

吴晶,李照荣,颜鹏程,等,2020.西北四省(区)GRAPES 模式降水预报的定量评估[J].气象,46(3):346-356. Wu J, LI Z R, Yan P C, et al, 2020. Quantitative assessment of GRAPES rainfall forecast for four provinces of Northwest China[J]. Meteor Mon, 46(3):346-356(in Chinese).

西北四省(区)GRAPES 模式降水预报的定量评估*

吴晶¹ 李照荣¹ 颜鹏程² 杨艳芬³ 白磊⁴ 杨建才¹ 彭筱¹

1 兰州中心气象台,兰州 730020

2 中国气象局兰州干旱气象研究所,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,
中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室,兰州 730020

3 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌 712100

4 武汉理工大学,智能交通系统研究中心,武汉 430070

提 要: 基于中国西北四省(区)2016—2017 年的站点观测降水数据和 GRAPES 区域数值模式 24 h 和 48 h 预报结果,采用平均误差、均方根误差、相关系数、分等级 TS 评分等指标,对 GRAPES 区域数值模式在西北四省(区)降水预报进行定量评估。结果表明:时间上,模式对西北四省的晴雨预报准确率能达到 0.7 以上,逐日空间相关系数为 0.2~0.4。夏季降水的偏差最大,24 h 和 48 h 预报平均误差分别为 4.6 mm·d⁻¹,均方根误差分别为 6.8 mm·d⁻¹。不同等级降水的 24 h 和 48 h 预报 TS 评分显示,各个月份小雨 TS 评分为 0.2~0.5,中雨为 0.1~0.2,大雨以上不到 0.1。空间上,24 h 和 48 h 预报晴雨准确率在大部分地区达到 0.6 以上,相关系数在甘肃东部、陕西中部和南部超过 0.6。24 h 预报平均误差在青海、甘肃、陕西三省南部最大(达到 2~4 mm·d⁻¹),48 h 预报的平均误差比相同区域的 24 h 预报高出 1~2 mm·d⁻¹,在陕西南部平均误差最大(达到 5~8 mm·d⁻¹)。各个量级的 24 h 预报 TS 评分明显好于 48 h,24 h 预报对大雨、暴雨有所预报,48 h 预报对小雨以上量级降水预报较差。

关键词: 西北四省(区),GRAPES 模式,降水,定量检验

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.03.006

Quantitative Assessment of GRAPES Rainfall Forecast for Four Provinces of Northwest China

WU Jing¹ LI Zhaorong¹ YAN Pengcheng² YANG Yanfen³
BAI Lei⁴ YANG Jiancai¹ PENG Xiao¹

1 Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020

2 Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province/Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of China Meteorological Administration, Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020

3 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Shaanxi, Yangling 712100

4 Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070

Abstract: Combining the gauged precipitation and the predicted precipitation in 24 h and 48 h of regional numerical model named GRAPES during 2016 to 2017, GRAPES was quantitatively evaluated in the four provinces (regions) of Northwest China, using the indices including mean error, root mean square error, correlation coefficient and TS score. The results showed that the forecast accuracy of rain probability was

* 兰州中心气象台创新基金项目(LCMO-201805)和国家自然科学基金项目(41501301)共同资助

2018 年 11 月 9 日收稿; 2019 年 9 月 18 日收修定稿

作者简介:吴晶,主要从事数值预报研究. Email:wujing9362@163.com

通讯作者:李照荣,主要从事天气预报业务和气象服务研究. Email:bylzh@126.com

higher than 0.7, daily spatial correlation coefficient was 0.2–0.4. The highest bias appeared in summer, the mean errors of 24 h and 48 h forecast were $4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ and $6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, the root mean square error were $6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ and $8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively. The TS of heavy rain and above was less than 0.1, TSs of light rain and moderate rain were 0.2–0.5 and 0.1–0.2, respectively. Spatially, the 24 h and 48 h forecast accuracies of rain probability were higher than 0.6 in most regions, the correlation coefficients in eastern Gansu, middle and southern Shaanxi were higher than 0.6. The highest mean error of 24 h forecast appeared in the southern part of Qinghai, Gansu and Shaanxi, which reached to $2\text{--}4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$. The highest mean error of 48 h forecast reached to $5\text{--}8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ and appeared in the southern Shaanxi. The mean error of 48 h forecast was $1\text{--}2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ higher than 24 h forecast in other regions, The TS score of 24 h forecast for each precipitation level was obviously better than that of 48 h, 24 h forecast could predict heavy rain and rainstorm, while 48 h forecast showed poor ability for moderate rain and above.

Key words: four provinces of Northwest China, GRAPES model, precipitation, quantitative evaluation

引 言

由于降水在时空上的非线性特征,对降水的定量、准确预报是天气预报中面临的最困难的问题,也是数值模式检验评估的重要指标(曹勇等,2016;毕宝贵等,2016)。定性、定量评估数值模式的预报性能、误差时空分布特点,对模式存在的问题和不足进行检验总结,有助于研发人员和预报员了解数值模式的模拟性能,并且进一步推进数值天气预报准确率的提高(张建海和诸晓明,2006;Ikeda et al,2013;Diaconescu et al,2015)。

GRAPES(Global Regional Assimilation and Prediction System)是中国自主研发的数值天气预报系统,其区域中尺度模式 GRAPES_Meso 于 2006 年正式投入业务化运行(薛纪善,2006;陈德辉和沈学顺,2006)。十多年来,许多科研工作者对 GRAPES_Meso 的整体框架算法(伍湘君等,2005;2010;徐国强等,2010;蒋沁谷和金之雁,2014)、数据同化(庄照荣等,2011a;2011b;徐枝芳等,2013;郝民等,2014;马昊等,2016;谭晓伟等,2016;王金成等,2017;朱立娟等,2017;万晓敏等,2017;2019;王莉莉和龚建东,2018;田伟红,2018;刘永柱等,2019)、初始场(朱红芳等,2007;刘艳和薛纪善,2019)、物理方案(张梦等,2014;万子为等,2015;郑晓辉等,2016;聂浩浩等,2016;黄伟等,2018;李喆等,2019)等多方面做了大量的研究工作,使 GRAPES_Meso 模式得到很大的改进和发展,业务版本几经升级,预报效果

比之前的版本均有较大的增强(王雨和李莉,2010;黄丽萍等,2017)。GRAPES 模式从 2013 年开始在西北地区准业务运行,2015 年升级至 4.0 版本,并稳定运行。

