

彭力,卢晔,贺瑶,等.西北涡影响下陕西一次强降水天气成因分析[J].陕西气象,2024(5):1-8.

文章编号:1006-4354(2024)05-0001-08

西北涡影响下陕西一次强降水天气成因分析

彭力^{1,2,3},卢晔⁴,贺瑶⁴,倪闻^{1,2}

(1. 铜川市气象局,陕西铜川 727031;2. 陕西省铜川市中草药气象服务研究中心,陕西铜川 727031;

3. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016;

4. 宝鸡市气象局,陕西宝鸡 721006)

摘要:利用常规气象观测资料、FY-4A云图资料、ERA5(0.5°×0.5°)逐小时再分析资料,对2020年8月4日西北涡影响下陕西一次强降水天气进行分析,结果表明:此次强降水雨带位于陕北,强降水主要时段出现在夜间;西北涡前期发展缓慢,后期发展迅速,来自南海台风外围的偏南风向西北涡输送水汽,为暴雨提供了充足水汽和能量供应,中高层辐散抽吸促使西北涡持续发展;西北涡发展东移,低涡强降水产生凝结潜热加热造成西北涡低层减压,低涡上升运动和辐合强度进一步增强;本次强降水天气与低层偏南风急流建立密切相关,4日夜间断北水汽输送、水汽辐合强度较白天更强;西北涡中低层偏南风急流在倾斜爬升中存在着中尺度对称不稳定机制,造成低涡中心附近更强上升运动和气旋式涡度,从而产生强降水;强降水释放的凝结潜热加热促使陕北产生强锋区,锋生进一步加强低涡中心附近上升运动,造成低涡降水强度增强。

关键词:西北涡;台风;非绝热加热率;湿位涡;锋生

中图分类号:P458

文献标识码:A

受到青藏高原地区动力和热力作用影响,高原地区夏季易生成高原涡,高原涡按涡源及性质分为高原涡、西南涡、西北涡,高原涡多数情况下在原地生消,少数东移的高原涡发展加强,造成下游暴雨天气^[1-2]。夏季发展东移的西北涡是触发下游暴雨的主要天气系统之一^[3-4]。气象学者在西北涡东移的环流背景规律特征、发生发展机制等方面开展了大量研究,统计得出西北涡发生发展与低层偏南风气流发展、中高层辐散场特征、近地层加热场以及高原大地形作用密切相关^[5-8];此外,西北涡与台风远距离相互作用,台风外围水汽能量向西北涡持续输送也是西北涡发展增强的重要原因之一^[4]。陕西位于青藏高原以东,东移发展的西北涡常造成陕西夏季暴雨^[9-10]。陕西气象

工作者对西北涡研究发现,近年来陕北多次极端暴雨由西北涡和近海台风共同作用所引起,远距离台风向西北涡输送水汽、能量,改变了西北涡斜压、温湿结构特征,增强了西北涡对流不稳定层结和动力抬升,进一步增大了降水强度^[9-13]。2020年8月4—5日,位于青藏高原东部的西北涡发展东移,在陕北迅速发展加强产生强降水,西北涡东移中受到远距离台风作用、高空槽前正涡度平流及高空急流造成的辐散减压、低涡降水非绝热加热影响,其强度不断加强,西北涡发展不同阶段增强速度并不一致,西北涡不同阶段增强机制是什么?陕北强降水产生原因是什么?本文分不同阶段讨论造成陕北强降水的西北涡发展机制,对产生陕北强降水的热力、动力学特征进行诊断,以期

收稿日期:2023-09-27

作者简介:彭力(1990—),男,汉族,陕西商洛人,学士,工程师,主要从事灾害性天气预报工作。

通信作者:卢晔(1990—),女,汉族,陕西太白人,学士,工程师,主要从事灾害性天气机理研究。

基金项目:秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2023G-22;2023G-1;2023G-3;2023G-2);中国气象局复盘总结专项(FPZJ2024-135)

为陕北此类强降水预报提供参考。

1 降水过程概况及分析

2020年8月4日08时至5日08时,受低涡东移影响,陕西北部自西向东出现一次强降水天气,强降水雨带主要位于榆林南部及延安北部(图1a),共有71站次累计降雨量超过100 mm,171站次累计雨量超过50 mm,最大降雨量出现在延安市子长热寺湾站为164.4 mm;经陕西省气候中心评定,此次陕北区域暴雨综合强度为特强等级,历史排位为1961年以来第2位。从12 h降

