

刘嘉慧敏,戴昌明,胡启元,等. 陕西低槽强降水过程分析及客观订正方法[J]. 陕西气象, 2024(1):1-9.

文章编号:1006-4354(2024)01-0001-09

陕西低槽强降水过程分析及客观订正方法

刘嘉慧敏^{1,2},戴昌明^{1,2},胡启元^{1,2},李培荣^{1,2},李文耀^{1,2}

(1. 陕西省气象台,西安 710014;

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)

摘要:为了提高中纬度低槽东移影响下陕西强降水天气的精准预报能力,采用欧洲中期天气预报中心全球模式(简称 EC-thin)、中国气象局数值天气预报全球模式(简称 CMA-GFS)、中央气象台格点指导预报产品(简称 SCMOC)、陕西省气象局自主研发动态交叉取优产品(简称 DCOEF)、多源实况融合资料及全省 396 个气象监测站资料,选取了陕西三次低槽东移背景下强降水过程(2019 年 6 月 4—5 日关中、陕南暴雨过程,简称“0604”暴雨过程;2018 年 6 月 17—18 日陕南暴雨过程,简称“0617”暴雨过程;2018 年 7 月 10—11 日关中西部、陕北暴雨过程,简称“0710”暴雨过程),对比分析强降水的实况差异及影响系统演变特征,提炼预报着眼点。基于各模式前期预报质量,提出了一种简单的动态融合客观订正方法,检验了该方法在此类强降水过程中的预报效果。结果表明:(1)“0604”暴雨过程和“0617”暴雨过程强降水主要集中在陕西关中和陕南地区,“0710”暴雨过程强降水主要集中在陕西西部和北部地区;“0604”“0710”暴雨相较“0617”暴雨过程,强降水持续时间短,雨带移动速度快。(2)尽管这三次暴雨过程均发生在 500 hPa 中纬度低槽配合 850 hPa 低涡东移过程中,但低涡结构的发展演变及其强度变化的差异导致了三次暴雨落区、强度、主要降水性质的不同;三次暴雨过程中 850 hPa 低涡发展在白天和夜晚均存在加强阶段。(3)基于加权评分的多模式动态融合强降水订正方法在低槽强降水过程中大雨以上量级、暴雨以上量级 TS 评分相较单一模式产品均有小幅度提高,在长历时的系统性强降水过程中提高更多,表现出一定的订正效果,可为陕西此类强降水天气预报提供客观参考。

关键词:强降水;低涡发展;多模式融合;客观订正

中图分类号:P458.1:P456.7

文献标识码:A

陕西由于地处青藏高原东部,在主汛期(6—8 月),随着西太平洋副热带高压的北抬,陕北黄河沿线、秦巴山地多发短时强降水。由于陕北处于干旱半干旱地带,分布着沙漠、高原、山脉、黄河等,地表生态系统相对比较脆弱,秦巴山地河流峪口众多,是洪涝灾害高暴露区和脆弱区,强降水来势猛,预报难度非常大。

以往研究表明,按 500 hPa 环流形势,陕西暴雨可分为 4 种类型,即“低槽副高型”“副高控制

型”“西北气流型”和“中纬度高压坝控制”^[1-2]。在南北双系统的协同作用下,低槽副高型往往会给陕西带来点强、面广的暴雨天气。一方面,低空偏南风急流或偏东风急流可沿副高外围将暖湿空气从孟加拉湾、南海和东海输送至陕南,促使不稳定层结的形成,为暴雨区提供了充沛的水汽条件和必要热力条件。另一方面,低槽东移过程中携带的大量冷空气持续向陕西侵入,这不仅强迫暖湿空气抬升,还可沿等熵面快速下滑造成气旋性涡

收稿日期:2021-05-20

作者简介:刘嘉慧敏(1989—),女,陕西宝鸡人,硕士,高工,从事灾害性天气预报及订正方法研究。

基金项目:陕西省自然科学基金计划(2022JQ-279);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(2022Y-1)

旋系统的快速发展,促进暴雨增幅^[3-4]。此外,高低空急流耦合为低槽强降水的发展创造了中尺度环境背景,其形成的次级环流不仅使暴雨区上升运动加强和维持,而且使高低层辐散辐合、水汽输送、不稳定能量建立和释放相结合^[5-6],持续的高层辐散、低层辐合的环流配置保证了低层源源不断的水汽辐合和抬升凝结^[7],不稳定能量、强散度柱、超强垂直上升运动的耦合发展是陕西低槽强降水产生的动力机制^[8]。这些研究不仅在理论上揭示了中纬度低槽东移过程中陕西强降水形成的条件和成因,而且对指导陕西大范围系统性的暴雨预报产生了积极的作用。事实上,在低槽东移相似的环流背景下,由于低层系统发生发展的演变差异会给陕西低槽强降水的强度和范围带来较大的预报不确定性,因此,有必要对陕西低槽强降水过程中低层关键系统结构、位置、移动的演变规律进行剖析与凝练。