针对 GRAPES 模式降水的定量统计检验,目前已经开展了大量研究(王雨和闫之辉,2007;王雨和李莉,2010;王雨等,2013;毛冬艳等,2014;熊秋芬,2011),通过对 GRAPES 各代模式在不同的时间尺度和空间尺度上的预报效果进行详细的检验评估。结果表明,模式对降水具有一定的预报能力,但是对于极端强降水预报能力还较差,而且对于不同区域的模拟能力差异也较大。GRAPES 模式在我国东部的预报效果要好于西部、平原地区好于山区,模式对复杂地形影响的降水预报能力偏弱,对复杂地形下各个气象要素预报还存在一定的不足(陈超君等,2012;熊秋芬,2011)。GRAPES 模式对沙漠地区的降水预报与实况相比存在明显的偏差,主要表现为降水空报率较高,降水中心也存在一定的偏差(徐双柱等,2007;孙婵和徐国强,2017)。提高模式空间分辨率可以在一定程度上改善对降水中心的预报,但对降水落区的预报改进较为有限(于翡等,2018),模式对强对流过程的水汽、稳定性和垂直风切变等物理条件有较好的体现,高时空分辨率的产品能够在一定程度上较好地描述强降水以及雷暴大风和冰雹等强天气过程的发生发展过程,但对极端强降水或受地形影响的强降水等预报能力有限(毛冬艳等,2014)。千米尺度下的 GRAPES 模式对降水落区具有一定的预报能力,但对降水强度的预报还存在显

著误差(许晨璐等,2017;王静等,2017)。因此,为了进一步了解 GRAPES 模式的预报性能和不足,很有必要对 GRAPES 模式在区域上的降水预报进行详细的定量评估。

西北四省(区)位于青藏高原东部、北部,其中青海省处于青藏高原北部,甘肃、宁夏、陕西三省(区)位于高原北侧和东侧,该区域地形落差大、地貌和下垫面环境复杂多样,极大地增加了数值模式对降水天气预报和降水数值模拟的困难(Colle,2004;Roe,2005)。其中西北地区地形分布如图 1 所示,数据来源于 <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/gltiles.html>,分辨率为 1 km。本文结合 2016—2017 年西北四省(区)253 个站点逐日降水观测数据和 GRAPES 区域数值模式 24 h 和 48 h 预报结果,采用平均误差、均方根误差、相关系数、分等级 TS 评分等指标,对 GRAPES 区域数值模式对西北四省(区)降水预报进行定量评估。

1 数据和方法

1.1 数据

降水观测数据采用 2016 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日西北四省(区)253 个基本站观测的逐日降水数据,数据进行严格的质量控制,剔除缺测、缺失、错误的样本。模式预报数据为 2 年 24 h 和 48 h 预报的降水结果,模式运行基本参数见表 1。

1.2 方法

对模式预报结果与站点观测进行比较分析时,采取 WMO 关于业务模式 QPF 检验技术规则中推

荐的邻近点匹配的方法(许晨璐等,2017),取距离观测站点最近的模式格点降水值作为该站点的模式预报值,然后与观测做比较计算。这种方法可避免插值过程对降水这类非连续变量带来的较大误差。将模式逐日预报结果匹配至站点后,计算平均误差、均方根误差、相关系数、分等级 TS 评分等指标,对 GRAPES 区域数值模式在西北四省(区)的降水预报效果进行定量分析。

2 实况降水分析

对 2016—2017 年西北四省(区)的逐日实况观测降水进行分析可见,在时间上(图 2a),西北四省(区)的降水分布呈现明显的雨季和旱季。降水主要集中在 4—10 月,能达到 $2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上,主要的大雨以上量级降水过程也集中在 4—10 月。11 月至次年 3 月降水较少,不到 $1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在空间上(图 2b),西北四省(区)的降水空间分布呈现由南向北、从东向西的递减趋势。在陕西南部地区年降水量能达到 $2 \sim 3.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,陕西北部和中部分、甘肃东部和南部、宁夏南部、青海东部和南部地区年降水量为 $1 \sim 2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,甘肃西部和青海西部地区年降水量不到 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。从各个月的降水空间分布来看(图 3),在 11 月至次年 3 月,西北四省(区)的降水均在 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以下,降水主要集中在 4—10 月。其中,6 月、7 月、9 月和 10 月在陕西南部地区降水量最大,达 $6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上,7 月和 8 月在陕西北部地区降水量最大,超过 $6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$;甘肃东部和南部的降水主要集中在 6—9 月,其中 8 月的降水量明显超过其他月份,大量站点超过 $4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$;青海东部的较大降水量主要集中在 7 月和 8 月。

表 1 GRAPES 模式基本参数

Table 1 Brief introduction to GRAPES model

参数名称	参数选择	参数名称	参数选择
模式分辨率	$0.1^\circ \times 0.1^\circ$	长波辐射方案	rtrm 方案
模拟范围	$26^\circ \sim 46^\circ \text{N}, 85^\circ \sim 113^\circ \text{E}$	短波辐射方案	Dudhia 方案
预报时长	72 h	边界层方案	Monin-Obukhov 方案
模拟层数	50 层	积云参数方案	Betts-Miller-Janjic 方案
微物理过程方案	WSM6 类方案	陆面过程方案	Noah 陆面过程方案

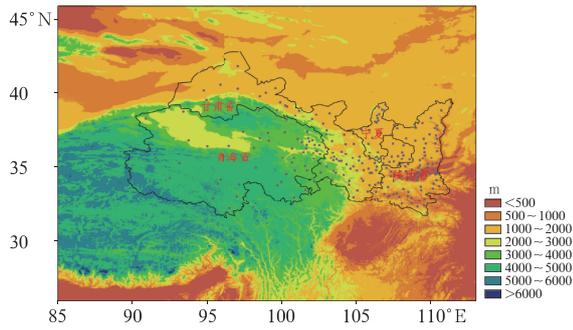


图 1 GRAPES 模式模拟范围地形图
Fig. 1 Topographical map of study area

3 时间上预报结果分析

GRAPES 模式的逐日晴雨预报准确率结果 (图 4a), 24 h 预报晴雨准确率略好于 48 h 预报, 逐日晴雨预报准确率均在 0.6 以上, 有明显的月份差异, 其中 12 月至次年 2 月的晴雨预报准确率最高, 平均能达到 0.8 以上, 6—8 月的晴雨预报准确率最低, 平均在 0.7 左右。逐日空间上的相关系数采用每天的 253 个站点观测值和匹配的模式预报值组成

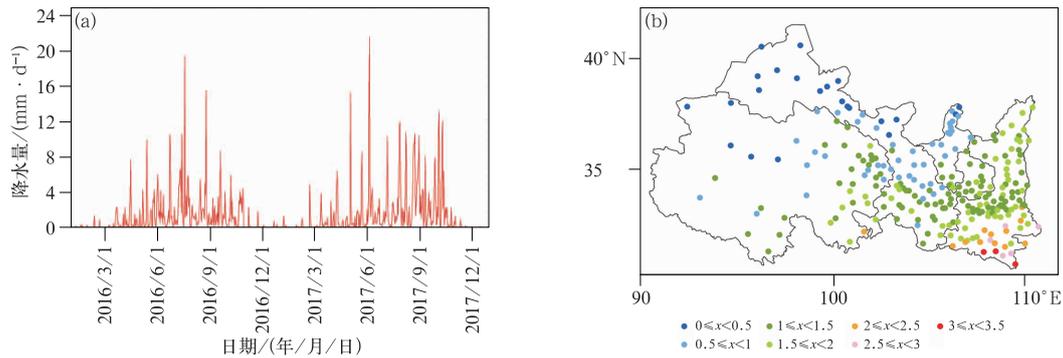


图 2 2016—2017 年西北四省(区)实况降水时间(a)和空间(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) (b)分布
Fig. 2 Temporal (a) and spatial (b, unit: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) distributions of gauge observed precipitation in four provinces of Northwest China during 2016—2017 ()