雨量的演变(图略)分析来看,强降雨主要时段出现在4日夜间,榆林东南部、延安东北部12 h降雨量达到100 mm,表明了本次西北涡降雨的夜雨特征,这与之前统计的陕西西北涡暴雨特征结论一致^[9];子长热寺湾站逐小时降雨量分布图(图1b)上,4日09时至5日00时小时降雨量在6 mm以下,5日01时开始,小时降水强度逐渐增大,03时小时降雨量达到32.9 mm,表明西北涡夜间降雨具有强的对流性。

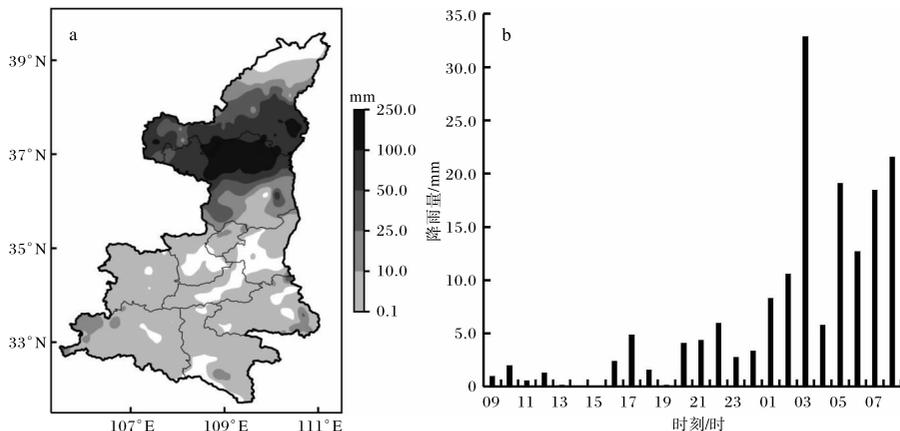


图1 2020-08-04T08—05T08 陕西省降水量分布图(a;审图号为陕S(2021)023号)和子长热寺湾站逐小时降雨量(b)

2 西北涡发展演变特征及环流形势分析

对西北涡发展演变阶段的高、低空环流场特征进行分析。8月2—3日500 hPa西太平洋副热带高压(下简称副高)脊线不断北抬,台风“黑格比”(编号202004)位于东海海面向东北方向移动;3日20时500 hPa高空天气图(图2a)上,我国东北地区受高空冷涡控制,副高控制我国中东部,其脊线位于 32°N ,甘肃东部及陕西西南部受副高外围西南风影响,内蒙古中部至贝加尔湖以南区域受弱脊控制,台风“黑格比”移至台湾东北部,受副高南部东风气流引导自东向西移动;4日04时左右,“黑格比”在浙江沿海登陆,随后向北移动;4日08时至20时,副高进一步发展加强北抬,4日20时(图2b)其脊线移动至 33°N ,588 dagpm线西伸至 110°E ,陕西中南部持续受副高外围西南风影响,河套西部短波槽东移。

700 hPa天气图(图略)上,8月3日08时—

4日08时甘肃南部受副高西侧东南风影响,风速维持在 $8\sim 10\text{ m/s}$,东南风形成的气旋式切变逐渐演变成气旋式低涡环流;4日白天,随着台风“黑格比”登陆转向,副高西伸北抬,河套西部短波槽东移过程中受副高阻挡,短波槽前气压梯度力不断增强,甘肃东部—陕西西部偏南风持续增大;4日20时,西北涡中心位于榆林西部,气旋式环流范围进一步扩大,低涡前部西南风前沿北伸至榆林南部,风速增大到 $16\sim 20\text{ m/s}$;4日夜间,西北涡东移影响陕北,造成区域性大暴雨。

850 hPa,8月3日08时—4日20时,陕西北部受东北地区冷槽后部弱偏北风影响,陕西中南部东南风从 $2\sim 4\text{ m/s}$ 增强至 $6\sim 8\text{ m/s}$;4日20时—5日08时西北涡发展东移,低涡中心东南侧 $10\sim 14\text{ m/s}$ 东南风急流建立,东南风与来自东北低槽后弱偏东风汇合,在陕北北部转为偏东风,并形成西北涡气旋式环流。

