

马永永, 娄盼星, 惠英, 等. 基于 WRF 不同边界层方案的陕西气象要素预报检验[J]. 陕西气象, 2023(1): 8-14.

文章编号: 1006-4354(2023)01-0008-07

基于 WRF 不同边界层方案的陕西气象要素预报检验

马永永^{1,2}, 娄盼星^{1,2}, 惠英^{1,2}, 肖贻青³, 孙璐^{1,2}

(1. 陕西省气象科学研究所, 西安 710016;

2. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室, 西安 710016;

3. 陕西省气象台, 西安 710014)

摘要: 利用陕西省区域数值模式系统, 通过对比 WRF 中两种大气边界层方案(MJY 和 YSU), 对陕西省 2021 年 7 月地面和高空要素预报开展了对比试验。结果表明: 地面要素预报上, MJY 方案的 24 h 累积降水量预报的空报率和漏报率都更低, TS 评分更高, 预报效果更好, 逐小时降水量预报的 BIAS 评分随预报时效的增加变化更小, 空报率、漏报率和 TS 评分也整体优于 YSU 方案, 表明 MJY 方案对降水预报的稳定性更好。两个方案的 2 m 温度和 10 m 风场预报存在正偏差, 2 m 比湿预报存在负偏差, 即预报场的温度偏高、风速偏大、湿度偏干, YSU 方案在 2 m 温度和 10 m 风场预报上效果更好, 而 MJY 方案在 2 m 比湿预报上效果更好。高空要素预报上, 两个方案在各个高度层上对各个要素的预报各有优劣, 其中 YSU 方案在高空风速预报上较 MJY 方案更稳定。

关键词: 边界层方案; YSU 方案; MJY 方案; 陕西省区域数值模式系统; 预报检验

中图分类号: P456.7

文献标识码: A

大气边界层位于对流层的最下层, 人类生产、生活都发生在这一层, 因此大气边界层对人类活动有着直接的影响^[1]。大气边界层在天气系统中具有重要作用, 是陆地与大气之间物质和能量交换及输送的主要通道^[2], 因此在数值模式中对边界层内物理过程的合理描述是必须的, 合理的边界层参数化方案在一个成熟的数值模式中不可或缺。常用的边界层方案可分为局地方案和非局地方案, 其主要区别在于对空间任一点上未知量的参数化思想不同^[3]。目前已经有大量工作对这两类参数化方案在边界层模拟性能方面进行了对比研究, 但由于下垫面性质、模拟对象和模式分辨率等各种因素的影响, 不同参数化方案模拟的效果差别很大^[4-6]。常用的局地方案为 MJY 方案^[7], 该方案采用 Mellor 和 Yamada 的湍流闭合方法

来表示表面层以上的湍流。常用的非局地方案为 YSU 方案^[8], 该方案是非局地 K 理论方案, 通过在控制方程中加入逆梯度项表示非局地通量。陕西周边地区已经开展了很多边界层方案相关的研究, 如王腾蛟等^[9]的研究指出, 模式中边界层参数化方案的选择对模拟结果影响较大, 其中考虑了非局地混合及边界层顶夹卷作用的 YSU 方案对黄土高原典型半干旱区夏季大气边界层的日变化及边界层内气象要素的垂直分布特征的模拟效果相对更优。高笃鸣等^[10]利用对四川盆地连续 40 天的降水开展模拟试验, 指出 YSU 方案对大量级降水预报能力较优。

陕西横跨三个气候带, 南北气候差异较大, 陕南为北亚热带气候, 陕北南部、关中及秦岭南坡(海拔高度 1 000 m 以上)属暖温带气候, 陕北北

收稿日期: 2021-12-08

作者简介: 马永永(1990—), 男, 汉族, 河南宝丰人, 博士, 工程师, 主要从事数值天气预报研究。

基金项目: 中国气象局创新发展专项(2020 年灾害性天气预报技术总结分析 CXFZ2021Z034); 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2019Z-1, 2020G-14)