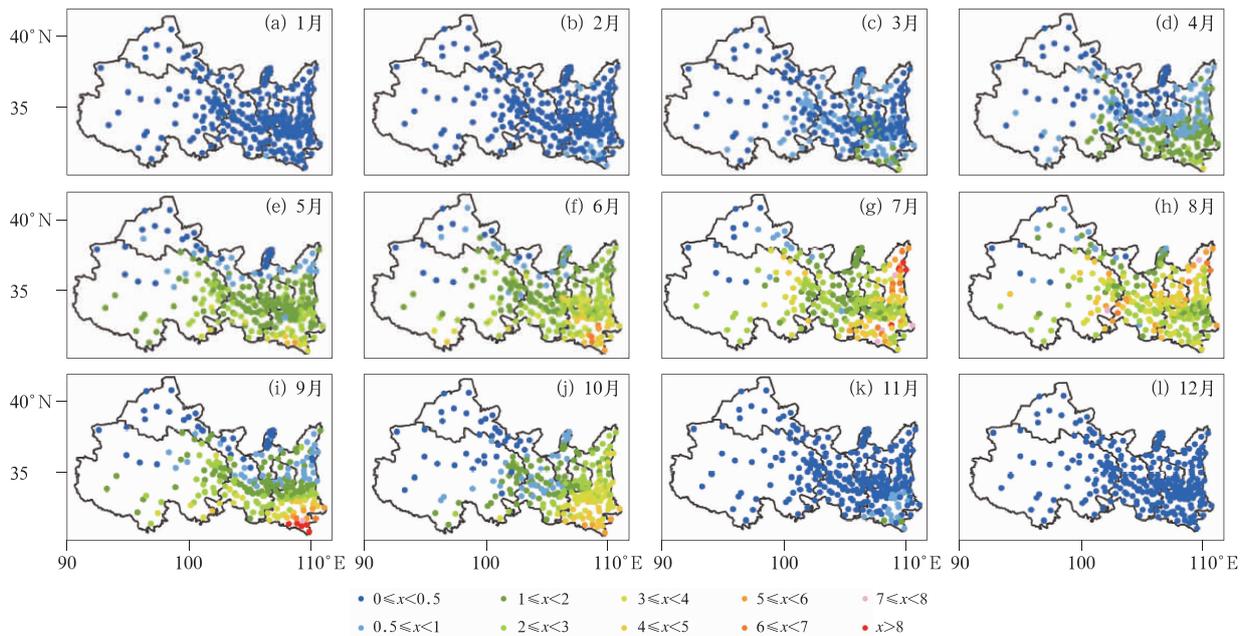


图 3 2016—2017 年西北四省(区)各个月份实况降水空间分布(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)
Fig. 3 Spatial distribution of monthly gauge observed precipitation in four provinces of Northwest China during 2016—2017 (unit: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

两个数据序列,计算其相关系数。逐日空间相关系数很不稳定,变率很大,平均处于 0.2~0.4,24 h 的相关系数略高于 48 h 的(图 4b)。逐日平均误差 24 h 和 48 h 预报相比站点观测均处于偏高情况(图 4c),12 月至次年 2 月平均误差最小,在 $1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以下;9—11 月偏高最严重,24 和 48 h 预报偏差分别达到 4 和 $6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$;3—8 月 24 和 48 h 预报偏差分别达到 2 和 $4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。逐日均方根误差 6—10 月最大,24 和 48 h 预报均方根分别达到 $6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上和 $8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上,3—5 月 24 和 48 h 预报均方根分别达到 $4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上和 $6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上,12 月至次年 2 月 24 和 48 h 预报均方根达到 $2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以内(图 4d)。

GRAPES 模式对西北四省(区)2016—2017 年各个月份的分等级 TS 评分结果显示(图 5),对小雨 TS 评分能达到 0.4 左右,但是对中雨以上量级降水 TS 评分不到 0.2。在相同月份,24 h 预报小雨 TS 评分略好于 48 h 预报,对中雨以上量级降水 24 h 预报的各个月、年平均 TS 评分均比 48 h 预报明显

要高。

4 空间上预报结果分析

从预报晴雨准确率的空间分布上看(图 6):其 24 h 要略好于 48 h,24 h 预报在甘肃南部和陕西南部局部地区为 0.5~0.7,其余地区准确率均在 0.7 以上;48 h 预报在甘肃南部和陕西中部和南部大部分地区为 0.5~0.7,其余地区准确率均在 0.7 以上。24 h 预报和站点观测的相关系数在陕西甘肃东部、宁夏南部和陕西中部和南部的部分站点最好,能超过 0.6,其余地区在 0.3~0.6;48 h 预报和站点观测的相关系数在空间上明显低于 24 h 预报,在陕西甘肃东部、宁夏南部和陕西中部和南部的少数站点最好,能超过 0.6,其余地区为 0.1~0.6。

整体上 GRAPES 对西北四省(区)的 24 和 48 h 降水预报偏高(图 7),24 h 预报在甘肃西部偏低 $1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,在青海北部、甘肃中部、宁夏和陕西北部地区偏高 $1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右,在青海南部、甘肃东

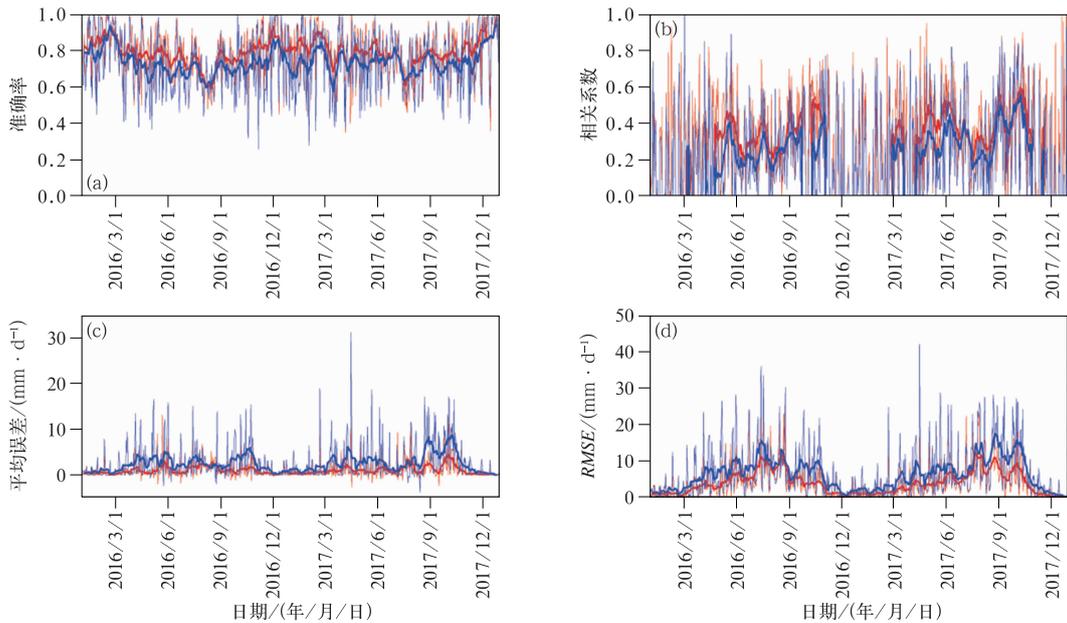


图 4 2016—2017 年西北四省(区)24 h 和 48 h 预报逐日晴雨预报准确率(a)、空间相关系数(b)、平均误差(c)和均方根误差(d)
(红色 24 h 预报,蓝色 48 h 预报,粗线:15 d 滑动平均)