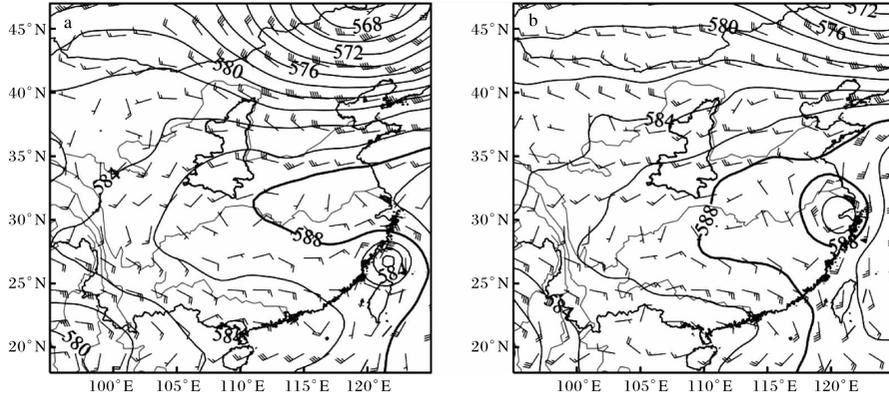


图2 500 hPa 高度场(等值线;单位为 dagpm)及风场(风羽;单位为 m/s)分布
(a 2020-08-03T20, b 2020-08-04T20;审图号为 GS(2020)4619 号)

分析此次西北涡移动路径变化特征(图 3a),西北涡起源于甘肃东南部,3 日 08 时开始,甘肃东南部长时间维持气旋式风切变;3 日 20 时气旋式切变进一步发展加强,逐渐演变成低涡环流;3 日 20 时至 4 日 08 时西北涡北移发展;4 日 08 时至 5 日 08 时西北涡沿偏东北路径移动,途经宁夏、陕北,强度逐渐增大,造成陕西北部大暴雨。从西北涡中心涡度强度演变(图 3b)来看,3 日 20 时之前,西北涡气旋式中心涡度值维持在 $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,涡度强度稳定少变;4 日 08 时开始,西北涡向东北移动过程中强度逐渐增强,4 日 08—20 时中心涡度值从 $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 增加至 $14 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$;

4 日 20 时—5 日 08 时中心值从 $14 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 增加至 $20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,相比 4 日白天,4 日夜間为西北涡迅速增强阶段。

分析降雨区与西北涡中心位置分布,陕北强降雨区域主要位于西北涡东南象限。红外云图(图略)上,4 日白天,西北涡东南象限的层积混合云在陕西北部造成强降水;4 日夜間,西北涡东移迅速增强,西北涡东南象限的对流云发展成中尺度对流云团,造成陕北夜間对流性降水天气。下文将围绕西北涡 4 日白天到夜間两个阶段增强机制及主要降水成因分别展开分析。

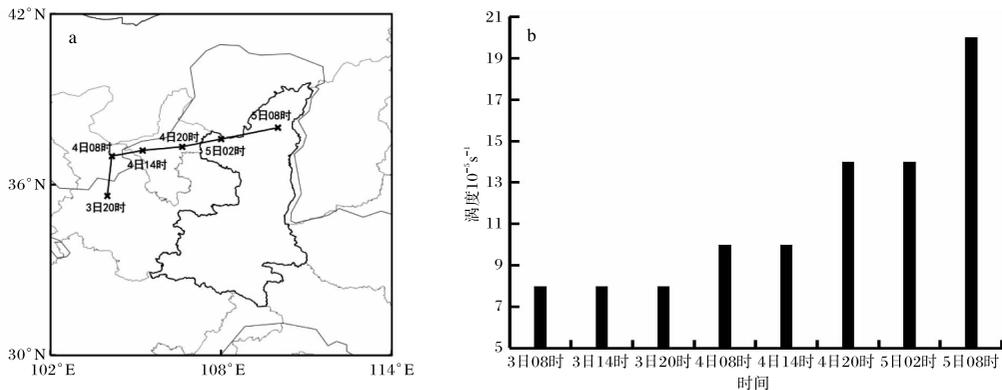


图3 2020-08-03—05 西北涡移动路径(a;×为西北涡中心位置;审图号为 GS(2020)4619 号)和西北涡中心涡度演变特征(b)

3 西北涡增强发展机制

以往台风影响下陕西西北涡暴雨天气研究表明,有台风影响陕西西北涡时,副高外围西南风低空急流将台风外围水汽、能量向西北涡输送,配合

低涡上空高空槽前正涡度平流以及高空急流右侧强辐散,促使西北涡发展加强^[9-10]。此次影响陕西暴雨的西北涡在发展前期与台风“黑格比”外围暖湿气流输送有关。3 日 08 时—4 日 08 时,台风

“黑格比”位于台湾岛北部向西移动,3日20时(图4a)台风北侧偏东风与副高南侧来自南海的偏南风在四川东部汇合,随后北上转向,输送至甘肃南部,偏南暖湿气流带来水汽和能量输送造成西北涡气旋式环流中心不断发展,西北涡低层增湿、增暖,不稳定性增强^[10];4日夜间,台风登陆转向,副高加强北抬;4日08时(图4b),台风外围暖湿气流输送被副高切断,来自副高南侧南海的暖湿气流继续维持,与此同时,河套西部短波槽东移,位于甘肃东部西南风增加至 $12\sim 14\text{ m/s}$;4日08时—20时,河套西部高空槽前正涡度平流以及200 hPa高空急流右侧强辐散中心达到 $(40\sim 60)\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$,强辐散造成西北涡环流进一步发展,西北涡中心涡度增大到 $14\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 。

