报较实际偏弱。这表明, 对深厚的天气系统来说, 高纬度地区模式预报降水可能较实际偏小, 而低纬度地区降水预报可能较实际偏强。对于 850 hPa 来说, 湿度场系统性的偏差不明显, 而且差值较 700 hPa 明显偏小。因此, 模式对浅薄系统的降水预报可能与观测场更为一致。

相对湿度 ACC 相关系数的空间分布显示, 24~48 h 850 hPa、700 hPa 西太平洋附近的区域为 ACC 低值区, 24 h 700 hPa 上最小相关系数为 0.535, 850 hPa 最小相关系数为 0.448。随着预报时效的增加, 高纬度地区 ACC 相关系数迅速减小, 168 h 700 hPa 上最小相关系数为 -0.110, 850 hPa 最小相关系数为 -0.014, 低值中心均位于北冰洋上。24~168 h, 35°N 以南、 120°E 以西的范围内为 ACC 高值区, 且随着预报时效的增加, ACC 减弱不明显。分析认为, 这可能与该区域风场变率成功有关, 30°N 为稳定的信风, 纬向风的 ACC 相关系数在该区域有较好的表现, 同样受越赤道气流的影响, 该地区经向风 ACC 相关系数也较高。关于风场的分析在后面有详细的叙述。

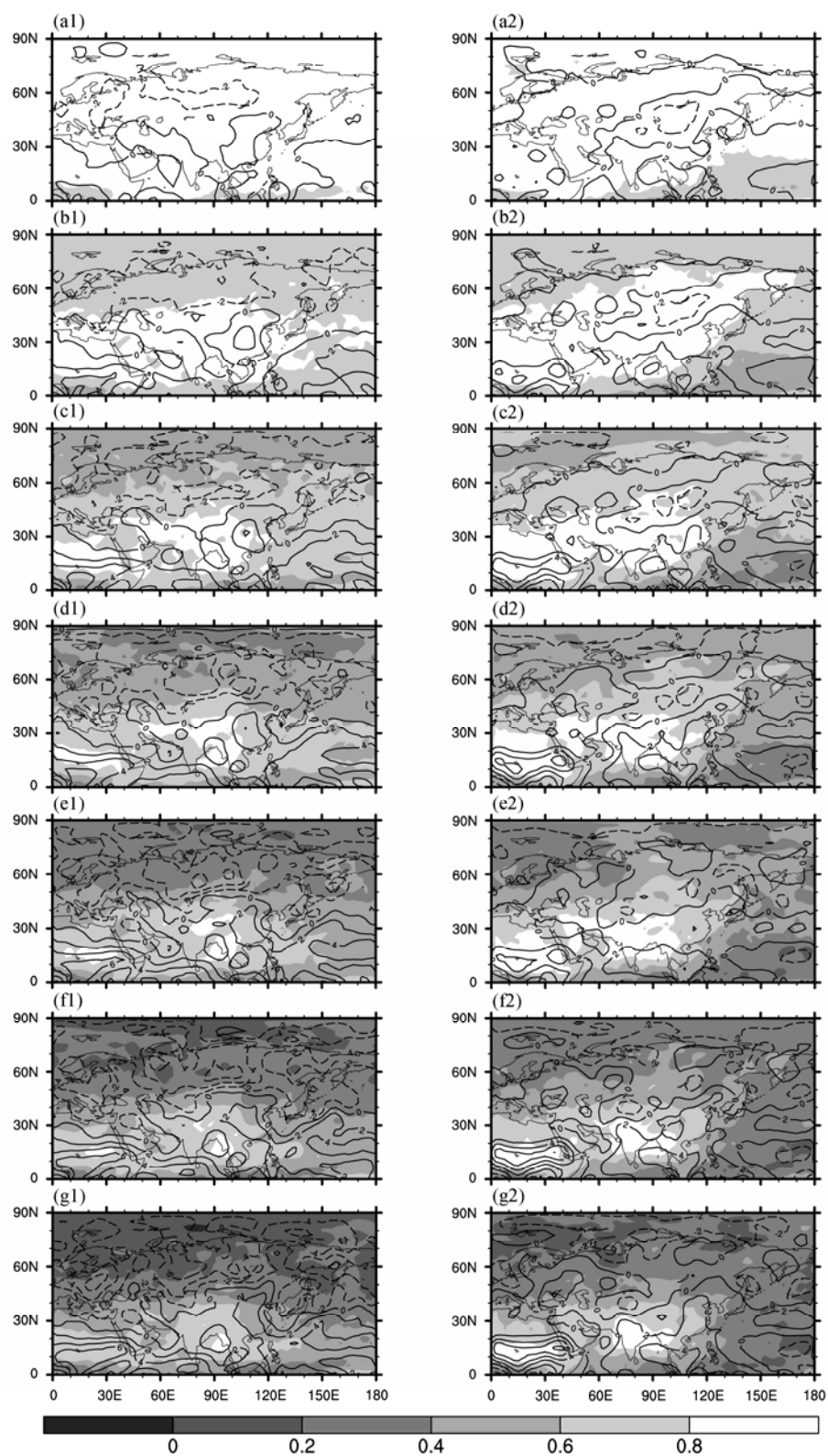


图3 (a1、a2) 24 h、(b1、b2) 48 h、(c1、c2) 72 h、(d1、d2) 96 h、(e1、e2) 120 h、(f1、f2) 144 h、(g1、g2) 168 h ECMWF 700 hPa (左列) 和 850 hPa (右列) 相对湿度预报场与分析场的差值 (等值线) 和时间 ACC (色斑)

