

张建康,刘慧敏,康磊,等. 陕西黄土高原短时强降水时空分布及环流特征[J]. 陕西气象,2021(2):17-23.

文章编号:1006-4354(2021)02-0017-07

陕西黄土高原短时强降水时空分布及环流特征

张建康¹,刘慧敏¹,康磊¹,胡若昕²

(1. 榆林市气象局,陕西榆林 719000;2. 南京信息工程大学,南京 210044)

摘要:利用2004—2018年陕西榆林、延安市所辖25个国家气象站逐小时降水量及年降水量,分析了陕西黄土高原短时强降水的时空分布特征和雨强特点。结果表明:(1)短时强降水最早出现在5月上旬,最晚在10月中旬,6月下旬至8月下旬是集中出现时段,占总频次的89%,其中7月下旬出现最多;短时强降水出现频次和日数的年代际变化呈阶梯上升趋势,并有较大的年际差异,有3 a左右的周期变化。(2)短时强降水以单站和局地强降水居多,单站强降水占短时强降水总日数的64%,局地强降水占22%。(3)短时强降水的日变化表现为17时最多,10时最少,下午(14—19时)为高发时段;大多数短时强降水时间尺度为1 h以内,占总频次的92%;雨强以20~39.9 mm/h最多,占总频次的93%,雨强 ≥ 50 mm/h的极端强降水偶有出现。(4)短时强降水的空间分布有2个高中心,分别是无定河流域和洛河流域,无定河流域的吴堡雨强最大达73.5 mm/h。(5)多强降水年(强年)和少强降水年(弱年)的环流形势对比发现,强年500 hPa副高偏强,584 dagpm线在黄土高原形成槽区,中高纬度经向热力差异较大,200 hPa急流偏强,700 hPa南支气流偏强,西南和东南两条水汽通道到达陕西黄土高原, $\Delta\theta_{se}(850-500)$ 达到10~12℃,而弱年上述特征不明显。

关键词:短时强降水;时空分布;最大雨强;黄土高原

中图分类号:P426.6

文献标识码:A

陕西黄土高原位于黄土高原与毛乌素沙漠的过渡地带,属温带半干旱季风气候区,海拔高度为800~1 500 m,包括陕西省榆林、延安两市25个县市区,境内北部是风沙草滩区、中部是丘陵沟壑区、南部是台塬区,分别代表了陕西黄土高原不同地貌。陕西黄土高原夏季强对流天气频发,局地强降水引发城市内涝、山洪暴发,损毁房舍、道路、农田、堤坝等基础设施,常造成重大经济损失,是水土流失最为严重和生态环境最脆弱的地区之一。20世纪70年代,榆林市与内蒙古自治区交界处曾出现过日降水量1 400 mm的极端暴雨^[1]。2002年7月4—5日子长县连续2 d大暴雨,1 h最大降水量达到81.3 mm。2012年7月

15日00—03时,绥德县义合、满堂川两个乡镇3 h降水量超过100 mm。2012年7月27—28日,佳县降大暴雨,连续2 d累计雨量达279.2 mm,其中27日降水量221.9 mm,是榆林市有气象观测记录以来最大的日降水量,1 h最大降水量达到48.5 mm。2015年7月18日16:01—17:40子洲县突发强对流天气,100 min降雨量达到114.0 mm,短时大暴雨引起山洪暴发,1人被水冲走身亡;2017年7月23日16—19时,榆林市区突发短时强降水,16—17日降水量达64.8 mm,2017年7月25日夜間,榆林市南部大理河、无定河流域发生区域性特大暴雨,子洲县25日22时和26日02时,1 h最大降水量分别达41.0和52.0 mm。持

收稿日期:2020-06-12

作者简介:张建康(1989—),男,汉族,陕西佳县人,学士,工程师,从事天气预报预测工作。

通信作者:刘慧敏(1967—),女,汉族,陕西佳县人,学士,高工,从事天气预报预测工作。

基金项目:中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-076);榆林市气象局面上课题(2019Y-3)