4日白天至夜间西北涡东移增强,副高南侧南海偏南暖湿气流持续向陕北输送暖湿空气,西

北涡在陕北造成强降水,降水过程大气为饱和状态,采用凝结潜热加热率^[14-15]计算西北涡暴雨区非绝热加情况。4日08—20时,宁夏、陕北西部产生降水,700 hPa、500 hPa凝结潜热加热率维持在 $1\sim 2\text{ K/h}$,降水释放的凝结潜热加热造成西北涡低层减压,西北涡前侧偏南风加大,低层辐合不断加强;4日20时—5日08时,西北涡移经陕北降水强度增强,降水造成的凝结潜热加热率也迅速增强,凝结潜热加热率自低层向高层不断增大;5日05时(图5a、图5b),强降水形成的凝结潜热加热率大值区位于西北涡东南象限,700 hPa、500 hPa凝结潜热加热率分别达到 4 K/h 、 6 K/h ,凝结潜热加热造成西北涡低层减压,低涡前部气压梯度增大,上升运动增强,辐合和气旋式涡度增强。

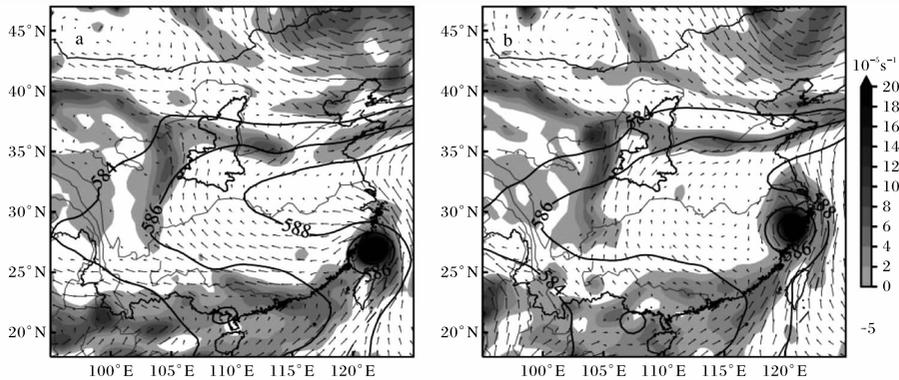


图4 2020年8月500 hPa高度场(等值线;单位为dagpm)和700 hPa风场(风羽;单位为m/s)、涡度场(阴影)分布(a 3日20时,b 4日08时;审图号为GS(2020)4619号)

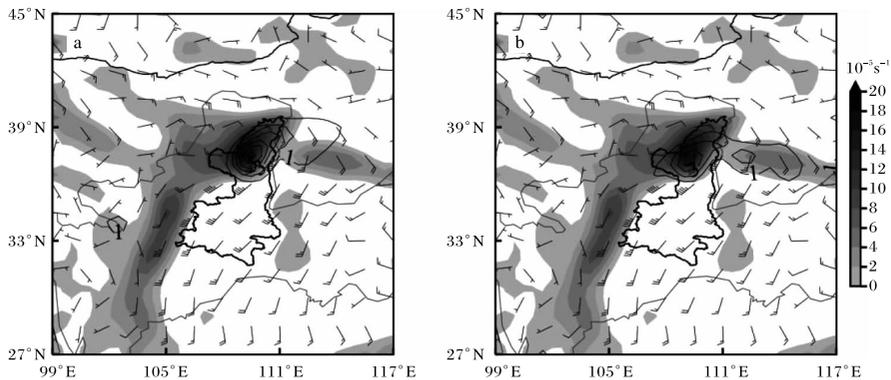


图5 2020-08-05T05 500 hPa(a)、700 hPa(b)凝结潜热加热率(等值线;单位为K/h)和700 hPa风场(风羽;单位为m/s)、涡度场(阴影)分布(审图号为GS(2020)4619号)

综上所述可见,西北涡发展前期,南海及台风外围水汽、能量向西北涡输送,高空槽前正涡度平流以及高空急流右侧强辐散共同作用促使西北涡发展加强;西北涡发展后期,降水形成的凝结潜热加热造成西北涡低层减压,上升运动增强,西北涡辐合和气旋式涡度增强。