Fig. 3 The ACC (shadings) and the difference (isolines) between (a1, a2) 24-h, (b1, b2) 48-h, (c1, c2) 72-h, (d1, d2) 96-h, (e1, e2) 120-h, (f1, f2) 144-h, and (g1, g2) 168-h relative humidity forecast fields and the analysis fields at 700 hPa (left panel) and 850 hPa (right panel)

3.2.3 高度场

500 hPa、999 hPa 高度预报场与 0 场的差值、相关系数如图 4 所示, 500 hPa 差值场显示出类似于 850 hPa 温度场的空间形态。除 144 h 预报场外, 负值区均位于赤道低纬度附近及印度洋地区, 正负差值分界线大约从西北角高纬度地区斜插向东南低纬度地区。24 h 500 hPa 预报差值场有两个高中心, 分别位于贝加尔湖以南及鄂霍次克海附近, 低值中心位于埃及境内。随着预报时效的增加, 负值区逐渐向北、向东扩展。

大气的低频变化是中期天气和短期气候预测的关键, Blackmon (1976) 和 Blackmon et al. (1977, 1979) 在一系列的诊断研究中发现: 大气变化的方差并不主要来自于逐日天气预报所关心的高频变化, 而是来自周到月季时间尺度的低频变化。这种低频变化在全球范围内表现为遥相关, 在区域范围内表现为波列。图 4 中 500 hPa 高度场差值计算方法为预报场均值减去 0 场均值, 经过平均以后基本滤除了大气中的高频变化。如果模式预报场与 0 场模拟完全吻合, 则差值为 0, 如果差值不为 0 但效果理想, 由大气运动等方程驱动的模式预报应该能够体现这种波列。24 h 500 hPa 高度场中差值较小 (见图 4), 48 h 预报场里海附近为差值相对低值区, 俄罗斯以北为差值高值区, 俄罗斯南部贝加尔湖以北为差值相对低值区, 贝加尔湖以南的我国境内为差值高值区, 日本海附近为差值低值区。随着预报时效的增加, 这种高低值中心表现得更加明显, 168 h 预报场上, 这个波列表现非常清楚。Wang (1992) 定义起源于里海向东北传播经贝加尔湖、鄂霍次克海转向东南至日本东部海域的波列为里海—鄂霍次克海—日本遥相关 (OKJ 波列), 王亚非 (2010) 用射线追踪理论得出不同波数的波列路径, 在 168 h 差值图中, 可以看出弱的波 4 和强的波 6 路径, 这一点在图 5 风场差值图中也有清楚的表现。

海平面高度场预报差值图上最明显的特征是大陆高原及其周围区域内为负值区域, 可能的原因是受地形的影响。

24~96 h 高度场预报时间相关系数的空间分布与温度场有类似的空间分布特征——低纬相关系数表现弱于高纬度地区, 120~168 h 高纬度相关系数快速减小。总体来说, 高度场时间相关系数的空间分布表现较好, 最小值大于 0.5, 特别是在中纬度大陆上有较好的表现。

3.2.4 风场

图 5 为 500、850 hPa 预报场与 0 场的风场差值图, 24 h 500 hPa 预报场与 0 场的差值显示, 我国东海附近为气旋性涡旋, 大陆上存在弱的反气旋性涡旋, 48~144 h 差值图上, 反气旋性涡旋一直维持, 但强度变化不大, 168 h 反气旋涡旋强度还略有减弱; 大陆上中低纬度地区, 里海附近存在一个反气旋性涡旋, 贝加尔湖地区存在一气旋性涡旋, 我国渤海湾地区存在反气旋性涡旋, 这些气旋、反气旋中心与 500 hPa 位势高度图上波数为 4 的 OKJ 波列高低压中心基本一致, 同样, 在大陆的中高纬度地区, 里海西北部存在气旋性涡旋, 俄罗斯及以北的地区为大范围的反气旋中心, 鄂霍次克海附近为气旋性中心, 与波数为 6 的 OKJ 波列路径基本一致。850 hPa 差值图上, 海洋上为反气旋中心, 随着预报时效的增加, 强度略有增加, 里海西北部气旋性涡旋与俄罗斯及以北地区的反气旋性涡旋与 500 hPa 基本一致, 贝加尔湖地区的气旋性涡旋在 850 hPa 上表现不明显。