部为温带气候^[11]。陕西省是气象灾害多发省份,干旱、暴雨、洪涝、冰雹、大风、霜冻、冷害等气象灾害以及由气象因素引发的山洪、地质灾害、农业病虫害、森林和城市火险等次生衍生灾害频发,每年给工农业生产和人民群众生命财产安全造成了巨大损失^[12]。陕西地形复杂,陕北属于黄土高原,陕南被秦岭覆盖,边界层方案对陕西地区中尺度模式预报的影响研究较少。本文利用陕西省区域数值模式系统,采用YSU和MYJ两种边界层方案开展对比试验,研究两种方案对2021年7月陕西地区降水、2 m气温、10 m风速、2 m比湿、高空风速、高空比湿和高空温度预报的影响,为改进陕西省区域数值模式系统提供依据。

1 试验设计和资料方法

试验采用基于WRF4.1版本的陕西省区域数值模式系统。试验模拟区域如图1所示,系统设置两重模式区域,最外层覆盖整个中国区域(水平分辨率为9 km),内层覆盖陕西及周边区域(水平分辨率为3 km)。主要的物理方案包括RRT-MG短波和长波辐射方案^[13]、Thompson微物理方案^[14]和Tiedtke积云参数化方案^[15],垂直方向为34层。同化系统采用3Dvar,同化数据为常规地面观测资料和探空资料。试验周期为2021年6月30日20时(北京时,下同)到2021年8月1日08时,采用每天8次更新循环预报,样本总数超过250个。

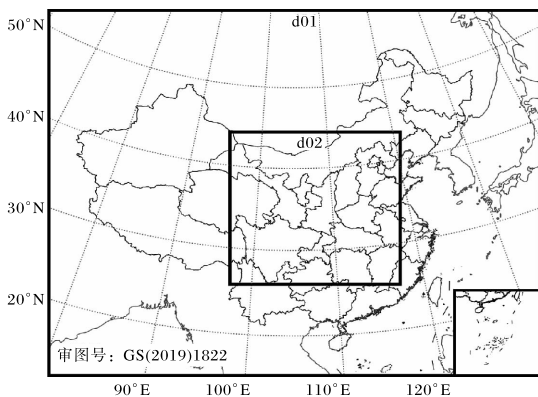


图1 模式区域设置

模式初始场和边界场采用美国国家海洋与大气管理局NOAA(The National Oceanic and Atmospheric Administration)每6小时发布的GFS

(the global forecast system)全球预报产品,垂直方向为26层,预报数据时间间隔为3 h,预报时效为0~240 h。

检验采用的实况资料为陕西省内99个国家地面观测站和4个探空观测站实况观测数据,地面观测数据包括降水、2 m温度、10 m风速、相对湿度,探空观测资料包括相对湿度、温度、风速,其中相对湿度转化为比湿进行检验。检验针对3 km分辨率(d02)区域开展。对降水检验采用技巧评分(TS评分, T_S)、预报偏差(BIAS评分, B_{IAS})、空报率(FAR, F_{AR})和漏报率(MR, M_R),计算公式如下:

$$T_S = A / (A + B + C), \quad (1)$$

$$B_{IAS} = (A + B) / (A + C), \quad (2)$$

$$F_{AR} = B / (A + B), \quad (3)$$

$$M_R = C / (A + C), \quad (4)$$

式中A表示实况和预报都有降水的次数,B表示实况无降水而预报有降水的次数,C表示实况有降水而预报无降水的次数。TS评分值的范围为0~1,TS评分越高表明预报的准确率越高。BIAS评分表示预报降水与观测降水的偏差情况,BIAS评分大于1表示预报的降水范围较观测偏大,模式空报明显,小于1表示预报量较观测量的范围偏小,模式漏报明显,BIAS评分越接近于1,表示预报降水范围与观测降水范围之间的偏差越小。FAR取值范围为0~1,表示预报的降水中有多少比例在实况中并没有发生,评分为0时预报效果最佳。MR取值范围为0~1,表示在实况中发生的事件没有被预报的比例,评分为0时预报效果最佳。