Fig. 4 The 24 h and 48 h forecast accuracy of rain probability (a), spatial correlation coefficient (b), mean error (c), root mean square error (d) of Northwest China during 2016—2017
(red line: 24 h forecast, blue line: 48 h forecast, bold line: moving average of 15 d)

部、陕西中部和南部偏高 $1\sim 2\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 甘肃南部和陕西南部局部地区偏高 $2\sim 3\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。48 h 预报对西北四省(区)偏差为 $-1\sim 1\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 的区域远小于 24 h 预报, 在青海南部、甘肃中部、宁夏大

部、陕西北部偏高 $1\sim 2\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 在甘肃南部和陕西北部大部分地区偏高 $2\sim 3\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 对陕西中部和南部预报偏高 $4\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 以上。GRAPES 对西北四省(区)的 24h 降水预报的均方根误差在青

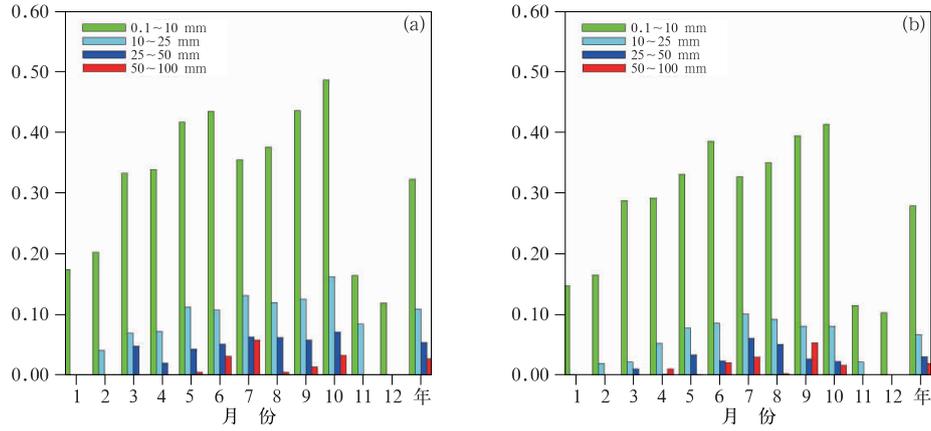


图 5 2016—2017 年 GRAPES 模式西北四省(区)24 h(a)和 48 h(b)预报的 TS 评分结果

Fig. 5 The TS score of 24 h (a) and 48 h (b) forecasts by GRAPES model of Northwest China during 2016—2017

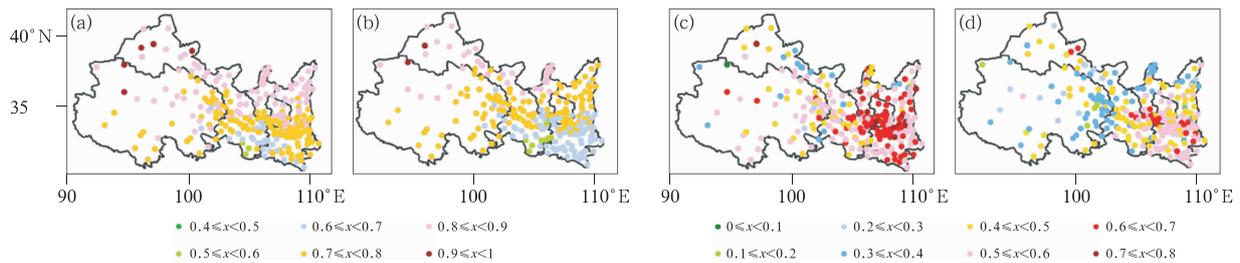


图 6 2016—2017 年 24 h(a,c)和 48 h(b,d)预报的晴雨准确率(a,b)、相关系数(c,d)空间分布

Fig. 6 Spatial pattern of rain probability (a, b), correlation coefficient (c, d) of 24 h (a, c) and 48 h (b, d) forecasts of Northwest China during 2016—2017

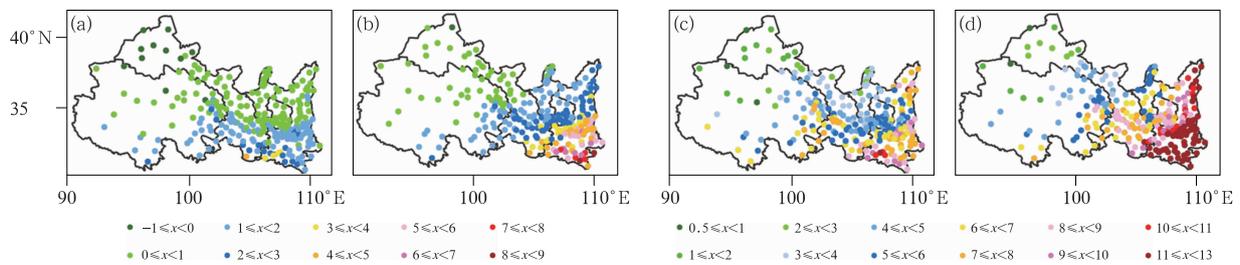


图 7 同图 6, 但为平均误差(a,b)、均方根误差(c,d)(单位: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for mean error (a, b), root mean square error (c, d) (unit: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)

海北部、甘肃西部和宁夏北部较小(图7c),在 $3\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 以下;在青海中部、甘肃中部和东部、宁夏南部和陕西中部地区均方根误差为 $3\sim 6\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,青海南部、甘肃南部、陕西大部分地区均方根误差为 $6\sim 10\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,陕西北部 and 南部个别站点均方根误差在 $11\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 以上。48 h预报对青海、甘肃、宁夏地区的预报均方根误差比24 h预报均偏高 $2\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 左右,对陕西48 h预报均方根误差整体较大,大部分地区均方根误差超过 $11\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (图7d)。