图 6 为 500、850 hPa 纬向风、经向风预报场与 0 场的相关系数, 500 hPa 图上 24~48 h 纬向风、经向风预报低纬相关系数小于高纬, 纬向风 72~168 h 高纬度风场相关系数明显减小, 在 25°N~55°N 之间存在相关系数高值带。随着预报时效的增加, 高值带的宽度逐渐变窄, 168 h 预报相关系数图上, 高值带缩小到 25°N~30°N 之间。由于受科里奥力的作用, 30°N 附近为稳定的东北信风, 这一高值带可能与模式考虑信风的作用有关。相比之下, 经向风相关系数的空间分布规律性不强; 随着预报时效的增加, 850 hPa 上纬向风、经向风相关系数也逐渐减小。与 500 hPa 有明显差别的是, 24~96 h 预报场上, 中纬度地区纬向风相关系数低于高纬度与低纬度地区, 而在 20°N 以南与赤道之间存在相关系数的高值带, 30°E~150°E 之间表现得更加明显, 可能的原因是 850 hPa 风场受地形影响较大; 40°E~70°E 之间的赤道附近经向风表现为相关系数高值区, 可能与越赤道气流、索马里急流等有关。

850 hPa 24 h 纬向风最大相关系数 0.989, 最小相关系数 0.82 出现在子午线附近的赤道上, 平均值为 0.959, 与此相比, 24 h 经向风最大相关系数为 0.988, 最小相关系数为 0.603, 出现在 100°E~120°E 之间的赤道附近, 平均为 0.914, 表明纬向风预报

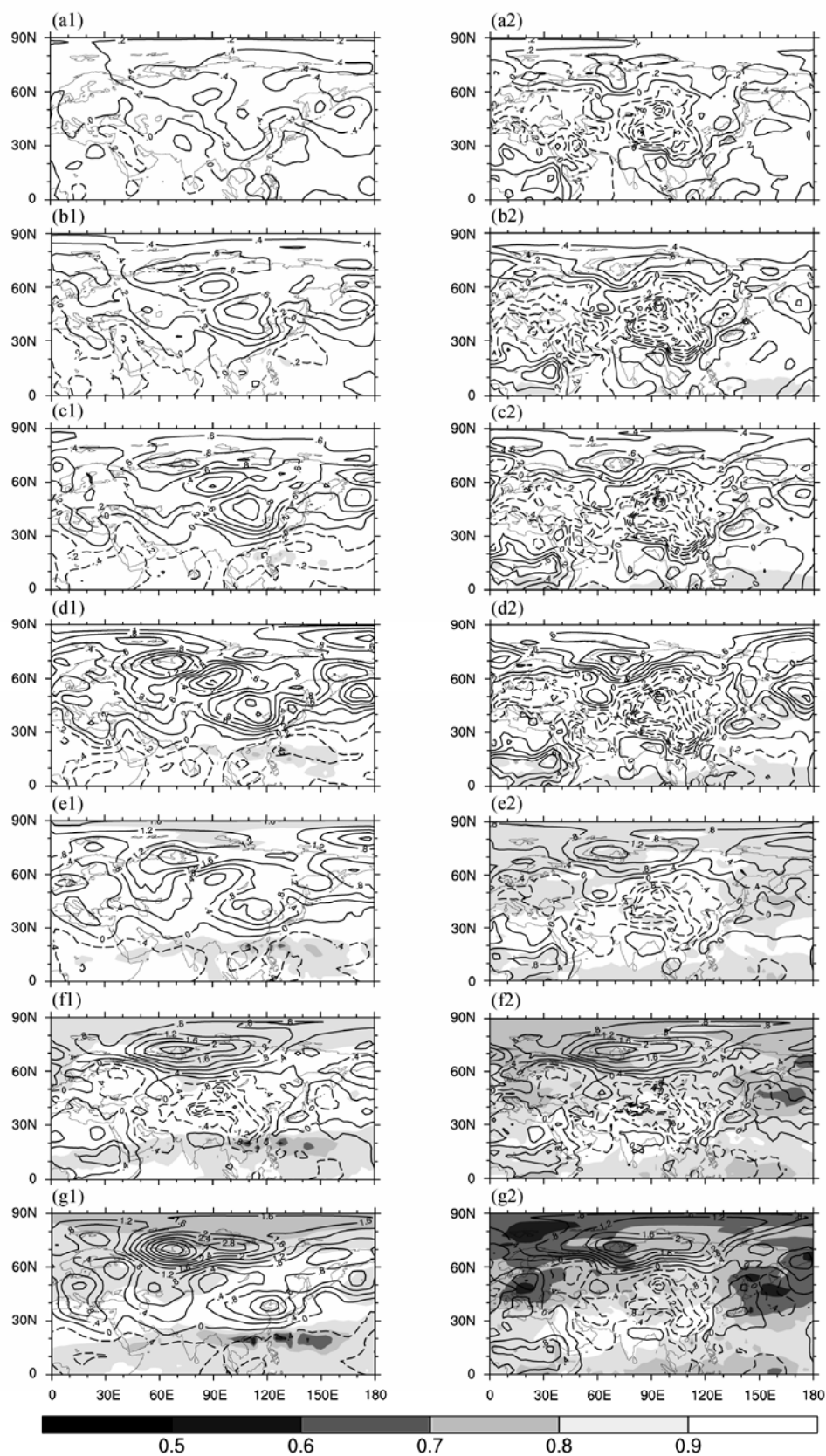


图4 同图3, 但为 500 hPa (左列) 和 999 hPa (右列) 高度预报场与分析场的差值 (等值线, 单位: dagpm) 和时间 ACC (色斑)