面向精准预报的业务需求,科学合理的订正方法是做好陕西低槽强降水预报不可或缺的环节。目前,基于经典统计学方法的温度预报订正技术基本能够优于预报员预报水平^[9],而降水作为离散型变量,受大气演变物理过程的控制,呈偏态分布,其往往表现出时空不连续性、随机性。对数值模式降水预报的订正方法研究是近年来气象工作者的研究核心之一。现有单模式降水客观订正方法主要有配料法、频率匹配、逻辑回归、贝叶斯模型平均法、基于评分最优化方法等^[10-14]。这些方法均能在一定程度上改善原有模式对不同量级降水的预报效果,但各方法本身也包含一定局限性,例如在应用频率匹配法时,因降水存在明显的季节变化,且当实况或预报在大量级降水上的样本量偏少时,订正系数易出现异常。即使订正后预报降水与实况面积相当,因降水落区与实况总是存在一定程度的差异,预报效果未必能达到最优^[14]。另外,面对突发性强天气时,如果直接使用单一确定性模式的降水预报,很可能会丢失其他模式反映的预报信息,导致预报结果存在较大偏差。本文提出了一种基于加权评分的多模式融合强降水订正方法,在陕西近年几次强降水天气过程中有一定的正订正效果。该方法简单易

行,可为省、市、县三级业务人员预报陕西低槽强降水提供客观参考。

1 资料与方法

1.1 资料

所用资料:(1)2019年6月4—5日、2018年6月17—18日和2018年7月10—11日全省396个气象监测站过去1 h降水量数据。(2)国家气象信息中心研制的CMPAS中国逐日降水快速融合实况分析产品,覆盖中国区域($70^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$, $0^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$),空间分辨率为 $0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$,每日生成两次,即08—08时(北京时)和20—20时(北京时)。(3)欧洲中期天气预报中心全球模式(简称EC-thin)、中国气象局数值天气预报全球模式(简称CMA-GFS)、中央气象台格点指导预报产品(简称SCMOC)、陕西省气象局自主研发动态交叉取优产品(简称DCOEF)2018—2019年08时、20时起报24 h降水量,覆盖范围为 $103^{\circ}\text{E}\sim 113^{\circ}\text{E}$, $31^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 。(4)ERA5逐日8次 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 的全球再分析资料。

1.2 方法

选取陕西三次低槽东移背景下强降水过程(2019年6月4—5日关中、陕南暴雨过程,简称“0604”暴雨过程;2018年6月17—18日陕南暴雨过程,简称“0617”暴雨过程;2018年7月10—11日关中西部、陕北暴雨过程,简称“0710”暴雨过程),对比分析强降水的实况差异及影响系统演变特征。由于单一模式对强降水的预报结果往往存在很大的差异性,因此基于加权评分的多模式融合方法,以改进单模式对强降水的预报性能。该方法分为三步:(1)获取前15 d不同单模式大雨以上TS评分;(2)利用加权平均法,获取各单模式权重系数;(3)基于权重系数,得到多模式降水融合场。具体计算方法如下。

$$R = (R_{\text{EC-thin}} T_1 + R_{\text{CMA-GFS}} T_2 + R_{\text{SCMOC}} T_3 + R_{\text{DCOEF}} T_4) / (T_1 + T_2 + T_3 + T_4), \quad (1)$$

式中, R 为多模式融合后的降雨量(mm); $R_{\text{EC-thin}}$ 、 $R_{\text{CMA-GFS}}$ 、 R_{SCMOC} 、 R_{DCOEF} 分别为EC-thin、CMA-GFS、SCMOC、DCOEF模式预报的降雨量(mm); T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别为EC-thin、CMA-GFS、SCMOC、DCOEF模式评分。

所用检验方法参考中国气象局《气象预报产品质量评分系统技术手册及中短期天气预报质量检验办法》(气发〔2005〕109号)。主要评分指标包括:TS评分(T_s)、ETS评分(T_{se})、BIAS评分(B_{ias})、TSS评分(T_{ss}),具体为:

$$T_s = a/(a+b+c) \times 100\%; \quad (2)$$

$$T_{se} = (a - a_r)/(a+b+c - a_r) \times 100\%,$$

$$a_r = (a+b)(a+c)/(a+b+c+d); \quad (3)$$

$$B_{ias} = (a+b)/(a+c); \quad (4)$$

$$T_{ss} = a/(a+c) - b/(b+d). \quad (5)$$

式中, a 为有降水预报正确的站(次)数, b 为空报的站(次)数, c 为漏报的站(次)数, d 为无降水预报正确的站(次)数, a_r 为随机预报正确的站(次)数, a 、 b 、 c 、 d 、 a_r 的单位均取1。实况为国家气象信息中心下发的多源实况融合产品。

2 暴雨过程实况特征

在所选的三次暴雨过程中,“0604”暴雨过程和“0617”暴雨过程强降水主要集中在陕西的关中和陕南地区,“0710”暴雨过程强降水主要集中在陕西的西部和北部地区(图1)。从三次暴雨天气过程的降水强度可见(图略),24 h降水量“0617”暴雨过程最大,安康的汉滨区达160.3 mm,“0710”