从TS评分的空间分布上看(图8),各个量级的24 h预报的TS评分均大于48 h预报,整体来看,对小雨、中雨、大雨、暴雨的TS评分依次递减。24 h预报的小雨TS评分最高,西北四省(区)几乎均在0.3以上,大部分能到0.5以上。而48 h预报的小雨TS评分大部分能在0.3以上,只有青海东部能到0.5以上。青海东部、甘肃河东地区和陕西大部分地区的24 h预报中雨TS评分均能达到0.3左右,48 h中雨预报TS评分西北四省均在0.3以下。青海东部、甘肃陇东地区、宁夏南部和陕西大部分地区24 h大雨预报TS评分能在 $0.2\sim 0.3$,局部地区能达到 $0.3\sim 0.4$,而48 h预报大雨TS评分西北四省(区)几乎均在0.2以下。24 h预报暴雨TS评分在甘肃东部地区、陕西中部地区能达到0.2以

上,个别站点能达到 $0.4\sim 0.5$,而48 h预报暴雨TS评分在西北四省(区)均在0.2以下。

模式对各个月的24 h降水预报平均误差的空间分布的不确定性较大(图9),大部分地区处于预报偏高状态,但是3—9月,在甘肃西部和东部、青海中部和北部、陕西中部和北部地区出现部分站点预报偏低。11月至次年3月,整个西北四省(区)的各个站点预报偏差在 $3\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 以内,4—10月,在青海东部、甘肃东部和南部、陕西大部分地区预报偏高超过 $3\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,其中7—9月在青海东部、甘肃南部和陕西中部和南部部分地区预报偏高最严重,超过 $6\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

模式对各个月的48 h预报平均误差的空间分布格局与24 h预报一致(图10),但是数值比24 h预报大,相同区域的偏差要比24 h预报高出 $2\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 以上。除了甘肃西部地区 and 青海部分地区,西北四省地区处于预报偏高状态,11月至次年3月,整个西北四省(区)的各个站点偏差在 $3\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 以内,4—10月,在青海东部、甘肃东南部、陕西大部分地区预报偏高超过 $3\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,其中4—10月在青海东部、甘肃南部和陕西中部和南部部分地区预报偏高超过 $6\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,5月和10月陕西地区预报偏高最严重,大部分地区偏高 $6\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 以上。

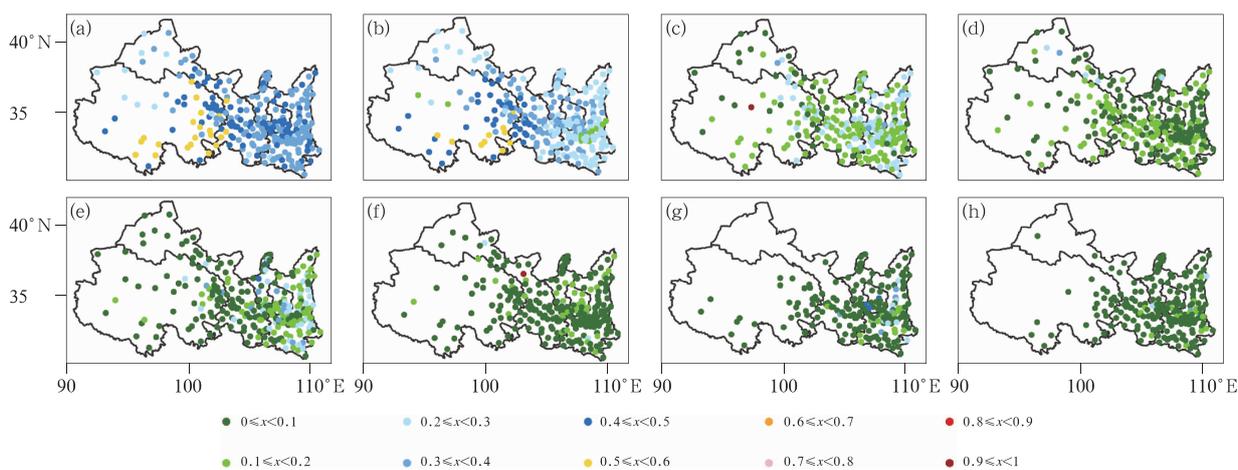


图8 2016—2017年西北四省(区)24 h(a,c,e,g)和48 h(b,d,f,h)预报小雨(a,b)、中雨(c,d)、大雨(e,f)、暴雨(g,h)TS评分空间分布

Fig. 8 Spatial pattern of TS score for light rain (a, b), moderate rain (c, d), heavy rain (e, f), rainstorm (g, h) for 24 h (a, c, e, g) and 48 h (b, d, f, h) forecasts of Northwest China during 2016—2017

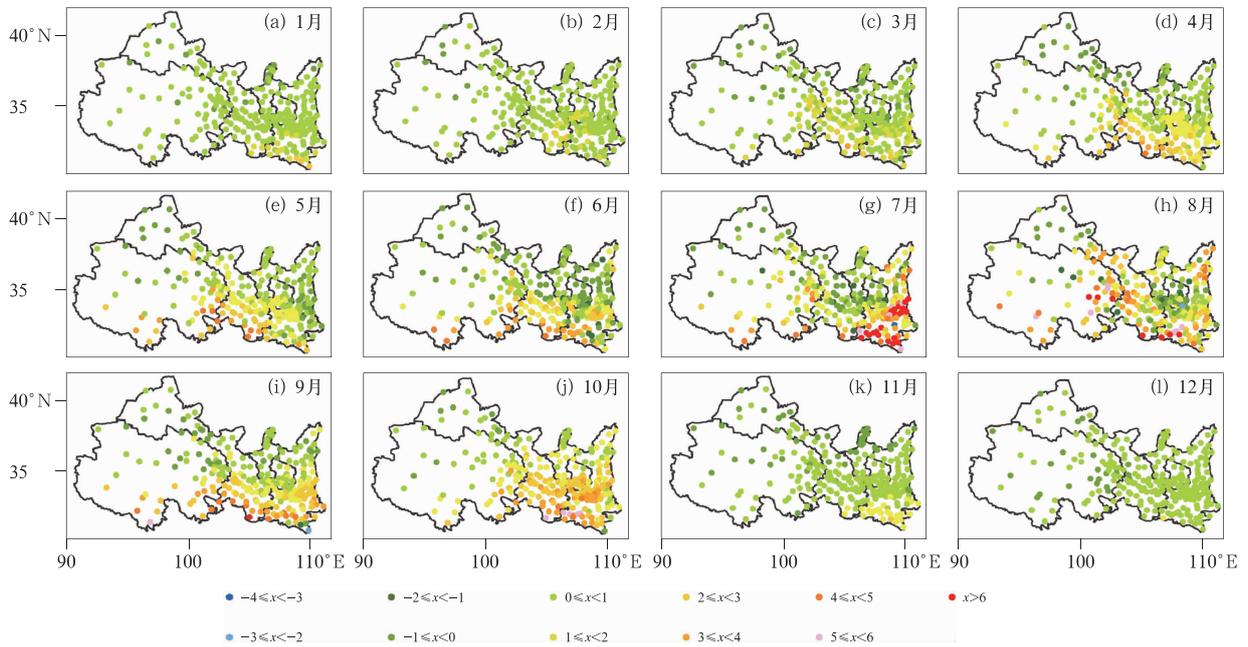


图 9 2016—2017 年西北四省(区)24 h 预报各月平均误差空间分布(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