2 m气温、10 m风速、2 m比湿、高空风速、高空比湿和高空温度的检验采用平均误差(ME)和均方根误差(RMSE)作为检验指标。

2 检验结果

2.1 地面要素检验

2.1.1 降水检验 分别采用TS评分、空报率、漏报率和BIAS评分对24 h和1 h累积降水量进行检验,其中降水阈值选取了6个,分别是0.1、1.0、5.0、10.0、25.0、50.0 mm。由于1 h累积降水量一般比较小,因此选用较小的4个降水阈值

(0.1、1.0、5.0、10.0 mm)进行检验。

24 h 累积降水量的 TS 评分(图 2a)随着降水阈值的增大而减小,0.1 mm 阈值降水的 TS 评分最高,预报效果最好,MYJ 方案各个阈值降水的 TS 评分均大于 YSU 方案。24 h 累积降水量的 BIAS 评分(图 2b)随着降水阈值的增加而减小,较小阈值降水(0.1、1.0、5.0 mm)的 BIAS 评分大于 1 而较大阈值降水(25.0 mm 和 50.0 mm)的 BIAS 评分小于 1,其中 10.0 mm 阈值降水的 BIAS 评分最接近于 1。表明对较大阈值降水,模式预报降雨量达到相应阈值的测站数少于实际测站数,而对较小阈值降水,模式预报降雨量达到相应

阈值的测站数多于实际测站数。MYJ 方案对 5.0 mm 以下阈值降水的 BIAS 评分更接近于 1,而 YSU 方案对 25.0 mm 以上阈值降水的 BIAS 评分更接近于 1。两种方案模式的空报率(图 2c)和漏报率(图 2d)均随着降水阈值的增加而增加。除了 10 mm 降水阈值,MYJ 方案的空报率和漏报率均比 YSU 方案的低。对较大量级降水,MYJ 方案的空报率和漏报率均更低,TS 评分更高,但是 BIAS 评分却更小,这可能是由于 MYJ 方案预报降雨量达到相应阈值的测站数更少,但降水预报落区的偏差更小。

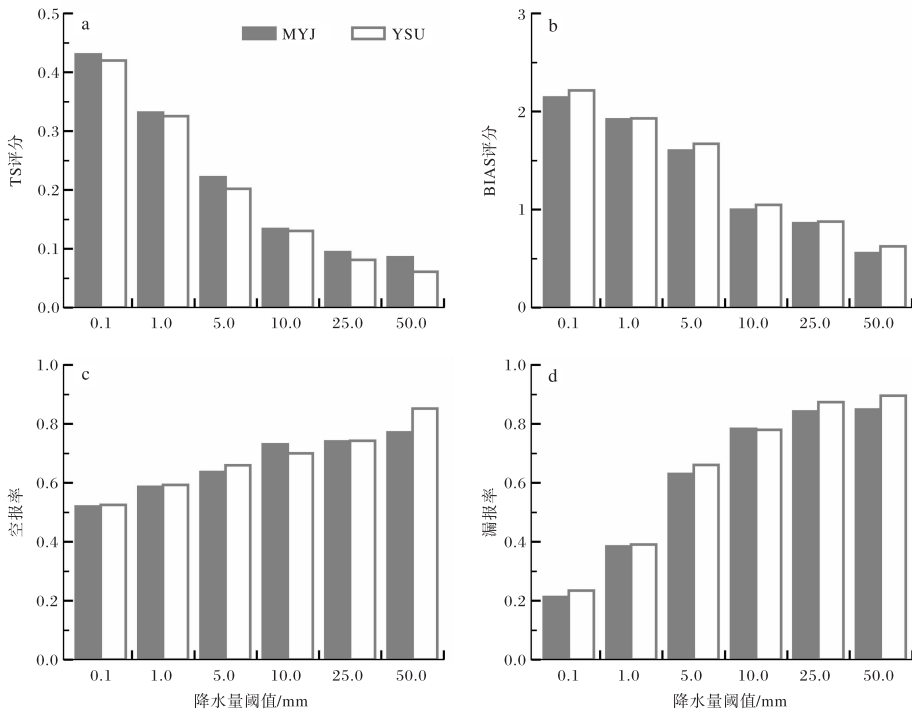


图 2 MYJ 和 YSU 方案对陕西 2021 年 7 月不同阈值降水 24 h 预报的 TS 评分(a)、BIAS 评分(b)、空报率(c)漏报率(d)