暴雨过程次之,汉中的青木川达152.3 mm,“0604”暴雨过程最小,商洛的商南达128.2 mm,三次过程的强降水雨带位置和形状与中低层主要影响系统密切相关。由三次暴雨过程中降水量最大的4个气象站的小时雨强演变序列(图2,见第4页)可见,在“0604”暴雨过程中(图2a),强降水自西向东先后影响关中西部、关中部、陕南中部及东部4个地区。整个降水过程可分为4个阶段,降水首先出现在陇县,4日20时起陇县小时雨强逐渐增大,5日00时达到最大。随着降水系统迅速东移,陇县小时雨强逐渐减弱,洛川小时雨强开始增强,5日04时达到最大。5日白天,强降水依次影响安康和商洛地区,安康的旬阳站和商洛的商南站小时雨强分别在11时和16时达到最大。随着降水系统的移出,陕西强降水结束。“0617”暴雨过程(图2b)降水持续时间较长,降水从17日20时开始,一直持续至18日18时,4站的小时雨强均呈现出多峰值特点,小时雨强最大为镇巴站,18日04时达16.5 mm/h。尽管降水强度未达到短时强降水强度,但由于降水系统维持时间较长,造成大暴雨天气。“0710”暴雨过程(图2c)强降水主要集中在10日夜间至11日早

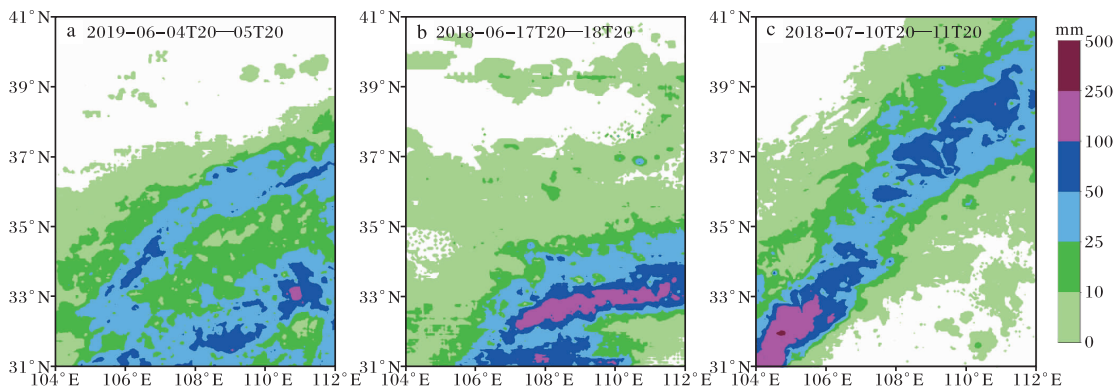


图1 陕西三次暴雨过程降雨量

晨,首先在汉中略阳产生,11日凌晨小时雨强达到最大。此后,陕北降水开始,于11日04—06时达到最大,随着降水系统东移,11日16时陕西强降水结束。比较这三次暴雨过程,“0710”暴雨过程降水时段较为集中,主要发生在夜间和清晨,“0604”暴雨过程呈明显的阶段性强降水特点,自西向东影响陕西,“0617”暴雨过程降水系统移动

缓慢,造成降水持续时间长。

3 影响系统演变对比分析

3.1 天气形势及降水落区差异

“0604”暴雨过程,500 hPa低槽位于甘肃陇南至四川盆地东部,中心位势高度达5 760 gpm,850 hPa低涡先在四川东南部生成。5日08时(图3a),500 hPa低槽在东移的过程中加深发展,

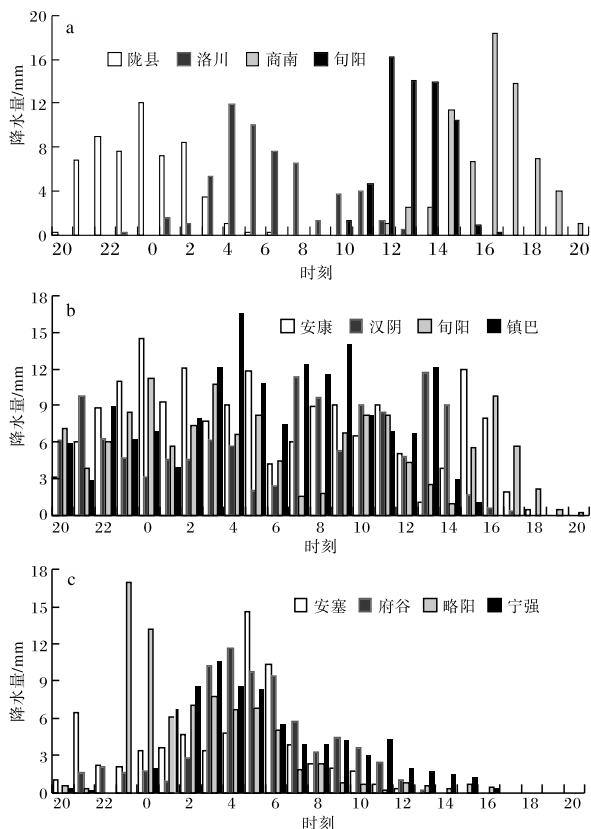


图2 陕西三次暴雨过程中单站小时降雨量演变(文见第3页;a 2019-06-04T20—05T20,b 2018-06-17T20—18T20,c 2018-07-10T20—11T20)