4 西北涡暴雨天气成因

4.1 水汽输送条件特征

暴雨的发生与充足的水汽供应和强烈水汽辐合密切相关。此次暴雨发生前期,来自台风北侧的偏东风与副高南侧偏南风持续向陕西输送水汽,这对陕北暴雨产生起到了至关重要的作用。分析3日20时—4日08时偏南风及比湿垂直分布图(图略),3日20时,陕北上空700 hPa南风分量小于4 m/s,比湿值在7~9 g/kg;4日08—20时,台风登陆北上,陕北上空偏南风分量增大到8~10 m/s,对应比湿增大到9~11 g/kg;4日夜夜间,西北涡东移,产生降水,潜热加热造成西北涡低层减压,低涡前部偏南风进一步加大,5日05时,陕北南风分量达到16 m/s,偏南风水汽输送持续,陕北比湿值增大至12 g/kg。

从700 hPa及850 hPa水汽通量、水汽通量散度分布(图略)来看,4日白天,陕北地区700 hPa及850 hPa偏南风带来的水汽输送值分别达到6~10 g/(s·hPa·cm)及8~12 g/(s·hPa·cm),

受西北涡移动方向右前侧水汽辐合影响,陕北西部水汽通量辐合中心达到 $(-200\sim-100)\times 10^{-8}$ g/(s·cm²·hPa);4日夜夜间,西北涡东移,其前侧偏南风急流造成700 hPa及850 hPa水汽输送达到10~20 g/(s·hPa·cm),700 hPa水汽通量散度达到 $(-300\sim-200)\times 10^{-8}$ g/(s·cm²·hPa),850 hPa水汽通量散度达到 $(-500\sim-300)\times 10^{-8}$ g/(s·cm²·hPa)。

进一步分析暴雨区整层水汽输送及辐合情况。3日20时前,陕北上空偏南风较弱,整层水汽通量输送在100~200 kg/(m·s),整层水汽辐合较弱,仅为 $(-20\sim 0)\times 10^{-4}$ kg/(m²·s);4日20时(图6a),陕北偏南风增大,整层水汽通量输送达到200~300 kg/(m·s),由于南风辐合较弱,整层水汽辐合仍然较弱,维持在 $(-20\sim 0)\times 10^{-4}$ kg/(m²·s);5日05时(图6b),西北涡东南侧偏南风急流增强,陕北整层水汽通量输送迅速增大至500~700 kg/(m·s),在西北涡中心及右前侧,水汽辐合增大至 $(-100\sim-50)\times 10^{-4}$ kg/(m²·s)。对比陕北4日白天及夜间水汽输送情况发现,陕北暴雨区水汽输送与偏南风增长密切相关,4日夜夜间相比4日白天水汽输送、水汽辐合更强,降水强度更大;从低层水汽辐合情况来看,850 hPa水汽辐合强度较700 hPa更强,对应强辐合范围也更大。

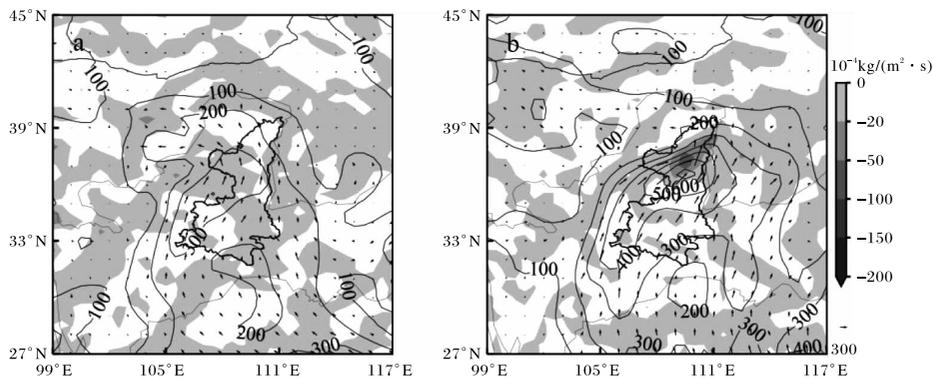


图6 整层水汽通量(风矢量及等值线;单位为 kg/(m·s))及水汽通量散度(阴影)
(a 2020-08-04T20, b 2020-08-05T05;审图号为 GS(2020)4619 号)

4.2 动力条件特征

沿西北涡中心(110°E、38°N)发展最强时刻(5日05时)作散度、涡度、垂直速度剖面(图7a),

并进行分析。西北涡发展最强阶段,主要正涡度区位于500 hPa以下,低涡中心以东、以南区域存在 $(10\sim 15)\times 10^{-5}$ s⁻¹正涡度区,这与5日夜间西