图 3 显示了两种方案 1 h 累积降水量预报在各个阈值上的平均评分变化情况。随着降水阈值的提高,两种方案的 TS 评分(图 3 a、e、i、m)逐渐降低。在 0.1、1.0、5.0、10.0 mm 降水阈值上,24 个预报时效中分别有 20、15、18、14 个预报时刻 MYJ 方案的 TS 评分高于 YSU 方案。在前几个预报时效中,MYJ 方案和 YSU 方案的 TS 评分互有高低,但是随着预报时效的增加,尤其是在

0.1、1.0、5.0 mm 降水阈值上,MYJ 方案的 TS 评分逐渐高于 YSU 方案,表明 MYJ 方案在降水预报 TS 评分的稳定性上优于 YSU 方案。两个方案的 BIAS 评分(图 3 b、f、j、n)随着降水阈值的提高逐渐降低,随着预报时效的增加而快速减小。在 0.1、1.0 mm 阈值上 BIAS 评分基本均大于 1,表明模式预报降雨量达到相应阈值的测站数多于实际测站数;在 5.0、10.0 mm 阈值上基本均小于

1,表明模式预报降雨量达到相应阈值的测站数少于实际测站数。相对于 YSU 方案,MYJ 方案的 BIAS 评分随着预报时效的增加变化更小。空报率(图 3c、j、k、o)和漏报率(图 3d、h、l、p)均随着降水阈值的增加而增高,10 mm/h 的空报率和漏

报率最高。在前几个预报时效,MYJ 方案和 YSU 方案的空报率和漏报率互有高低,但是随着预报时效的增加,YSU 方案的空报率和漏报率均逐渐高于 MYJ 方案,表明 MYJ 方案的稳定性更好。