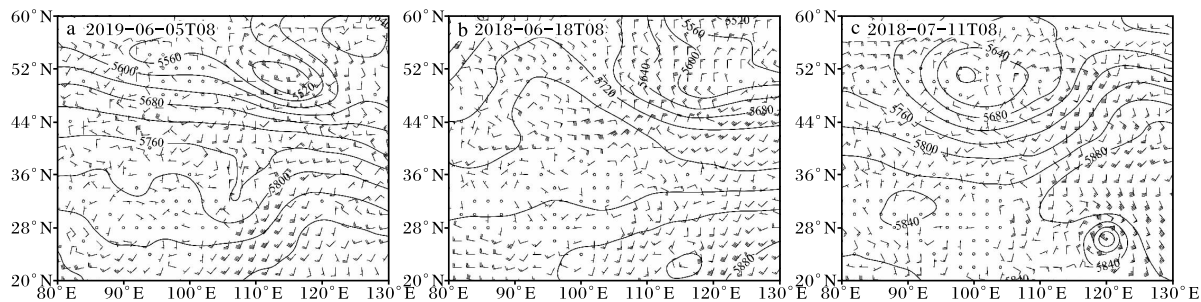


图3 陕西三次暴雨过程500 hPa高度场(单位为gpm)和850 hPa风场

这三次低槽暴雨天气过程均与低涡系统的形成、移动和强烈发展过程有关,图4给出了三次过程850 hPa低涡中心位势高度及3 h降水量最大站时间序列演变。可以看出,二者基本呈反位相变化关系,当850 hPa低涡发展时,3 h最大站降水量增加,反之减小。在图4c中,11日14时后二者呈同位相变化关系,这是由于14时后700 hPa西南急流强度减弱,最大风速仅6 m/s,水汽供应减小,不利于降水强度增大(图略)。17

低槽的经向度加大,850 hPa低涡系统较前一时次东移北上,中心强度也随之增大。之后系统迅速东移,12 h内东移约30个经度,中心强度达1 372.6 gpm。“0617”暴雨过程(图3b),500 hPa低槽位置较“0604”过程偏南,经向度较之偏弱,位于四川盆地东部至云贵高原东部,在从高原东移的过程中加深发展。850 hPa低涡先在贵州西北部生成,18日08时,低涡北上,位置较“0604”过程偏南,中心强度达1 389.6 gpm。与“0604”过程不同的是,500 hPa低槽和850 hPa低涡移动较慢,12 h东移约20个经度,系统的稳定维持,造成此次过程降水持续时间长。“0710”暴雨过程,由于受台风登陆的影响,西太平洋副热带高压断裂,主体位置偏东。500 hPa贝加尔湖附近有一深厚的冷涡系统,其南侧为从蒙古中部至河套西部的低压槽区。与前两次过程相比,“0710”暴雨过程500 hPa低槽位置偏北,冷空气强度偏强,雨带分布基本与槽前西南气流位置一致。850 hPa低涡同样先是在贵州西北部生成,此后迅速北上加强发展。11日08时,低涡位于重庆西部,位置较前两次过程偏南,因而造成的强降水区域主要是在四川和陕西交界处。

时之后,急流强度增加,整层水汽条件转好,降水强度随之增加。另外,这三次过程中850 hPa低涡呈明显的“双峰”型特征,有两次加强发展过程,其中夜间加强发展时段均在23时至05时,白天加强时段“0604”暴雨过程和“0710”暴雨过程为14—17时,“0617”暴雨过程为11—14时。夜间发展阶段,“0604”暴雨过程低涡强度最大,中心位势高度最低为1 379.3 gpm,3 h最大站降水量随之增至63 mm,“0710”暴雨过程低涡强度最小,

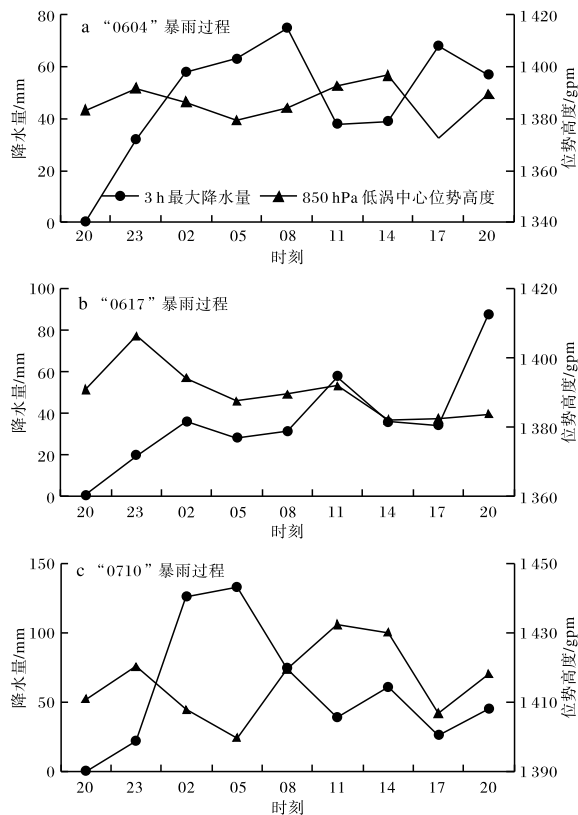


图4 陕西三次暴雨过程850 hPa低涡中心位势高度及3 h最大降水量单站演变时序图

但3 h最大站降水却增至133.0 mm,这可能与当地特殊地形、水汽条件有关。白天发展时段,

“0604”暴雨过程和“0617”暴雨过程低涡强度较第一时段有所加强,因而对应的3 h最大站降水量也较前一时段增加。“0710”暴雨过程强度较第一时段减弱,故3 h最大站降水量呈整体下降的趋势。可见,同样在500 hPa低槽东移的环流背景下,850 hPa低涡结构发展演变及其强度变化的差异导致了三次暴雨落区、强度、主要降水性质的不同。