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the ACC (shadings) and the difference (isolines, units: dagpm) of geopotential height forecast fields and the analysis fields at 500 hPa (left panel) and 999 hPa (right panel)

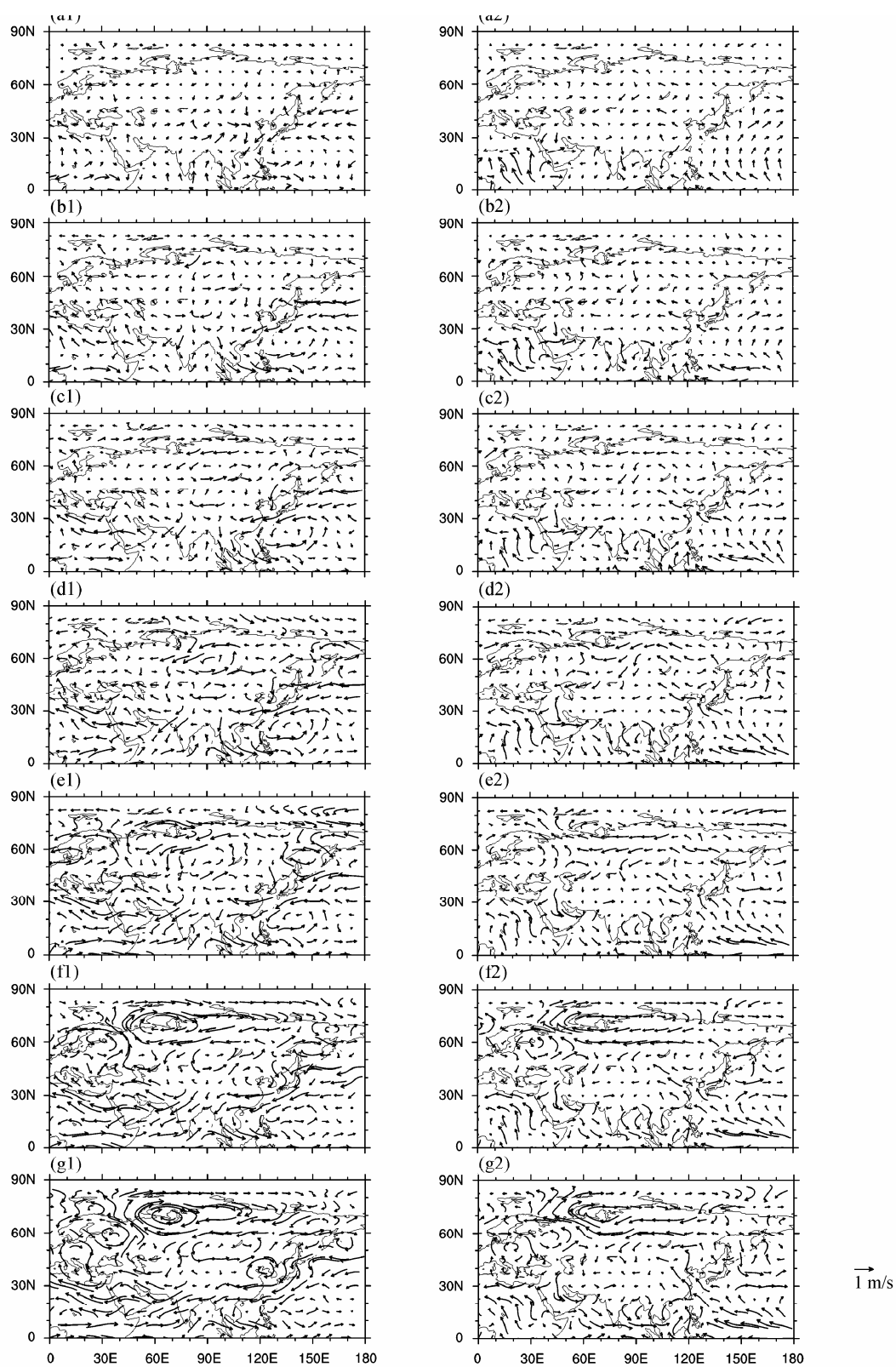


图5 (a1、a2) 24 h、(b1、b2) 48 h、(c1、c2) 72 h、(d1、d2) 96 h、(e1、e2) 120 h、(f1、f2) 144 h、(g1、g2) 168 h ECMWF 500 hPa (左列) 和850 hPa (右列) 风场预报场与分析场的差值

Fig. 5 The difference between (a1, a2) 24-h, (b1, b2) 48-h, (c1, c2) 72-h, (d1, d2) 96-h, (e1, e2) 120-h, (f1, f2) 144-h, and (g1, g2) 168-h wind field forecast and the analysis at 500 hPa (left panel) and 850 hPa (right panel)