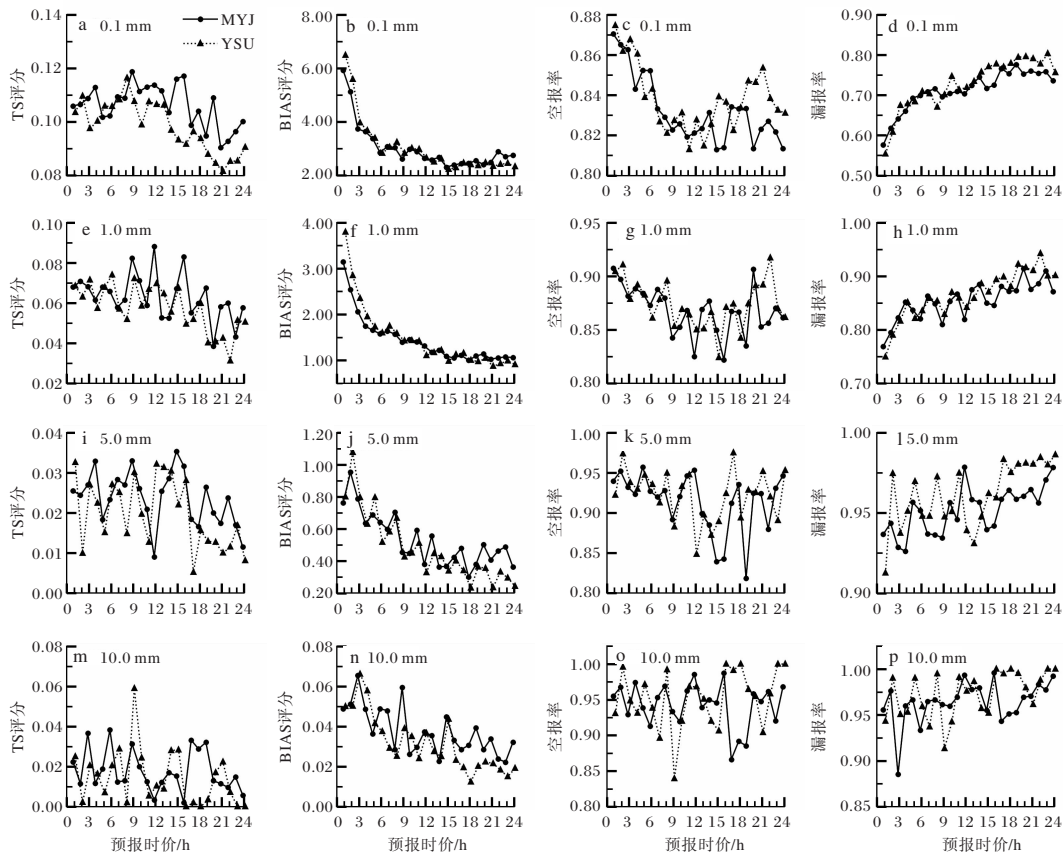


图3 MYJ和YSU方案对陕西2021年7月不同阈值降水1h预报的TS评分(a, e, i, m)、BIAS评分(b, f, j, n)、空报率(c, g, k, o)和漏报率(d, h, l, p)

2.1.2 地面2 m温度、2 m比湿和10 m风速检验 图4a、图4b为MYJ和YSU两个方案地面2 m温度逐小时预报的平均误差和均方根误差。两个方案的2 m温度预报存在着正偏差,预报偏暖,预报偏差在0.2~2.25 K范围内且随着预报时效的增加而增大。两个方案的均方根误差在1.6~3.2 K范围内,随着预报时效的增加而逐渐增大。YSU方案2 m温度预报的平均误差和均方根误差均比MYJ方案低,表明YSU方案在2 m温度预报上优于MYJ方案。

地面2 m比湿预报存在着负偏差(图4c、d),预报偏干,偏差值在-1.3~-2.9 g/kg范围内,且随

着预报时效的增加而加大。两个方案的2 m比湿预报均方根误差在1.8~3.5 g/kg范围内,随着预报时效的增加而逐渐增大。MYJ方案的2 m比湿预报平均误差和均方根误差均比YSU方案小,表明MYJ方案在2 m比湿预报上优于YSU方案。

地面10 m风速预报存在着正偏差(图4e、f),预报偏大,偏差值在0.3~1.0 m/s范围,且随着预报时间的增加而增大。两个方案的10 m风速均方根误差在1.3~1.9 m/s范围内,随着预报时间的增加而逐渐增大。YSU方案10 m风速预报的平均误差和均方根误差比MYJ方案小,表明YSU方案在10 m风速预报上优于MYJ方案。