3.2 低涡发展与中层影响系统的关系

前文分析指出这三次暴雨过程中850 hPa低涡发展均存在两次加强,这与加强时段里500 hPa低槽的移动及槽前相对涡度平流的变化密切相关(图5)。低涡夜间加强阶段(23时至次日05时),“0604”暴雨过程中,高原槽与南支槽在东移的过程中合并加深发展。4日23时,槽前正相对涡度平流开始加大,5日05时低槽经向度进一步加大,低槽中心位势高度低至5760 gpm,槽前正相对涡度平流较23时显著加强,最大为 $46 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$,槽前高空辐散加强,上升运动加强,对应850 hPa低涡迅速发展。“0617”暴雨过程中,高原槽北部为贝加尔湖—河套地区的暖脊,在其东移的过程中,不利于高原槽纵深发展。由图5可见,该过程高原槽经向度明显弱于“0617”暴雨过程,18日05

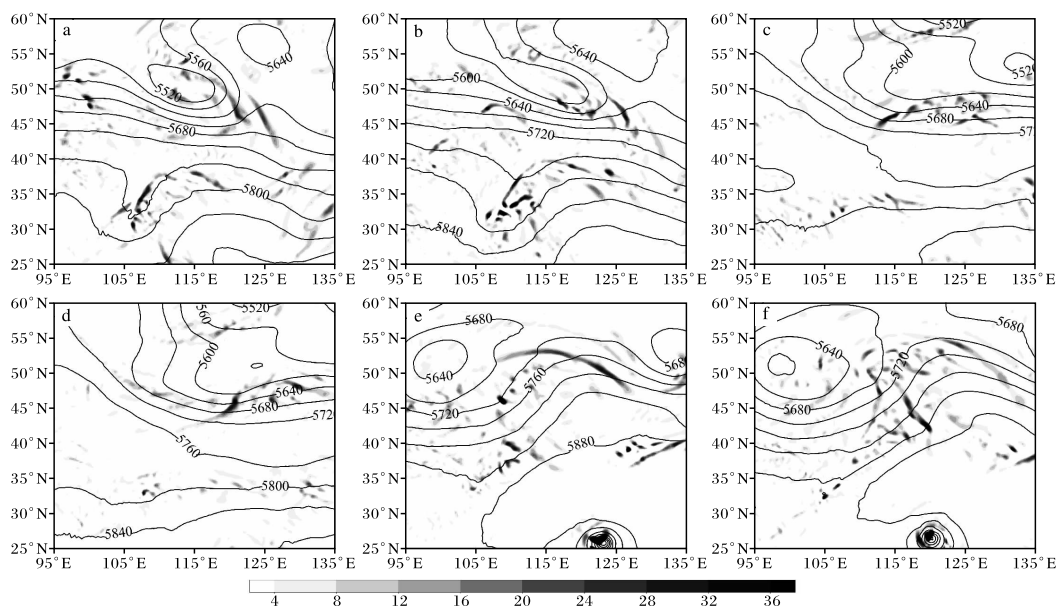


图5 陕西三次暴雨过程500 hPa位势高度场(等值线;单位为gpm)及相对涡度平流(填色图;单位为 10^{-9} s^{-2})演变图(a、b为“0604”暴雨过程次日05时、次日14时;c、d为“0617”暴雨过程次日05时、次日11时;e、f为“0710”暴雨过程23时、次日08时)

时中心位势高度最低为 5 800 gpm, 发展相较“0604”暴雨过程弱, 这可能是“0617”暴雨过程 850 hPa 低涡发展强度较“0604”暴雨过程弱的原因之一。“0710”暴雨过程中, 贝加尔湖冷涡配合南部低槽影响陕西西部、北部地区, 冷涡在东移过程中加强发展, 其南部槽随之加强, 但其强度为三次过程中最弱, 11 日 05 时低槽中心位势高度最低为 5 840 gpm, 11 日白天受副高影响, 低槽迅速减弱。低涡白天加强阶段, “0604”暴雨过程中, 5 日 14—17 时低槽再次加深发展, 17 时低槽中心闭合形成低涡, 中心位势高度为 5 760 gpm, 对应 850 hPa 低涡加强, 3 h 降雨量也随之增强。“0617”暴雨过程中, 18 日白天低槽发展相较缓慢, 11 时槽前正相对涡度平流略有加强, 使得 850 hPa 低涡随之发展, 但较“0604”暴雨过程强度偏弱。“0710”过程中, 11 日白天低槽及槽前正相对涡度平流发展更为缓慢, 几乎无变化。而在 17 时随着台风登陆和高原高压发展, 其与副高、低槽形成鞍形场, 850 hPa 低涡处于该场之中, 这或许是该时段低涡发展的原因之一。

从中低层影响系统的移动速度来看, “0617”暴雨过程系统移动最慢, “0604”暴雨过程系统移动速度最快, 系统长时间的稳定维持, 这也是造成前者 24 h 降水量最大的另一原因。