北涡东南侧强偏南风急流形成的强切变涡度密切相关。散度场上,西北涡中心 600 hPa 以下为 $(-10 \sim -5) \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的辐合区,辐合区与低层低涡辐合切变对应,500 hPa 以上为 $(5 \sim 10) \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 辐散区;近地层偏南风、偏东风气流受到近地层地面摩擦辐合影响,近地层辐合中心强度较高层更强^[10],摩擦形成的气流辐合,形成陕北 850 hPa 更强的水汽辐合中心。受到低层辐合、高层辐散

垂直结构影响,西北涡中心垂直速度从近地面扩展到对流层中上层 200 hPa(图 7b),上升气流发展强烈,最大垂直速度达到 $20 \times 10^{-1} \text{ Pa/s}$,中心高度位于 600~400 hPa 之间,西北涡中心偏东、偏南区域强动力抬升,将低层辐合形成的水汽输送到中高层,进一步加强低涡东南侧水汽凝结,强动力抬升为陕北强降水提供了有利动力条件。

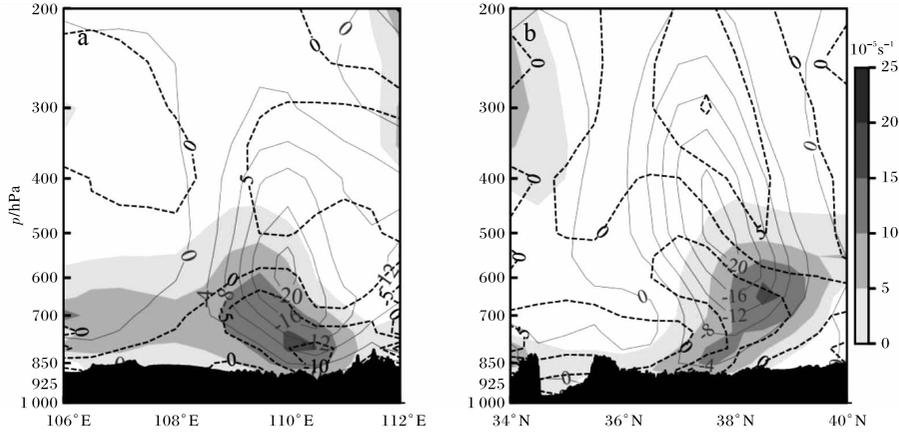


图 7 2020-08-05T05 沿西北涡中心(110°E,38°N)散度(虚线;单位为 10^{-5} s^{-1})、涡度(阴影)以及垂直速度(细实线;单位为 10^{-1} Pa/s)剖面图(a 沿 38°N 纬向剖面, b 沿 110°E 经向剖面;黑色阴影为地形,下同)

此次降水过程中,在西北涡发展最强时刻,垂直上升运动速度达到 $20 \times 10^{-1} \text{ Pa/s}$,相比一般大尺度运动上升速度量级偏大,系统发展演变中可能存在中尺度不稳定机制。利用湿位涡(moist potential vorticity, MPV)结合对流稳定度($\frac{\partial \theta_{sc}}{\partial p} < 0$ 为对流稳定, $\frac{\partial \theta_{sc}}{\partial p} > 0$ 为对流不稳定)及惯性稳定度(绝对涡度 > 0 为惯性稳定)来分析降水过程中不稳定机制,当 $\frac{\partial \theta_{sc}}{\partial p} < 0$ 、绝对涡度 > 0 且 MPV < 0 时,表明降水过程中大气大尺度运动垂直方向上呈对流稳定、水平方向上惯性稳定,但在中尺度倾斜气流爬升方向存在条件性对称不稳定,这对气旋性涡度增强和强降水的产生十分有利^[4,17]。此次西北涡东移发展过程中副高外围偏南风气流持续向陕西输送水汽和能量,对应假相当位温(下简称 θ_{sc})演变图(图略)上,4日 08—20 时,850 hPa 上 37°N 以南陕西中南部 θ_{sc} 达到

352~360 K,37°N 以北陕北 θ_{sc} 达到 336~352 K。4日 20 时,37°N 以南 600 hPa 高度以下, θ_{sc} 随高度减小,大气为对流不稳定,37°N 以北 800 hPa 高度以下 θ_{sc} 随高度减小,为对流不稳定层结,800 hPa 高度以上大气为对流稳定层结;湿位涡、对流稳定度及惯性稳定度空间分布图(图 8a)上,来自副高外围 10 m/s 偏南风在西北涡中心南部倾斜爬升,37°N~40°N 之间,800~300 hPa 绝对涡度 > 0 为惯性稳定区,且满足 MPV < 0 ,表明西北涡中心北侧 800~300 hPa 偏南气流在倾斜爬升中存在条件性对称不稳定机制;5 日夜,副高外围偏南风急流增大,西北涡 37°N 以南,600 hPa 高度以下对流不稳定特征维持,37°N 以北 850 hPa 以上呈对流稳定特征,05 时(图 8b),37°N~40°N 之间,700~300 hPa 绝对涡度 > 0 ,MPV 达到了 $(-0.4 \sim 0) \text{ PVU}$,夜间在 700~300 hPa 同样存在条件性对称不稳定机制。以上分析表明 4 日夜降水过程中,西北涡中心以南 600 hPa 高度以下