续数小时强降水使得子洲县遭受了多年以来最严重的暴雨洪涝灾害^[2-7]。

关于短时强降水的时空分布特征研究,白志娜等^[8]分析发现辽宁省强降水主要集中在7月下旬—8月上旬,短时强降水以20~40 mm/h为主。孟利霞等^[9]发现甘肃省短时强降水主要出现在5—9月,其中7—8月是一年中出现最多的月份,其次是6月。强降水主要发生在午后至前半夜,出现时段集中在16—00时,17时前后是短时强降水天气高发时段。王国荣等^[10]分析北京地区的短时强降水发现城区是短时强降水的高发区,短时强降水维持时间主要在20~35 min,过程总降水量为20~30 mm。钟一丹等^[11]分析北京1 h最大降水量的变化认为,城市化快速发展改变了地表热通量和热传递,是城区出现极端降水的诱因之一。李萍云等^[12]分析认为陕西短时强降水主要发生在午后到夜间,日变化呈单峰分布,强降水频次峰值出现在17—00时,但极值雨强易出现在22—00时。郑小华等^[13]发现全球变暖背景下,陕西极端降水的时空分布特征发生明显变化,年最大降水量和强降水发生频次均呈增加趋势,并分别在20世纪70年代中期和80年代中期发生突变,陕北的强降水发生频次增加明显。王玉龙和张子涵^[14]分析东营地区产生短时强降水的天气系统可分为西风槽型、副高边缘型、切变线型、高空冷涡型、台风型等5种类型。上述研究成果总结了国内不同地区短时强降水的分布特征,关于陕西黄土高原短时强降水时空分布及环流特征的研究并不多见。本文利用2004—2018年榆林市和延安市25个国家自动气象站5—10月逐小时降水观测数据和年降水量,分析陕西黄土高原短时强降水的时空分布特征和雨强特点,总结多强降水年与少强降水年的环流特征,为做好短时强降水的气候预测提供参考依据。

1 资料与方法

所用资料来自全国综合气象信息共享平台(CIMISS)提供的陕西省榆林市、延安市所辖25个县级气象站2004—2018年的逐日(20—20时)逐小时雨量观测数据。根据《全国短时临近预报业务规定》,短时强降水定义为1 h降水量 \geq

20 mm的降水。根据俞小鼎^[15]等人提出的标准,1 h降水量 ≥ 50 mm以上的降水,称为极端强对流暴雨。按照此标准对小时雨量进行了筛选,提取雨强达到20 mm/h以上的全部数据,并将雨强分为两级,雨强达到20 mm/h为短时强降水,雨强达到50 mm/h为极端强降水。

统计方法参照《陕西省短期天气预报技术手册》规定^[16]及有关文献^[17]标准,并考虑强降水主要表现为局地性,且陕西黄土高原气象站网稀疏,站点相距近百公里,按同日强降水出现的台站数量,将强降水的发生范围划分为4种类型,即单站强降水、强降水站数/总站数 $< 10\%$ 为局地强降水、强降水站数/总站数在 $10\% \sim 30\%$ 为小范围强降水,强降水站数/总站数 $\geq 30\%$ 为区域性强降水。具体如下:同日内只有1站出现强降水,统计为单站强降水,2站同日出现强降水,统计为局地强降水,3~4站同日出现强降水,统计为小范围强降水,5站以上同日出现强降水,统计为区域性强降水。只要有一站出现短时强降水,统计为一个强降水日,一天中多次多站出现强降水,则强降水频次累加统计。如某日某站出现1次强降水,则统计为1次强降水和1个强降水日;如某日2站同时出现强降水,则统计为1个强降水日,2次强降水;再如某日两站同时出现强降水,且一站只出现1个时次,另一站出现2个时次,则统计为1个强降水日,3次强降水。其余以此类推。

2 短时强降水的时空分布

2.1 强降水频次的时间分布

表1为2004—2018年陕西黄土高原25个国家自动气象站短时强降水出现总频次及占比。由表1可知,陕西黄土高原2004—2018年共出现短时强降水386次,出现在5月上旬到10月中旬。5月上旬共3次,占总频次的1%。6月上旬短时强降水开始逐渐增多,6月下旬到8月下旬是集中出现时段,占总频次的89%。其中,7月下旬最多,共出现106次,占总频次的27%。9月上旬起,短时强降水明显减少,但仍有出现;9月下旬之后偶有出现,年均不足1次;最晚出现在10月中旬,15年中仅出现1次。短时强降水频次的年际分布显示,2013年最多为52次,2004年最少为