3.3 低涡发展与低空急流的关系

由 850 hPa 急流强度和低涡中心强度时间演变(图 6)可看出, “0604”暴雨过程和“0617”暴雨过程中, 低空急流呈“双峰”型变化, “0710”暴雨过程中呈“单峰”型变化, 其峰值与低涡发展强度对应较好。以往研究表明, 低空急流具有明显日变化特征, 在夜间更容易加强发展^[15], 这在图 6 中得以验证。在低涡夜间加强阶段, 三次过程中低空急流均有明显发展, 造成其出口区左前方辐合进一步增强, 上空上升运动加强, 为低涡发展提供了有利的动力条件。同时, 急流的发展一方面在其左前方产生水汽通量辐合, 另一方面会输送大量暖湿水汽, 导致大气产生不稳定层结, 为低涡的发展提供有利的热力条件。在低涡白天加强阶段, “0604”暴雨过程和“0617”暴雨过程中, 急流在 14—17 时、11—14 时均有加强, 对应低涡发展。

“0710”暴雨过程中, 14—17 时急流减弱, 而低涡却有所加强, 这或许是受台风登陆影响, 急流不再是影响低涡发展的主要因子。

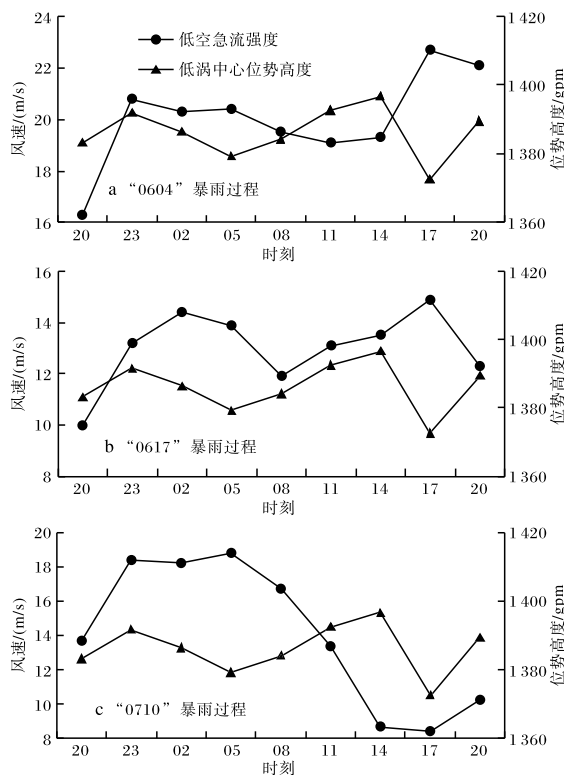


图 6 陕西三次暴雨过程 850 hPa 急流强度、850 hPa 低涡中心位势高度演变

上述分析表明, 尽管三次过程中均有 500 hPa 低槽配合 850 hPa 低涡东移, 但由于 850 hPa 低涡移速、发生发展的差异导致最终强降水峰值、落区、性质的不同。低涡的发展与中层低槽(强度、经向度、槽前相对涡度平流等)、低空急流(强度、位置摆动)的变化密切相关。特别是, 伴随低空急流的日变化, 低涡存在两次加强过程, 导致该时段强降水的产生。因此, 对于此类相似背景下突发性强降水的预报, 应着重关注低层影响系统与中层低槽、低空急流配置的变化, 特别是低层影响系统的阶段性加强时段, 对强降水的临近监测预警有指示作用。

4 客观订正方案设计及检验

结合前文分析, 低层影响系统的阶段性加强对相似背景下陕西低槽强降水的发生时段有一定指示意义, 但对于强降水量级的客观预报还要取决于数值模式。

图 7 给出了 DCOEF、EC、CMA-GFS、SC-MOC 四种客观预报产品对三次暴雨过程预报的落区图。由图可见,虽然四种模式对于这三次暴雨过程均未较好地预报出总降水量以及暴雨落区位置,但不同模式可较为准确地反映暴雨的某些具体特征。“0604”暴雨过程,DCOEF 预报落区明显偏大,EC、CMA-GFS、SCMOC 预报暴雨落区与实况基本一致,CMA-GFS 量级明显偏大。“0617”暴雨过程,四种客观预报产品对暴雨落区位置相较“0604”暴雨过程预报较好,CMA-GFS

预报暴雨落区、强度与实况最为接近。“0710”暴雨过程,EC 模式相较其他三种客观产品预报暴雨落区与实况最为接近。实际业务中,无论是高分辨率区域模式还是经验丰富的业务人员,准确预报出主汛期暴雨天气过程的难度均非常大。近年来,众多气象工作者致力于灾害性天气客观订正预报技术研究取得了众多成果。本文提出了一种简单易行的客观订正方法,即基于 TS 评分的多模式动态融合方法,一定程度上可以提高模式对此类背景下陕西强降水的预报效果。