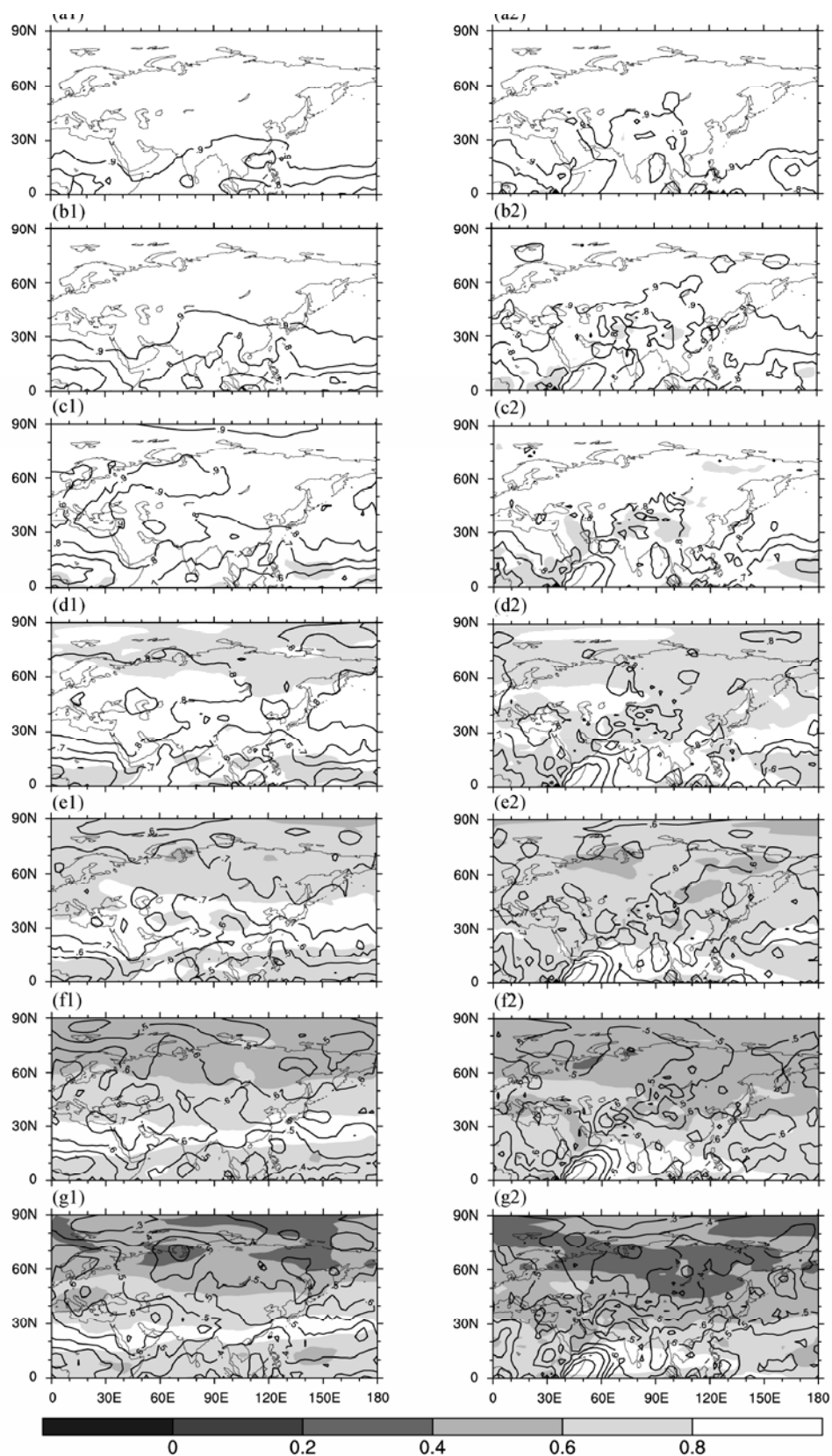


图6 同图5, 但为风场的时间ACC (阴影为纬向风, 等值线为经向风)

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for the wind field ACC (shadings denote zonal wind, isolines denote meridional wind)