Fig. 9 Spatial pattern of monthly mean errors of 24 h forecast (unit: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) of Northwest China during 2016—2017

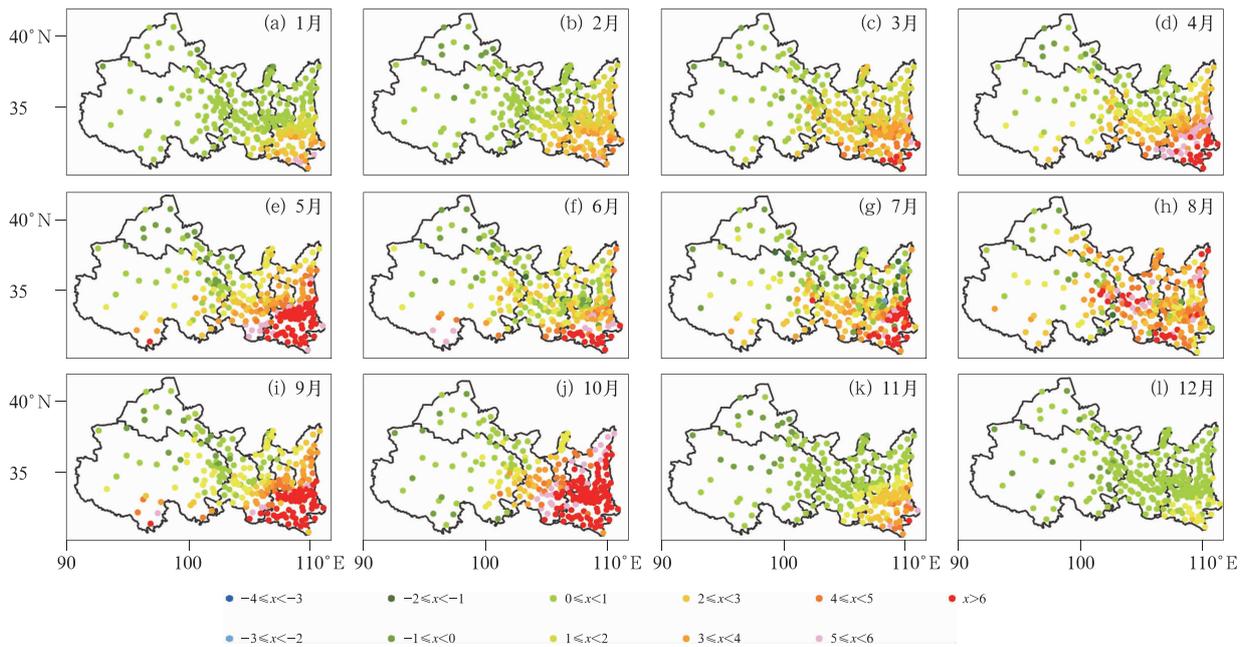


图 10 同图 9, 但为 48 h 预报

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for 48 h forecast

5 结论与讨论

通过对 GRAPES 区域模式对西北四省(区)两

年的降水在时空上的预报结果进行定量检验,可以得到以下结论。

(1)时间上,模式 24 h 预报结果整体好于 48 h 预报结果,对西北四省(区)的晴雨预报准确率较好,

但是对逐日相关空间系数变化较大,夏季降水的偏差最大,对中雨以上量级降水的 TS 评分较低。

(2)空间上,GRAPES 区域模式 24 h 和 48 h 预报结果空间分布规律一致,但是相同区域内模式 24 h 预报结果比 48 h 预报结果要好。晴雨准确率呈现随纬度增加递增的规律,平均误差、均方根误差呈现随纬度增加递减规律,而相关系数在陕西地区和甘肃东南部较高。模式对各个月的 24 和 48 h 预报偏差空间分布格局一致,但是对相同区域的 48 h 预报偏差要比 24 h 预报偏差高出 $2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上。

(3)从 TS 评分的空间分布看,GRAPES 区域模式 24 h 预报结果对陕西地区和甘肃东部地区站点的中雨以上量级降水均有所预报,TS 评分可以达到 0.3~0.5,而 48 h 预报对中雨以上量级降水较差,TS 评分不到 0.2。

GRAPES 模式对西北四省(区)降水预报效果不是很好的原因可能处在复杂地形地区,数值模式的陆面过程、近地面参数化过程和云物理参数化等物理过程对局地的降水过程机理模拟能力还欠缺。同时,西北地区常规气象观测数据相对较少,当前模式同化的数据也较少,缺少对雷达、卫星等数据进行同化,也是影响数值模式对降水预报效果的重要因素。

参考文献

毕宝贵,代刊,王毅,等,2016. 定量降水预报技术进展[J]. 应用气象学报,27(5):534-549. Bi B G, Dai K, Wang Y, et al, 2016. Advances in techniques of quantitative precipitation forecast[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5):534-549(in Chinese).

曹勇,刘凑华,宗志平,等,2016. 国家级格点化定量降水预报系统[J]. 气象,42(12):1476-1482. Cao Y, Liu C H, Zong Z P, et al, 2016. State level gridded quantitative precipitation forecasting system[J]. Meteor Mon, 42(12):1476-1482(in Chinese).

陈超君,王东海,李国平,等,2012. 冬季高海拔复杂地形下 GRAPES-Meso 要素预报的检验评估[J]. 气象,38(6):657-668. Chen C J, Wang D H, Li G P, et al, 2012. A study of the GRAPES-Meso prediction verification for high altitude and complex terrain during winter time[J]. Meteor Mon, 38(6):657-668(in Chinese).

陈德辉,沈学顺,2006. 新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展[J]. 应用气象学报,17(6):773-777. Chen D H, Shen X S, 2006. Recent progress on GRAPES research and application[J]. J Appl Meteor Sci, 17(6):773-777(in Chinese).

郝民,田伟红,龚建东,2014. L 波段秒级探空资料在 GRAPES 同化系统中的应用研究[J]. 气象,40(2):158-165. Hao M, Tian W H, Gong J D, 2014. Study of L-band second-level radiosonde data applied in GRAPES assimilation system[J]. Meteor Mon, 40

(2):158-165(in Chinese).

黄伟,张旭,Bao J W,等,2018. GFS 物理过程包在 GRAPES 区域模式中的实施及改进:单柱试验[J]. 大气科学,42(6):1219-1234. Huang W, Zhang X, Bao J W, et al, 2018. Implementation and improvement of the GFS physics package in the GRAPES regional model: single column experiments[J]. Chin J Atmos Sci, 42(6):1219-1234(in Chinese).

黄丽萍,陈德辉,邓莲堂,等,2017. GRAPES_MesoV4.0 主要技术改进和预报效果检验[J]. 应用气象学报,28(1):25-37. Huang L P, Chen D H, Deng L T, et al, 2017. Main technical improvements of GRAPES_Meso V4.0 and verification[J]. J Appl Meteor Sci, 28(1):25-37(in Chinese).