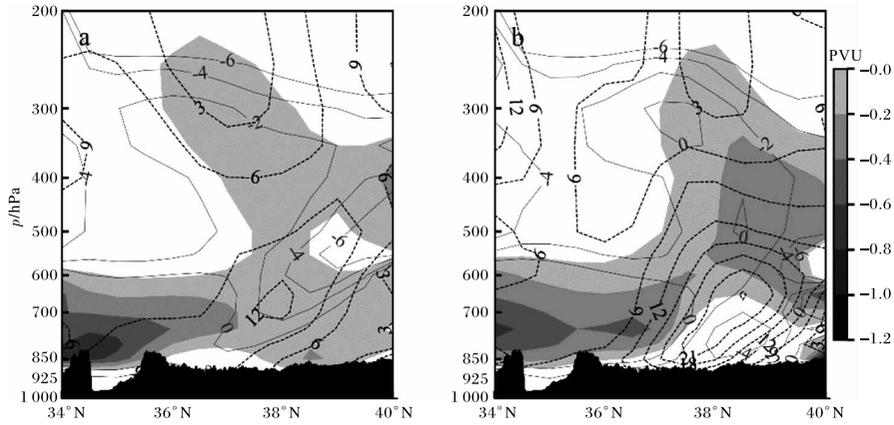


图8 沿西北涡中心(110°E)湿位涡(MPV)(阴影)、绝对涡度(虚线;单位为 10^{-5} s^{-1})、 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}$ (细实线;单位为 $10^{-2} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1}$)剖面图(a 2020-08-04T20, b 2020-08-05T05;

$$1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 / (\text{s} \cdot \text{K} \cdot \text{kg})$$

存在对流不稳定特征,中心附近及以北 700~300 hPa存在条件性对称不稳定机制,这种中尺度不稳定机制,造成低涡中心附近垂直运动加强,气旋性涡度增加,对陕北夜间暴雨起到增幅作用。

4.3 热力条件特征

利用 θ_{se} 和锋生函数(F)分析西北涡强降水过程的热力性质特征,台风外围偏南风暖湿气流输送造成陕北 850 hPa θ_{se} 达到 352~360 K,呈高温高湿性质,偏南急流与东北冷槽后部偏东风在陕北北部交汇,形成 θ_{se} 线密集带。4日锋生演变分析图(图略)上可见,4日白天,陕北北部 850 hPa、

700 hPa(图 9a)均存在 $(0 \sim 20) \times 10^{-10} \text{ K}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 的弱锋区,锋生区与 θ_{se} 线密集带相对应;4日夜间,偏南风急流发展,5日 05 时(图 9b),700 hPa θ_{se} 线的密集带向北推进至陕北北部,陕北北部锋生强度为 $(0 \sim 40) \times 10^{-10} \text{ K}/(\text{m} \cdot \text{s})$,在西北涡中心南部为强锋生中心,强度达到了 $(80 \sim 100) \times 10^{-10} \text{ K}/(\text{m} \cdot \text{s})$,强锋生中心的形成与夜间低涡右前侧强降水释放的凝结潜热加热密切相关;强锋生进一步加强低涡中心附近上升运动,造成降水强度增强。

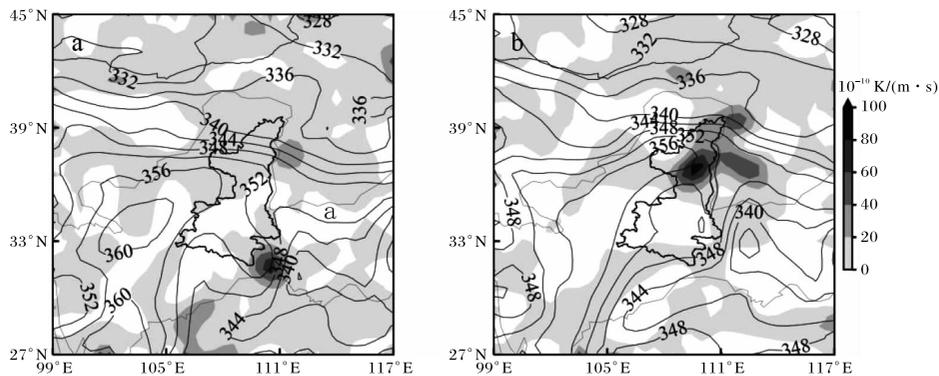


图9 700 hPa 假相当位温(等值线;单位为 K)及锋生函数(阴影)分布
(a 2020-08-04T20, b 2020-08-05T05;审图号为 GS(2020)4619 号)