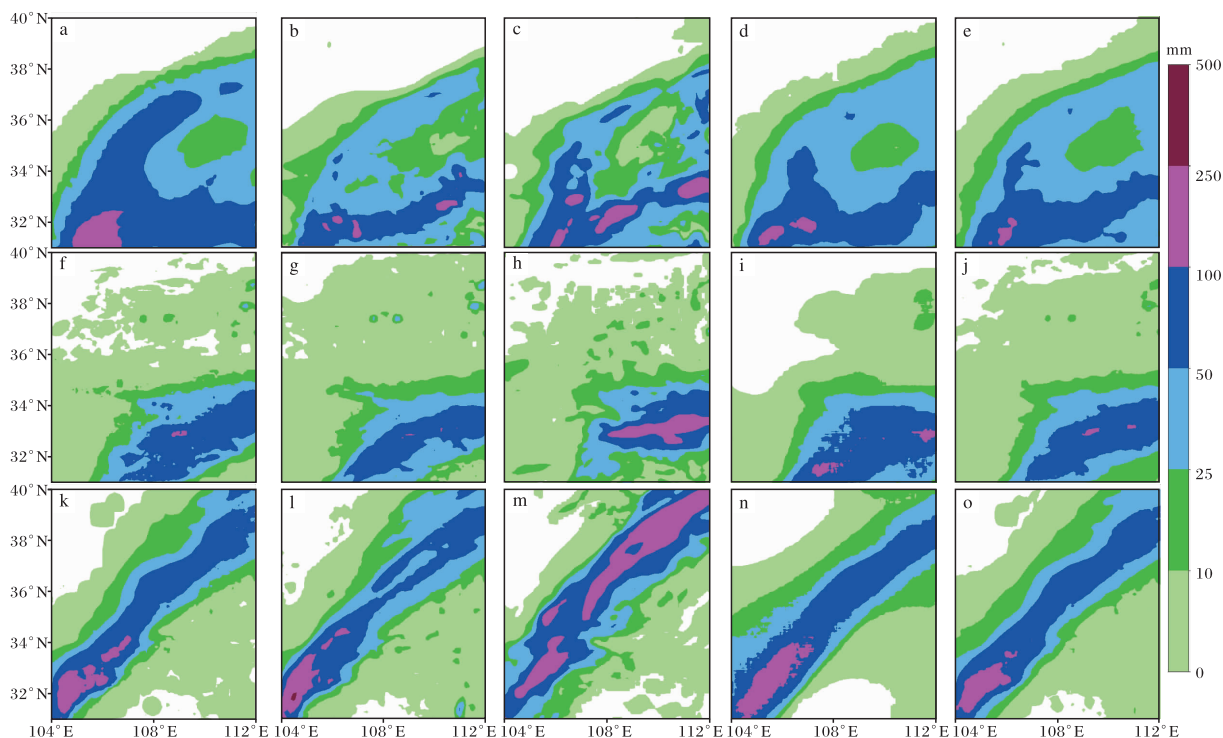


图 7 DCOEF(a;f;k)、EC(b;g;l)、CMA-GFS(c;h;m)、SCMOC(d;h;i)模式及最终融合产品(e;j;o)对陕西三次暴雨过程预报的落区图(a,b,c,d,e为“0604”暴雨过程;f,g,h,i,j为“0617”暴雨过程;k,l,m,n,o为“0710”暴雨过程)

在三次暴雨过程中,采用上述的多模式动态融合方法,对四种客观预报产品进行融合,得到多模式融合产品(blending),基于目前业务常用的检验指标对其进行评分检验(表 1)。“0604”暴雨过程中,对大雨以上量级,融合后产品的 TS、ETS、TSS 评分都相较其他单模式产品有明显提高,BIAS 评分排第三。对暴雨以上量级,融合产品 TS、ETS 评分与 EC 评分基本接近,比其他模式高,TSS 评分比其他模式有明显提高,并有一定正技巧。“0617”暴雨过程中,对大雨以上量级

和暴雨以上量级,融合产品 TS、ETS、TSS 评分均较单模式产品有所提高。“0710”暴雨过程中,对大雨以上量级,融合产品 TS、ETS、TSS 评分较 EC、SCMOC、CMA-GFS 有明显提高,与 DCOEF 基本持平。对暴雨以上量级,融合产品 TS、ETS、TSS 评分与 DCOEF 基本持平,较其他单模式略有提高。“0604”暴雨过程各项检验指标评分最低,“0618”暴雨过程各项检验指标评分最高,表明此类背景下,模式对长历时强降水预报效果较好。另外,采用融合方法后,对“0604”暴雨过程预

表 1 陕西三次暴雨过程在四种模式客观预报产品(EC、DCOEF、SCMOC、CMA-GFS)和多模式融合产品(blending)的评分检验结果

暴雨过程	模式	大雨以上				暴雨以上			
		T_s	T_{SE}	B_{IAS}	T_{SS}	T_s	T_{SE}	B_{IAS}	T_{SS}
“0604” 暴雨过程	Blengding	0.57	0.41	1.57	0.67	0.20	0.16	2.76	0.51
	EC	0.54	0.40	1.15	0.59	0.21	0.17	1.76	0.40
	DCOEF	0.51	0.32	1.78	0.59	0.10	0.06	4.98	0.31
	SCMOC	0.56	0.39	1.65	0.67	0.18	0.14	3.19	0.49
	CMA-GFS	0.55	0.40	1.20	0.60	0.16	0.12	2.82	0.40
“0617” 暴雨过程	Blengding	0.73	0.67	1.10	0.84	0.55	0.51	1.20	0.74
	EC	0.72	0.68	0.99	0.81	0.51	0.48	0.89	0.61
	DCOEF	0.73	0.68	1.08	0.84	0.55	0.52	1.17	0.74
	SCMOC	0.63	0.56	1.23	0.78	0.45	0.41	1.43	0.69
	CMA-GFS	0.59	0.53	0.92	0.67	0.42	0.38	0.99	0.55
“0710” 暴雨过程	Blengding	0.73	0.64	1.19	0.83	0.42	0.35	1.73	0.69
	EC	0.69	0.59	1.17	0.79	0.41	0.34	1.45	0.62
	DCOEF	0.74	0.65	1.13	0.83	0.42	0.35	1.69	0.68
	SCMOC	0.59	0.47	1.29	0.70	0.33	0.28	1.78	0.59
	CMA-GFS	0.63	0.51	1.28	0.74	0.36	0.29	2.12	0.67