8次,年际差异较大。

陕西黄土高原短时强降水的发生季节与大气环流和季风气候有关^[18]。5月夏季风建立,输送到陕西黄土高原的水汽增多,对流开始发展;7—8

月西太平洋副热带高压(以下简称副高)北抬到黄河流域,陕西黄土高原处于高能高湿的大气环境之中,对流最为强盛,造成的降水强度最大;9月之后副高南退,对流减弱,短时强降水迅速减少。

表1 2014—2018年陕西黄土高原25个国家自动气象站短时强降水频次旬月分布

时段	5月			6月			7月			8月			9月			10月		合计
	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	
强降水频次/次	3	0	2	8	9	22	49	55	106	43	45	25	8	7	3	0	1	386
占比/%	1	0	1	2	2	6	13	14	27	11	12	6	2	2	1	0	0	100

2.2 短时强降水出现范围和年代际分布

表2为2004—2015年陕西黄土高原短时强降水出现日数及范围统计表。由表2可知短时强降水的出现范围以单站强降水和局地强降水居多,其中单站强降水共出现136d,占短时强降水总日数的64%,局地强降水出现47d,占22%,区域性强降水出现最少,仅有4d,占2%。范围最大的区域强降水出现在2017年7月26日,无定河流域绥德、子洲为中心的9个县气象站同一天出现短时强降水。2004—2018年短时强降水共出现213d,最多年是2013年24d,最少是2004年5d,有3a左右的周期变化。年际变化表明(图略),强降水出现频次和日数呈阶梯上升趋势:2004—2008年最多年只有15d(2007年)、30次(2006年);2009—2018年,每年都大于10d、15次,其中4a超过20d、32次(2010、2013、2016、2018年)。短时强降水出现日数和频次增多与陕西黄土高原向暖湿气候趋势转变有关。郑小华^[13]在分析陕西极端降水的时空特征中有类似的结论。

表2 2004—2018年陕西黄土高原短时强降水出现日数及范围统计表

强降水范围	单站	局地	小范围	区域	合计
出现日数/d	136	47	26	4	213
占比/%	64	22	12	2	100

图1为2004—2018年陕西黄土高原短时强降水频次及年雨量距平百分率。由图1可知,短时强降水频次年际差异较大,其年际变化幅度明

显大于年雨量的变化。短时强降水与年雨量之间的相关系数达到0.71,通过了0.01的显著性检验,说明短时强降水和年雨量之间有显著的正相关关系。15a中有10a是正相关,年雨量偏多的年份短时强降水频次也偏多,年雨量偏少的年份短时强降水频次也偏少。有5a是年雨量偏多,但强降水频次偏少。二者相关关系表明,短时强降水对年雨量的贡献较大,典型代表年是2013年,短时强降水频次最多,年雨量也最大。

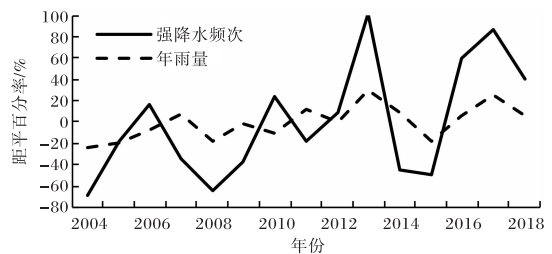


图1 2004—2018年陕西黄土高原短时强降水频次及年雨量的距平百分率

2.3 短时强降水的日变化

图2为2004—2018年陕西黄土高原短时强降水频次的日变化(北京时),可以看出各个时段均有出现,17时最多(38次),10时最少(4次)。将日变化分为上午(08—13时)、下午(14—19时)、前半夜(20—01时)、后半夜(02—07时)四个时段分别统计。下午最多共143次,占短时强降水总频次的37%;前半夜共99次,占26%;后半夜共91次,占24%;上午最少,共出现52次,占13%。短时强降水多出现在下午和夜间,与强对流易发生在午后和夜间是一致的。