5 结论

(1)此次陕北强降水天气主要由西北涡东移加强影响所致,西风带低槽、低涡切变线、低空急

流是产生强降水的主要影响系统。强降水雨带主要位于榆林南部及延安北部;强降水主要时段出现在夜间,夜间降水具有明显对流性质。

(2)西北涡前期发展缓慢,4日白天到夜间强度迅速发展增强;西北涡发展前期,来自南海偏南风与台风外围偏东风向西北涡输送水汽、能量,配合中高层高空槽前正涡度平流以及高空急流形成强辐散抽吸促使西北涡发展;西北涡发展后期,低涡强降水产生凝结潜热加热造成西北涡低层减压,上升运动和辐合强度进一步增强。

(3)西北涡暴雨的水汽输送与低层偏南风急流建立密切相关,4日夜間水汽输送、水汽辐合强度较4日白天更强,造成夜间降水强度更大;受低层低涡切变和近地层摩擦辐合影响,陕北近地面850 hPa水汽辐合强度较700 hPa更强,水汽辐合范围也更大。

(4)西北涡垂直结构分析发现,低涡中心东南象限从低层到对流层中上层存在强斜上升气流,中中层偏南风急流在倾斜爬升中存在着中尺度对称不稳定,造成夜间更强的上升运动。

(5)4日白天,副高外围偏南暖湿气流与东北冷槽后偏东风在陕北形成弱锋生区,4日夜間,强降水释放的凝结潜热加热在西北涡东南侧形成强锋生区,锋生进一步加强了低涡中心附近上升运动,造成降水强度增强。

参考文献:

- [1] 李江萍,王式功,孙国武. 高原低涡研究的回顾与展望[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2012,48(4):53-60+71.
- [2] 刘晓冉,李国平. 青藏高原低涡研究的回顾与展望[J]. 干旱气象,2006,24(1):60-66.
- [3] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 4版. 北京:气象出版社,2007:344-345.
- [4] 侯书勋,张婉莹,陈震,等. 一次东移西北涡暴雨过程的诊断分析[J]. 气象与环境学报,2018,34(5):9-15.
- [5] 缪强,刘波,袁立新. 青藏高原天气系统与背风坡浅薄天气系统耦合相互作用的特征分析[J]. 四川气象,1999,19(3):18-22.
- [6] 荣涛. 柴达木低涡特征及其预报[J]. 干旱气象,2004,22(3):26-31.
- [7] 丁洽英,吕君宁. 一次西北涡生成移动过程的数值试验[J]. 南京气象学院学报,1993,16(2):226-232.
- [8] 陆倩,付娇,胡赛安. 承德市一次西北涡暴雨成因分析[J]. 内蒙古气象,2016(2):23-26.
- [9] 彭力,赵强,乔丹杨,等. 有无台风影响下陕西西北涡暴雨特征对比分析[J]. 干旱气象,2022,40(6):981-992.
- [10] 彭力,徐浩天,刘嘉慧敏,等. 西北涡作用下陕西一次强降水过程成因分析[J]. 陕西气象,2020(5):1-5.
- [11] 马晓华,马青,屈丽玮,等. 低涡影响下的西北地区东部暴雨两个例分析[J]. 陕西气象,2021(4):1-8.
- [12] 李明,高维英,王兴慧. 西北涡和登陆台风共同影响的一次暴雨过程分析[J]. 陕西气象,2016(5):1-6.
- [13] 李晓利,侯柯然,蒋伊蓉,等. 一次远距离台风影响的陕北区域性暴雨成因分析[J]. 陕西气象,2022(5):1-6.
- [14] 张雅乐,俞小鼎. 黄河气旋暴雨过程发展演变成因分析[J]. 高原气象,2021,40(1):74-84.
- [15] 郭大梅,潘留杰,李明娟,等. 关中北部一次暴雨水汽条件及不稳定分析[J]. 高原气象,2022,41(6):1481-1491.
- [16] 孙继松,戴建华,何立富,等. 强对流天气预报的基本原理与技术方法[M]. 北京:气象出版社,2014:27.
- [17] 冯丽莎,宋攀,郑飞,等. 2016年初冬河南区域暴雪过程诊断分析[J]. 大气科学,2020,44(1):13-26.