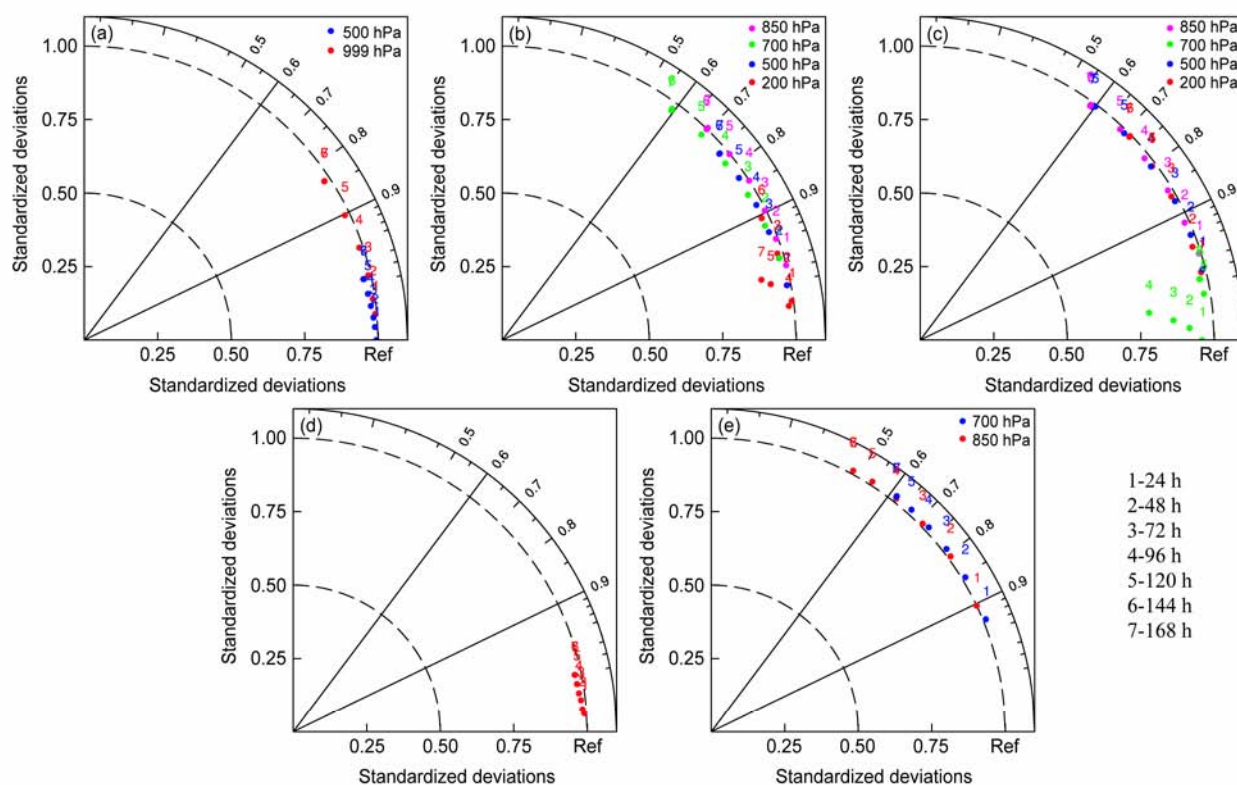


图7 ECMWF模式 (a) 500 hPa、999 hPa高度场、(b) 纬向风场、(c) 经向风场、(d) 850 hPa温度场和 (e) 湿度场的泰勒图 (参考点Ref为ECMWF的分析场; 预报场到原点的距离代表其相对于参考点的标准差; 预报场方位角的余弦代表其与参考点的相关系数; 预报场到参考点的距离代表其均方根误差)

Fig. 7 The Taylor diagrams of ECMWF models forecast fields: (a) Geopotential height at 500 hPa and 999 hPa, (b) zonal wind, (c) meridional wind, (d) temperature at 850 hPa, and (e) relative humidity (The reference point Ref is the 0 field. The distance from the forecast field to the coordinate axis origin means standard deviation compared to the Ref. The correlation coefficient between the forecast field and the Ref is shown by the cosine of the azimuthal angle, and its root-mean-square difference is given by the distance from the forecast field to the Ref)

优于经向风, 这一趋势在纬向风、经向风场预报中一直维持, 168 h 预报中表现得更加明显, 168 h 纬向风格点最大相关系数为 0.908, 最小相关系数为 0.246, 相关系数平均值为 0.658, 而经向风最大相关系数为 0.786, 最小相关系数为 0.065, 相关系数平均值为 0.477。

3.3 泰勒分析

图 7a 显示 7 个时次 500 hPa 高度场与 0 场的相关系数均在 0.95 以上, 999 hPa 的相关系数也达到 0.80 以上。随着预报时效的增加, 相关系数有所下降, 预报场相对于 0 场的标准差接近于 1, 均方根误差随着预报时效的增加线性增长。泰勒图中, 参考点表示与预报场对应的 0 场, 其自相关、标准差为 1, 均方根误差为 0; 均方根误差表征预报型态与 0 场的相似性, 相对 0 场的标准差则表示预报场对 0 场中心振幅的模拟能力 (张莉等, 2008), 从均方根误差可以看出, 对于高度场无论是振幅还是

相似性, ECMWF 模式的预报结果均比较理想; 值得注意的是 144、168 h 高度预报场在泰勒图中的位置几乎重合, 其它要素也有类似的表现。图 7b 和 7c 分别为不同高度纬向风、经向风的泰勒图, 纬向风 144、168 h 700 hPa 预报场与 0 场的相关系数低于 0.6 为 0.598, 500 hPa、850 hPa 经向风相关系数也略低于 0.6。值得注意的是, 虽然随着预报时效的增加, 相关系数也随之下落, 但与高度场不同, 700 hPa 的纬向风相关系数表现最差, 标准差 200 hPa 表现最差, 而不是 850 hPa; 经向风 700 hPa 相关系数、均方根误差表现最好, 但 24~96 h 预报场对 0 场的中心位置的刻画能力最弱。模式对 850 hPa 温度场 (图 7 d) 与 500 hPa 高度场 (图 7 a) 的预报比较理想, 对 700 hPa 相对湿度的预报优于 850 hPa, 120~168 h 相对湿度预报与 0 场的相关系数在 0.5 左右。在实际预报业务中需要结合时间相关系数的空间分布综合考虑。