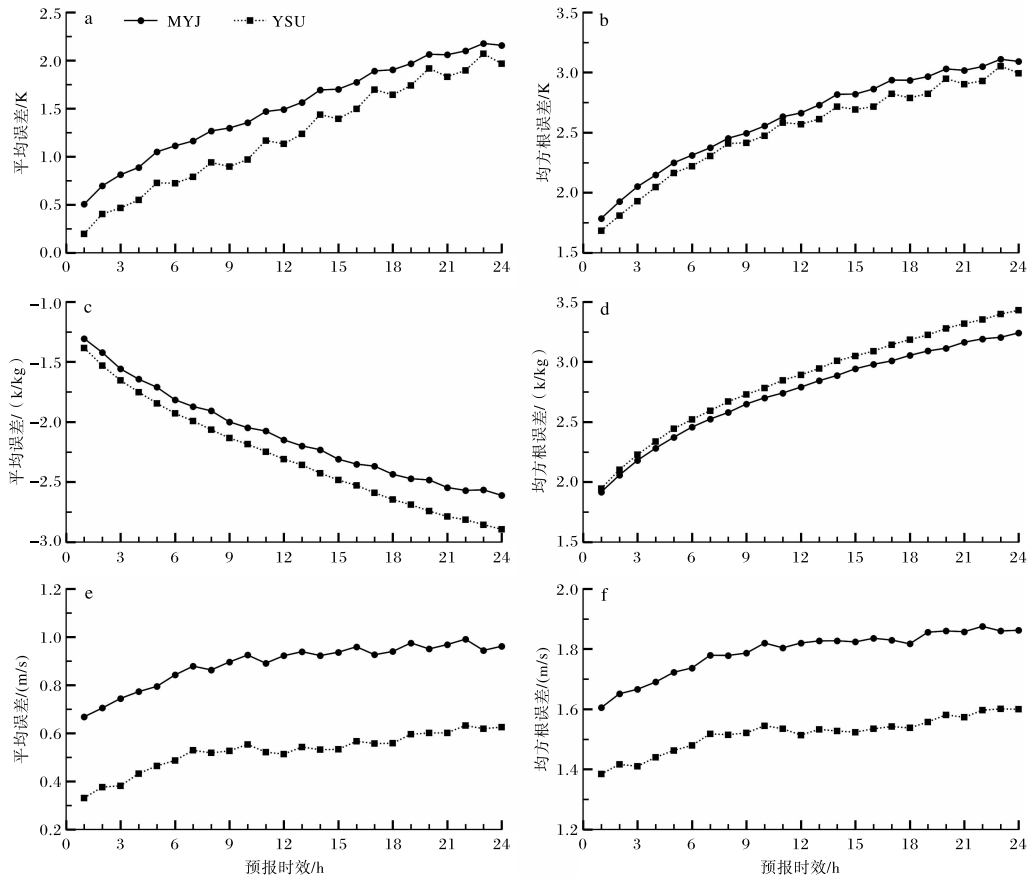


图4 MYJ和YSU方案对陕西2021年7月2m温度(a,b)、2m比湿(c,d)和10m风速(e,f)预报的平均误差和均方根误差

2.2 高空要素检验

分别对两个方案模式预报高空925、850、700、500、400、300、200、100 hPa的温度、比湿和风速进行检验对比(图5)。两个方案高空要素预报的平均偏差和均方根误差随着预报时效的增加而增加。

高空温度预报(图5a、b)在925、850、700、100 hPa高度层上存在正偏差,预报偏暖,在其他高度层上存在负偏差,平均偏差在 $-0.4 \sim 2.3$ K范围内,均方根误差在 $0.8 \sim 2.7$ K范围内。12 h预报时效上,MYJ方案模式在925、300、400 hPa高度上的温度预报平均偏差和均方根误差均比YSU方案小,在850、100 hPa高度上预报平均偏差和均方根误差均比YSU方案大,在700、500、200 hPa高度上预报平均偏差比YSU方案大,而均方根误差比YSU方案小。24 h预报时效上,MYJ方案模式在925、800、300 hPa高度上预报

平均偏差和均方根误差均比YSU方案小,在100 hPa高度上预报平均偏差和均方根误差均比YSU方案大,在700、500、400、200 hPa高度上预报平均偏差比YSU方案大,而均方根误差比YSU方案小。表明MYJ方案在较低高度层上温度预报优于YSU方案,而在较高高度层上比YSU方案差。

从高空比湿检验的分布(图5c、d)来看,比湿预报主要为负偏差,预报偏干,偏差值在 $-1.40 \sim 0.03$ g/kg范围内。比湿预报的平均偏差随着高度的增加而增大,均方根误差随高度的增加而减小。12 h预报时效上,MYJ方案在925、400、200 hPa高度上比湿预报偏差和均方根误差均比YSU方案小,在850 hPa高度上预报偏差和均方根误差均比YSU方案大,在700 hPa高度上预报偏差比YSU方案大而均方根误差比YSU方案小,在500、300 hPa高度上预报偏差比YSU方案

小而均方根误差比YSU方案大。24 h预报时效上,MYJ方案在925 hPa高度上预报偏差和均方根误差均比YSU方案小,在700 hPa高度上预报偏差和均方根误差均比YSU方案大,在850、400、200 hPa高度上预报偏差比YSU方案大而均方根误差比YSU方案小。表明MYJ方案比湿预报在925 hPa高度层上优于YSU方案,而在850、700 hPa高度层上比YSU方案差,在较高高度层上与YSU方案各有优劣。