蒋沁谷,金之雁,2014. GRAPES 全球模式 MPI 与 Open MP 混合并行方案[J]. 应用气象学报,25(5):581-591. Jiang Q G, Jin Z Y, 2014. The hybrid MPI and Open MP parallel scheme of GRAPES_Global model[J]. J Appl Meteor Sci, 25(5):581-591(in Chinese).

李喆,马占山,刘奇俊,等,2019. GRAPES 双参数云微物理方案的改进和云降水个例模拟研究:GRAPES_SCM 对热带对流云个例的模拟研究[J]. 气象,45(6):756-765. Li Z, Ma Z S, Liu Q J, et al, 2019. The improvement of GRAPES double moment cloud scheme and case study of cloud precipitation: modeling study of tropical convective cloud via GRAPES_SCM[J]. Meteor Mon, 45(6):756-765(in Chinese).

刘艳,薛纪善,2019. GRAPES 的新初始化方案[J]. 气象学报,77(2):165-179. Liu Y, Xue J S, 2019. The new initialization scheme of the GRAPES[J]. Acta Meteor Sin, 77(2):165-179(in Chinese).

刘永柱,龚建东,张林,等,2019. 线性化物理过程对 GRAPES 4DVAR 同化的影响[J]. 气象学报,77(2):196-209. Liu Y Z, Gong J D, Zhang L, et al, 2019. Influence of linearized physical processes on the GRAPES 4DVAR[J]. Acta Meteor Sin, 77(2):196-209(in Chinese).

马昊,梁旭东,罗义,等,2016. GRAPES_3Dvar 中雷达径向风同化改进观测算子的应用[J]. 气象,42(1):34-43. Ma H, Liang X D, Luo Y, et al, 2016. Application of advanced observation operator of doppler radar radial velocity assimilation in GRAPES_3Dvar[J]. Meteor Mon, 42(1):34-43(in Chinese).

毛冬艳,朱文剑,樊利强,等,2014. GRAPES_MESOV3.3 模式强天气预报性能的初步检验[J]. 气象,40(12):1429-1438. Mao D Y, Zhu W J, Fan L Q, et al, 2014. Preliminary synoptic verification on the performance of GRAPES_MESO V3.3 in severe weather forecasting[J]. Meteor Mon, 40(12):1429-1438(in Chinese).

聂皓浩,刘奇俊,马占山,2016. 高分辨率 GRAPES 模式中云微物理方案对强降水的模拟和诊断研究[J]. 气象,42(12):1431-1444. Nie H H, Liu Q J, Ma Z S, 2016. Simulation and analysis of heavy precipitation using cloud microphysical scheme coupled with high-resolution GRAPES model[J]. Meteor Mon, 42(12):1431-1444(in Chinese).

孙婵,徐国强,2017. GRAPES_Meso 中尺度模式在新疆沙漠地区的

- 检验与评估[J]. 气象科技, 45(4): 658-668. Sun C, Xu G Q, 2017. Verification and assessment of GRAPES_Meso model in desert regions of Xinjiang[J]. Meteor Sci Technol, 45(4): 658-668(in Chinese).
- 谭晓伟, 徐枝芳, 龚建东, 2016. 风廓线雷达资料对 GRAPES_MESO 数值预报系统影响的初步研究[J]. 气象, 42(1): 26-33. Tan X W, Xu Z F, Gong J D, 2016. Impact of wind-profiling radar data assimilation on GRAPES_MESO model system[J]. Meteor Mon, 42(1): 26-33(in Chinese).
- 田伟红, 2018. 俄罗斯探空观测减少对 GRAPES 模式的影响分析[J]. 气象, 44(2): 320-325. Tian W H, 2018. Impact of the reduced observation of Russia radiosonde on GRAPES model[J]. Meteor Mon, 44(2): 320-325(in Chinese).
- 万晓敏, 龚建东, 韩威, 等, 2019. FY-4A 云导风在 GRAPES_RAFS 中的同化应用评估[J]. 气象, 45(4): 458-468. Wan X M, Gong J D, Han W, et al, 2019. The evaluation of FY-4A AMVs in GRAPES_RAFS[J]. Meteor Mon, 45(4): 458-468(in Chinese).
- 万晓敏, 田伟红, 韩威, 等, 2017. FY-2E 云导风的算法改进及其在 GRAPES 中的同化应用研究[J]. 气象, 43(1): 1-10. Wan X M, Tian W H, Han W, et al, 2017. The evaluation of FY-2E reprocessed IR AMVs in GRAPES[J]. Meteor Mon, 43(1): 1-10(in Chinese).
- 万子为, 王建捷, 黄丽萍, 等, 2015. GRAPES-MESO 模式浅对流参数化的改进与试验[J]. 气象学报, 73(6): 1066-1079. Wan Z W, Wang J J, Huang L P, et al, 2015. An improvement of the shallow convection parameterization scheme in the GRAPES-Meso[J]. Acta Meteor Sin, 73(6): 1066-1079(in Chinese).
- 王金成, 陆慧娟, 韩威, 等, 2017. GRAPES 全球三维变分同化业务系统性能[J]. 应用气象学报, 28(1): 11-24. Wang J C, Lu H J, Han W, et al, 2017. Improvements and performances of the operational GRAPES_GFS 3DVar system[J]. J Appl Meteor Sci, 28(1): 11-24(in Chinese).
- 王静, 陈静, 钟有亮, 等, 2017. GRAPES-REPS 西南低涡预报检验评估[J]. 气象, 43(4): 385-401. Wang J, Chen J, Zhong Y L, et al, 2017. Verification and evaluation of the southwest vortex forecast by GRAPES REPS[J]. Meteor Mon, 43(4): 385-401(in Chinese).
- 王莉莉, 龚建东, 2018. 两种 OI 陆面同化方法在 GRAPES_Meso 模式中的初步应用试验[J]. 气象, 44(7): 857-868. Wang L L, Gong J D, 2018. Application of two OI land surface assimilation techniques in GRAPES_Meso[J]. Meteor Mon, 44(7): 857-868(in Chinese).
- 王雨, 公颖, 陈法敬, 等, 2013. 区域业务模式 6h 降水预报检验方案比较[J]. 应用气象学报, 24(2): 171-178. Wang Y, Gong Y, Chen F J, et al, 2013. Comparison of two verification methods for 6 h precipitation forecasts of regional models[J]. J Appl Meteor Sci, 24(2): 171-178(in Chinese).
- 王雨, 李莉, 2010. GRAPES_Meso V3.0 模式预报效果检验[J]. 应用气象学报, 21(5): 524-534. Wang Y, Li L, 2010. Verification of GRAPES_Meso V3.0 model forecast results[J]. J Appl Meteor Sci, 21(5): 524-534(in Chinese).
- 王雨, 闫之辉, 2007. 降水检验方案变化对降水检验评估效果的影响分析[J]. 气象, 33(12): 53-61. Wang Y, Yan Z H, 2007. Effect of different verification schemes on precipitation verification and assessment conclusion[J]. Meteor Mon, 33(12): 53-61(in Chinese).
- 伍湘君, 陈德辉, 宋君强, 等, 2010. GRAPES 全球格点模式的并行计算负载均衡策略[J]. 气象学报, 68(5): 591-597. Wu X J, Chen D H, Song J Q, et al, 2010. Parallelism of the GRAPES global model and its loading balance strategy[J]. Acta Meteor Sin, 68(5): 591-597(in Chinese).
- 伍湘君, 金之雁, 黄丽萍, 等, 2005. GRAPES 模式软件框架与实现[J]. 应用气象学报, 16(4): 539-546. Wu X J, Jin Z Y, Huang L P, et al, 2005. The software framework and application of GRAPES model[J]. J Appl Meteor Sci, 16(4): 539-546(in Chinese).
- 熊秋芬, 2011. GRAPES_Meso 模式的降水格点检验和站点检验分析[J]. 气象, 37(2): 185-193. Xiong Q F, 2011. Verification of GRAPES_Meso precipitation forecasts based on fine-mesh and station datasets[J]. Meteor Mon, 37(2): 185-193(in Chinese).
- 许晨璐, 王建捷, 黄丽萍, 2017. 千米尺度分辨率下 GRAPES-Meso4.0 模式定量降水预报性能评估[J]. 气象学报, 75(6): 851-876. Xu C L, Wang J J, Huang L P, 2017. Evaluation on QPF of GRAPES-Meso 4.0 model at convection-permitting resolution[J]. Acta Meteor Sin, 75(6): 851-876(in Chinese).
- 徐国强, 陈德辉, 张红亮, 等, 2010. GRAPES 模式中物理过程时间计算精度对降水预报的影响[J]. 大气科学, 34(5): 875-881. Xu G Q, Chen D H, Zhang H L, et al, 2010. The impacts of time-level computation precision of physics in the GRAPES model on precipitation prediction[J]. Chin J Atmos Sci, 34(5): 875-881(in Chinese).
- 徐双柱, 张兵, 湛伟, 2007. GRAPES 模式对长江流域天气预报的检验分析[J]. 气象, 33(11): 65-71. Xu S Z, Zhang B, Shen W, 2007. Forecasting verification of GRAPES model in the reaches of Changjiang River[J]. Meteor Mon, 33(11): 65-71(in Chinese).
- 徐枝芳, 郝民, 朱立娟, 等, 2013. GRAPES_RAFS 系统研发[J]. 气象, 39(4): 466-477. Xu Z F, Hao M, Zhu L J, et al, 2013. On the research and development of GRAPES_RAFS[J]. Meteor Mon, 39(4): 466-477(in Chinese).
- 薛纪善, 2006. 新世纪初我国数值天气预报的科技创新研究[J]. 应用气象学报, 17(5): 602-610. Xue J S, 2006. Progress of Chinese numerical prediction in the early new century[J]. J Appl Meteor Sci, 17(5): 602-610(in Chinese).
- 于翥, 黄丽萍, 邓莲堂, 2018. GRAPES-MESO 模式不同空间分辨率对中国夏季降水预报的影响分析[J]. 大气科学, 42(5): 1146-1156. Yu F, Huang L P, Deng L T, 2018. Impacts of different GRAPES-MESO model spatial resolutions on summer rainfall forecast in China[J]. Chin J Atmos Sci, 42(5): 1146-1156(in Chinese).
- 张建华, 诸晓明, 2006. 数值预报产品和客观预报方法预报能力检验[J]. 气象, 32(2): 58-63. Zhang J H, Zhu X M, 2006. Verification