4 结论和讨论

现代气象业务中,数值预报具有重要的地位,随着模式的发展,对模式进行客观有效的检验,有利于更加准确地应用模式产品,服务于预报业务。本文利用 ECMWF 模式逐日分析场和 7 d 预报序列,使用 ACC、均方根、泰勒图等气候学方法客观的检验了 ECMWF 模式对东北半球的预报能力,主要结论如下:

(1) 总体来说,模式具有较高的预报性能,各要素场 72 h 以内预报都有较好的表现,时空 ACC 相关系数较大,大部分要素场与 0 场的相对标准差为 1 左右,但不同要素场,存在一定差异,无论是 ACC 的空间分布还是时间变率,500 hPa 高度场、850 hPa 温度场预报效果最好,24~168 h 预报场与 0 场的 ACC 相关系数空间分布均达 0.95 以上。蔡芎宁(2010)等利用 24~96 h ECMWF 500 hPa 位势高度预报场计算西风指数,得出 500 hPa 位势高度预报场与实况最为接近,本文结论与其一致,但就 ACC 的时间变化来说,500 hPa 位势高度预报场仅在 72 h 以内预报最好,96~168 h 850 hPa 温度场预报与实况更为一致。144~168 h 850 hPa 相对湿度、700 hPa 纬向风,850 hPa、500 hPa 经向风预报效果较差,相关系数 ACC 的空间分布为 0.6 及以下;随着预报时效的增加,模式对不同要素变率的预报能力普遍减弱,差值普遍增大。

(2) 温度场差值图显示,中高纬大陆上的大部分区域,预报较 0 场偏高,赤道附近的低纬度地区,预报较 0 场偏低。巴尔喀什湖附近及以北的地区存在一小片负值区,表明就平均来说,该地区冷空气预报较实际偏强,该处的冷空气常常影响夏季我国中高纬度的降水及冬季寒潮强度,冷空气预报偏强说明模式对受该地区冷空气影响的寒潮预报偏强或降水预报偏大。700 hPa 湿度差值场上,赤道低纬度地区,预报场较实际偏强,大陆高纬度地区预报较实际偏弱。这表明,对深厚的天气系统来说,高纬度地区模式预报降水可能较实际偏小,而低纬度地区降水预报可能较实际偏强。

(3) 预报场与 0 场的空间相关系数显示,温度场 24~120 h 赤道低纬度地区相关系数明显低于中高纬度地区,这种低纬度空间相关系数低的现象在 500 hPa 高度场、海平面气压场及湿度场、风场中

也有不同程度的体现。

(4) 48 h 500 hPa 高度场差值图中里海附近为差值相对低值区,俄罗斯以北为差值高值区,俄罗斯南部贝加尔湖以北为差值相对低值区,贝加尔湖以南的我国境内为差值高值区,日本海附近为差值低值区。随着预报时效的增加,这种高低值中心表现地更加明显,168 h 预报场上,表现出一个清楚的波列,这个波列与 OKJ 波列的路径基本一致。

(5) 模式对纬向风的预报能力强于经向风,30°N 附近存在纬向风与 0 场相关系数高值带,可能的原因是模式对 30°N 附近稳定的东北信风有较好的预报能力,该区域相对湿度预报亦有较好的表现,这可能与风场的成功预报有关。

(6) 总体来说,模式对高层的预报能力优于低层,但模式对 700 hPa 风场的预报能力与其它高度层有较大的差异,纬向风 ACC 时空相关系数最弱,经向风 ACC 时空相关系数最好,且经向风的标准差表现不稳定。

模式预报能力的气候学方法检验是清楚把握模式预报效果的一个重要手段,文章中使用时限约为 2 a 的 ECMWF 模式预报场与 0 场资料检验模式的预报能力,存在一定的局限性,但模式在不断的不断发展中,资料时间过长,对客观把握不同阶段模式预报能力存在偏差;其次,认为 500 hPa 高度场差值图上的高低值中心及风场上气旋、反气旋中心是 OKJ 波列,仅仅从直观上获得,没有对模式机理进行深入的分析,这有待于进一步研究。

致谢 感谢审稿人的宝贵意见和建议。中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室王亚非研究员在 OKJ 波列问题上给予了帮助,南京信息工程大学大气科学学院邱辉博士、中国科学院研究生院王子谦博士对本文做了很多有益的工作,谨此致谢!