两个方案的高空风速预报(图5e、f)在低层和高层主要为正偏差,预报偏大,而在中间高度层为负偏差,预报偏小,偏差在 $-1\sim 1$ m/s范围内,均方根误差在 $2\sim 4$ m/s范围内。12 h预报时效

上,MYJ方案风速预报在500、400、300、100 hPa高度上预报偏差和均方根误差均比YSU方案小,在925、200 hPa上预报平均偏差和均方根误差均比YSU方案大,在700 hPa上预报平均偏差比YSU方案大而均方根误差比YSU方案小,850 hPa上预报偏差比YSU方案小而均方根误差比YSU方案大。24 h预报时效上,MYJ方案在925、500、400、300 hPa高度上预报平均偏差和均方根误差均比YSU方案的大,在700、850 hPa高度上预报平均偏差更小而均方根误差更大,在200、100 hPa高度上预报平均偏差更大而均方根偏差更小。表明YSU方案在高空风速预报上相对MYJ方案更加稳定。

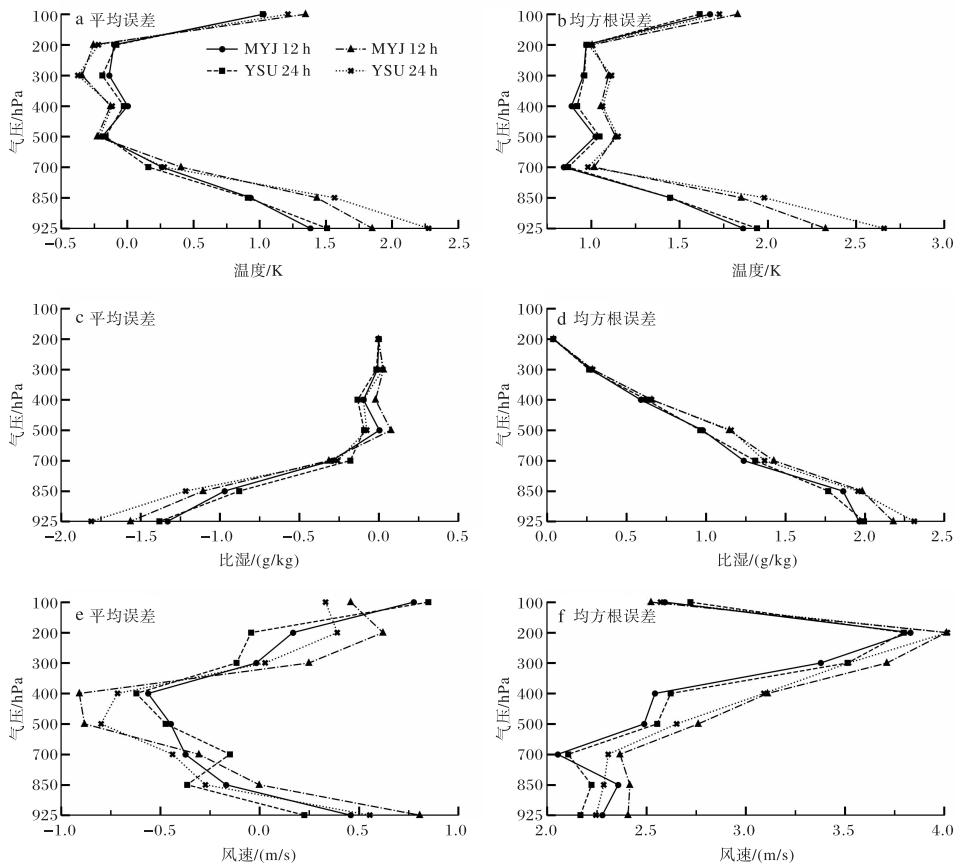


图5 MYJ和YSU方案对陕西2021年7月高空温度(a、b)、比湿(c、d)和风速(e、f)预报的平均误差和均方根误差随高度分布图

3 结论与讨论

以陕西省区域数值模式系统为试验系统,对比分析了边界层方案MYJ和YSU对陕西地区地面和高空要素预报的影响。

(1)在降水量预报上,相对于YSU方案,MYJ方案的24 h累积降水量的空报率和漏报率都更低,TS评分更高,逐小时降水评分随时间变化更小,降水预报效果和稳定性更好。