报质量提高较多,表明该方法对陕西低槽强降水的预报有一定提高。

5 结论与讨论

本文选取了近年来陕西三次低槽东移背景下强降雨过程,对比分析了强降雨过程的实况差异及影响系统演变特征,总结此类过程预报着眼点。结合多种模式前期预报效果,提出了一种简单的动态融合客观订正方法,检验了该方法在这三次强降雨过程中的预报效果,得出以下结论。

(1)在三次低槽东移背景下的暴雨过程中,“0604”暴雨过程和“0617”暴雨过程强降水主要集中在陕西关中和陕南地区,“0710”暴雨过程强降水主要集中在陕西西部和北部地区。24 h 降水量以“0617”暴雨过程最大,达 160.3mm,其次为“0710”暴雨过程和“0604”暴雨过程。其中,“0604”暴雨过程阶段性强,雨带自西向东移动,移动速度快。“0617”暴雨过程中雨带稳定维持,降水持续时间较长。“0710”暴雨过程中降水持续时间短,单站小时雨强在三次过程中最大,强降水主

要集中在夜间至清晨。

(2)三次暴雨过程均发生在 500 hPa 低槽配合 850 hPa 低涡东移过程中,850 hPa 低涡的结构发展演变及其强度变化的差异导致了三次暴雨落区、强度、主要降水性质的不同。三次暴雨过程中 850 hPa 低涡发展均存在两次加强阶段,即夜间加强阶段和白天加强阶段。低涡夜间加强阶段,500 hPa 低槽前正相对涡度平流和 850 hPa 低空急流均有明显增强,槽前系统性上升运动 and 低空急流左前方辐合上升运动进一步加强,造成低涡夜间加强发展。低涡白天加强阶段,低涡发展不仅与中层正相对涡度平流和低空急流有关,还与鞍型场、台风登陆后环流形势调整有关。

(3)低层关键系统的阶段性加强对相似背景下陕西低槽强降水的发生时段有一定指示作用。基于加权评分的多模式融合强降水订正方法可为陕西低槽强降水的定量预报提供客观参考;但该方法有一定的局限性,未深入考虑模式降水的时间、空间表现性能,仅从业务评分的角度,提出一

种简单易行的订正方法,有待后期深入有效融合多种模式反映的合理预报信息,提高陕西强降水的精准预报能力。

参考文献:

- [1] 杜继稳,张弘,梁生俊,等. 青藏高原东北侧突发性暴雨分析研究与应用[M]. 北京:气象出版社, 2005:234-286.
- [2] 慕建利. 陕西关中强暴雨中尺度对流系统研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2009.
- [3] 毕宝贵,鲍媛媛,李泽椿.“02.6”陕南大暴雨的结构及成因分析[J]. 高原气象,2006,25(1):34-44.
- [4] 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,2007:224-256.
- [5] 刘勇. 急流次级环流对局地持续强风暴天气的作用[J]. 气象科技,2005,33(3):214-217.
- [6] 许新田,李明,陶建玲,等. 陕西 2003 年持续性暴雨高低空急流特征分析[J]. 气象科学,2006,26(6):682-688.
- [7] 白涛,李崇银,王铁,等. 干侵入对陕西“2008.07.21”暴雨过程的影响分析[J]. 高原气象, 2013,32(2):345-356.
- [8] 慕建利,杜继稳,张弘,等. 一次诱发山地灾害突发性暴雨数值模拟及诊断分析[J]. 气象,2005,31(12):36-40.
- [9] 吴启树,韩美,郭弘,等. MOS 温度预报中最优训练期方案[J]. 应用气象学报,2016,27(4):426-434.
- [10] 曹萍萍,康岚,王佳津,等. 基于 ECMWF 模式的四川夏季强降水订正试验[J]. 暴雨灾害,2020,39(1):63-70.
- [11] 周迪,陈静,陈朝平,等. 暴雨集合预报-观测概率匹配订正法在四川盆地的应用研究[J]. 暴雨灾害,2015,34(2):97-104.
- [12] 郑婧,夏侯杰,陈娟,等. 基于 ECMWF 模式的定量降水客观订正方法[J]. 高原气象,2020,39(4): 830-839.
- [13] 赵琳娜,姚梦颖,巩远发,等. 基于贝叶斯模型平均法的“利奇马”台风暴雨预报订正研究[J]. 暴雨灾害,2020,39(5):451-461.
- [14] 吴启树,韩美,刘铭,等. 基于评分最优化的模式降水预报订正算法对比[J]. 应用气象学报,2017, 28(3):306-317.
- [15] 刘鸿波,何明洋,王斌,等. 低空急流的研究进展与展望[J]. 气象学报,2014,72(2):191-206.