- of prediction capability of NWP products and objective forecast methods[J]. Meteor Mon, 32(2):58-63(in Chinese).
- 张梦, 王宏, 黄兴友, 2014. NASA/Goddard 长波辐射方案在 GRAPES_Meso 模式中的应用研究[J]. 大气科学, 38(3):603-614. Zhang M, Wang H, Huang X Y, 2014. Application research of the NASA/Goddard longwave radiative scheme in the GRAPES_Meso model[J]. Chin J Atmos Sci, 38(3):603-614(in Chinese).
- 郑晓辉, 徐国强, 贾丽红, 等, 2016. GRAPES_Meso 区域模式积云计算方案引进及预报效果检验[J]. 大气科学, 40(5):907-919. Zheng X H, Xu G Q, Jia L H, et al, 2016. Incorporation of a cumulus fraction scheme in the GRAPES_Meso and evaluation of its performance[J]. Chin J Atmos Sci, 40(5):907-919(in Chinese).
- 朱红芳, 王东勇, 管兆勇, 等, 2007. 不同初始场条件对 GRAPES 模式数值预报的影响[J]. 气象学报, 65(4):493-502. Zhu H F, Wang D Y, Guan Z Y, et al, 2007. Effects of different initial fields on GRAPES numerical prediction[J]. Acta Meteor Sin, 65(4):493-502(in Chinese).
- 朱立娟, 龚建东, 黄丽萍, 等, 2017. GRAPES 三维云初始场形成及在短临预报中的应用[J]. 应用气象学报, 28(1):38-51. Zhu L J, Gong J D, Huang L P, et al, 2017. Three-dimensional cloud initial field created and applied to GRAPES numerical weather prediction nowcasting[J]. J Appl Meteor Sci, 28(1):38-51(in Chinese).
- nese).
- 庄照荣, 薛纪善, 李兴良, 2011a. GRAPES 集合卡尔曼滤波资料同化系统 I:系统设计及初步试验[J]. 气象学报, 69(4):620-630. Zhuang Z R, Xue J S, Li X L, 2011a. The GRAPES ensemble Kalman filter data assimilation system. Part I: design and its tentative experiment[J]. Acta Meteor Sin, 69(4):620-630(in Chinese).
- 庄照荣, 薛纪善, 李兴良, 2011b. GRAPES 集合卡尔曼滤波资料同化系统 II:区域分析及集合预报[J]. 气象学报, 69(5):860-871. Zhuang Z R, Xue J S, Li X L, 2011b. The GRAPES ensemble Kalman filter data assimilation system. Part II: regional analysis and ensemble prediction[J]. Acta Meteor Sin, 69(5):860-871(in Chinese).
- Colle B A, 2004. Sensitivity of orographic precipitation to changing ambient conditions and terrain geometries: an idealized modeling perspective[J]. J Atmos Sci, 61(5):588-606.
- Diaconescu E P, Gachon P, Laprise R, 2015. On the remapping procedure of daily precipitation statistics and indices used in regional climate model evaluation[J]. J Hydrometeor, 16(6):2301-2310.
- Ikeda K, Steiner M, Pinto J, et al, 2013. Evaluation of cold-season precipitation forecasts generated by the hourly updating high-resolution rapid refresh model[J]. Wea Forecasting, 28(4):921-939.
- Roe G H, 2005. Orographic precipitation[J]. Annu Rev Earth Planet Sci, 33:645-671.