(2)两个方案模式预报的2 m 温度偏暖,10 m 风场偏大,2 m 比湿偏干,误差随着预报时效的增加而增大。YSU 方案的2 m 温度和10 m 风场预报的平均误差和均方根误差更小,预报效果更好,而 MYJ 方案的2 m 比湿预报的平均误差和均方根误差更小,预报效果更好。

(3)高空要素上,两个方案的模式比湿预报主要表现为偏干,高空温度和风速预报在低层和高层主要为偏暖、偏大,而在中间高度层为偏冷、偏小。两个方案高空要素预报在各个层次上各有优劣,但 YSU 方案在高空风速预报上相较 MYJ 方案更加稳定。

(4)文中探讨了 MYJ 和 YSU 边界层参数化方案对陕西夏季要素预报的影响,得到了一些初步的结论,表明可以在降水较多的季节选用 MYJ 方案,在降水较少的季节选用 YSU 方案;但边界层参数化方案的季节适用性仍有待进一步研究,同时数值模式要素预报不仅与边界层参数化方案有关,也与其他物理过程(例如积云对流参数化方案、微物理过程、陆面过程等)密切相关。因此如何更好地选用边界层参数化方案,还需要进一步的探索和研究。

参考文献:

- [1] STULL R B. An introduction to boundary layer meteorology [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988: 2.
- [2] 刘辉志,冯健武,王雷,等. 大气边界层物理研究进展[J]. 大气科学,2013,37(2):467-476.
- [3] DEARDORFF J M. Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers[J]. Journal of the Atmospheric Sciences,1972, 29(1): 91-115.
- [4] 张碧辉,刘树华,马雁军. MYJ 和 YSU 方案对 WRF 边界层气象要素模拟的影响[J]. 地球物理学报, 2012,55(7):2239-2248.
- [5] 王蓉,张强,岳平,等. 大气边界层数值模拟研究与未来展望[J]. 地球科学进展,2020,35(4):331-349.
- [6] 吴志鹏,李跃清,李晓岚,等. WRF 模式边界层参数化方案对川渝盆地西南涡降水模拟的影响[J]. 大气科学, 2021, 45(1):58-72.
- [7] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. Reviews of Geophysics, 1982, 20(4):851-875.
- [8] HONG S Y, NOH Y, DUDHIA J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. Monthly Weather Review, 2005, 134(9):2318.
- [9] 王腾蛟,张镭,赵世强,等. WRF 模拟 SACOL 夏季边界层结构及不同边界层方案的对比[C]// 第28届中国气象学会年会:S9 大气物理学与大气环境. 北京:中国气象学会,2011:256-277.
- [10] 高笃鸣,李跃清,蒋兴文,等. WRF 模式多种边界层参数化方案对四川盆地不同量级降水影响的数值试验[J]. 大气科学,2016,40(2):371-389.
- [11] 陕西省气象局《陕西气候》编写组. 陕西气候[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2009: 8-12.
- [12] 杜继稳,侯明全,梁生俊,等. 陕西省短期天气预报技术手册[M]. 北京:气象出版社, 2007: 22-31.
- [13] IACONO M J, DELAMERE J S, MLAWER E J, et al. Radiative forcing by longlived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. J Geophys Res, 2008, 113: D13103.
- [14] THOMPSON G, FIELD P R, RASMUSSEN R M, et al. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization[J]. Monthly Weather Review, 2008, 136(12): 5095-5115.
- [15] TIEDTKE M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models [J]. Monthly Weather Review, 1989, 117(8), 1779-1800.