参考文献 (References)

- 鲍媛媛. 2006. 2006年6~8月T213与ECMWF模式中期预报性能检验 [J]. 气象, 32 (11): 98-104. Bao Yuanyuan. 2006. Verification of the medium-range forecast efficiency of T213 and ECMWF model from June to August 2006 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32 (11): 98-104.
- Blackmon M L. 1976. A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere [J]. J. Atmos. Sci., 33: 1607-1623.
- Blackmon M L, Wallace J M, Lau N C, et al. 1977. An observational study

- of the Northern Hemisphere wintertime circulation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 34: 1040–1053.
- Blackmon M L, Madden R A, Wallace J M, et al. 1979. Geographical variations in the vertical structure of geopotential height fluctuations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 36: 2450–2466.
- 蔡芩宁. 2010. 2009 年 9~11 月 T639、ECMWF 及日本模式中期预报性能检验 [J]. *气象*, 36 (2): 130–135. Cai Xiangning. 2010. Performance verification of the medium-range forecasting for T639, ECMWF and Japan models from September to November 2009 [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 36 (2): 130–135.
- 陈海山, 孙照渤. 2005. 陆面模式 CLSM 的设计及性能检验 II. 模式检验 [J]. *大气科学*, 29 (2): 272–282. Chen Haishan, Sun Zhaobo. 2005. Design of a comprehensive land surface model and its validation. Part II. Model validation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 29 (2): 272–282.
- 陈红, 郎咸梅, 周广庆, 等. 2008. 2008 年 1 月中国气候异常的动力学预测及效果检验 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 531–538. Chen Hong, Lang Xianmei, Zhou Guangqing, et al. 2008. Prediction of climate anomalies over China in January 2008 with IAP climate models and its verification [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13 (4): 531–538.
- 管成功, 王克敏, 陈晓红. 2006. 2002~2005 年 T213 数值降水预报产品分析检验 [J]. *气象*, 32 (8): 70–76. Guan Chenggong, Wang Kemin, Chen Xiaohong. 2006. Analyses and verifications of T213 rainfall forecast from 2002 to 2005 [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 32 (8): 70–76.
- Haltiner G J. 1971. *Numerical Weather Prediction* [M]. New York: John Wiley & Sons.
- Joliffe I T, Stephenson D B. 2003. *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science* [M]. New York: John Wiley and Son, 240.
- 李旭, 金向泽, 陈克明. 1998. 一个热带太平洋上层海洋环流模式及其检验研究 [J]. *气候与环境研究*, 3 (1): 38–56. Li Xu, Jin Xiangze, Chen Keming. 1998. An oceanic general circulation model of the upper tropical Pacific and its validation studies [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 3 (1): 38–56.
- Pinson P, Hagedorn R. 2011. Verification of the ECMWF ensemble forecasts of wind speed against observations [J]. *Meteorol. Appl.*, 00: 1–20, doi: 10.1002/ma.000.
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D7): 7183–7192.
- Wang Y. 1992. Impact of blocking anticyclones in Eurasia in the rain season (Meiyu/Baiyu season) [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70: 925–951.
- 王雨, 李莉. 2010. Grapse_Meso V3.0 模式预报效果检验 [J]. *应用气象学报*, 21 (5): 524–534. Wang Yu, Li Li. 2010. Verification of GRAPSE_MesoV3_0 model forecast result [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 21 (5): 524–534.
- Wang Y, Qian H, Song J J, et al. 2008. Verification of the T213 global spectral model of China National Meteorology Center over the East-Asia area [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D10110): 1–7.
- 王亚非. 2010. 有关 OKJ 波列研究及展望 [J]. *气象学报*, 68 (4): 584–589. Wang Yafei. 2010. The study of OKJ wave pattern and its outlook: A review [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 68 (4): 584–589.
- 卫捷, 张庆云, 陶诗言. 2005. 2004 年夏季短期气候集成预测及检验 [J]. *气候与环境研究*, 10 (1): 19–31. Wei Jie, Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 2005. The ensemble seasonal climate prediction for 2004 summer and its verification [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (1): 19–31.
- 张宏芳, 陈海山. 2011a. 21 个气候模式对东亚夏季环流模拟的评估 I: 气候态 [J]. *气象科学*, 31 (2): 119–128. Zhang Hongfang, Cheng Haishan. 2011a. Evaluation of summer circulation simulation over East Asia by 21 climate models. I: Climatology [J]. *Journal of the Meteorological Sciences* (in Chinese), 31 (2): 119–128.
- 张宏芳, 陈海山. 2011b. 21 个气候模式对东亚夏季环流模拟的评估 II: 年际变化 [J]. *气象科学*, 31 (3): 247–257. Zhang Hongfang, Cheng Haishan. 2011b. Evaluation of summer circulation simulation over East Asia by 21 climate models. II: Interannual variability [J]. *Journal of the Meteorological Sciences* (in Chinese), 31 (3): 247–257.
- 张莉, 丁一汇, 孙颖. 2008. 全球海气耦合模式对东亚季风降水模拟的检验 [J]. *大气科学*, 32 (2): 261–276. Zhang Li, Ding Yihui, Sun Ying. 2008. Evaluation of precipitation simulation in East Asian monsoon areas by coupled ocean-atmosphere general circulation models [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (2): 261–276.
- 郑飞, 朱江, 王慧. 2007. ENSO 集合预报系统的检验评价 [J]. *气候与环境研究*, 12 (5): 587–594. Zhang Fei, Zhu Jiang, Wang Hui. 2007. The verifications for ENSO ensemble prediction system [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12 (5): 587–594.