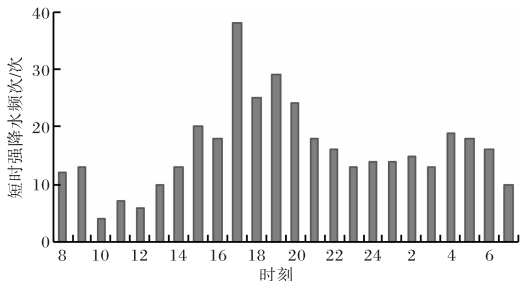


图 2 2004—2018 年陕西黄土高原短时强降水频次的日变化

2.4 短时强降水的空间分布

图 3 是 2014—2018 年陕西黄土高原短时强降水频次及最大雨强的空间分布。由图 3 可见, 短时强降水频次空间分布极不均匀, 东部多于西部, 南部多于北部, 有 3 个高中心, 分别是吴堡、子长和富县, 吴堡最多, 年均 1.7 次, 富县和子长年均 1.3~1.5 次。短时强降水频次较少的是北部的府谷和西部的安塞、吴起、靖边, 年均不足 1 次。分析 3 个高值中心所处的位置可以看出, 短时强降水高值区位于无定河流域(榆阳、子洲、子长、吴堡)和洛河流域(志丹、富县、黄陵)。由图 3 还可看出, 最大小时雨量达 50 mm 以上的极端强降水有 3 个区域, 分别位于吴堡及其以南的黄河沿线, 无定河流域的榆阳、横山、子洲, 以及洛河流域的志丹、甘泉、黄陵。最大雨强中心位于吴堡, 达 73.5 mm/h。北部的府谷和西部的吴起、安塞最大雨强小于 40 mm/h。短时强降水频次大值区与最大小时雨强的大值区有一定的对应关系, 但不完全重合。

2.5 短时强降水雨量和持续时间

以 10 mm 为递增区间分段统计 2004—2018 年陕西黄土高原不同量级短时强降水频次及占比(表略), 发现陕西黄土高原短时强降水的小时雨强以 20.0~39.9 mm/h 为主, 15 a 中共出现 354 次, 占短时强降水总频次的 93%, 这一特点与辽宁省的短时强降水特征^[8]一致。雨强 ≥ 40 mm/h 的短时强降水频次较少。雨强 ≥ 50 mm/h 的极端强降水, 量级达到 50~80 mm/h, 出现频次极低, 15 a 里共出现 11 次, 仅占 2%, 年均出现 0.7 次, 这一特点与甘肃省短时强降水的特征^[9]接近, 但极端强降水出现频次高于甘肃(0.3 次/a)。

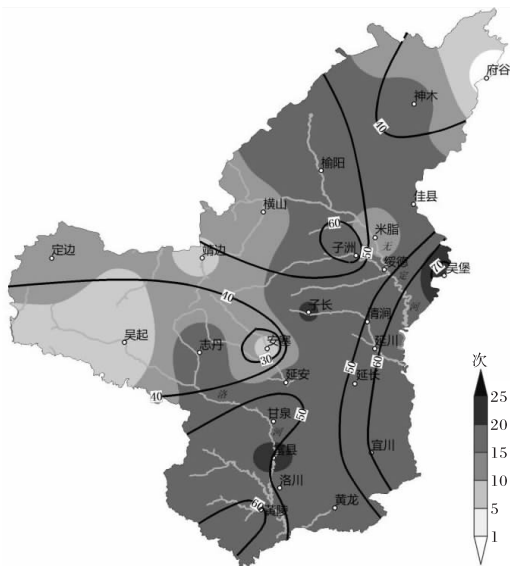


图 3 2004—2018 年陕西黄土高原短时强降水频次(阴影)和最大小时雨强(等值线, 单位为 mm/h)的空间分布

分类统计单站短时强降水持续时间(表 3)发现: 持续 1 h 的共 326 次, 占短时强降水总频次的 92%; 持续 2 h 的出现 21 次, 占 6%; 最长持续 3 h, 出现 6 次, 占 2%。可以看出, 短时强降水持续时间大多在 1 h 以内, 表现出短历时的特点, 与北京地区短时强降水一般持续 20~35 min 的特点^[10]比较接近。

表 3 陕西黄土高原不同持续时间短时强降水频次及占比

持续时间/h	1	2	3	合计
短时强降水频次/次	326	21	6	353
占比/%	92	6	2	100

3 多强降水年和少强降水年的环流特征对比

2004—2018 年陕西黄土高原强降水主要出现在 7 月, 而且短时强降水频次及雨强与大尺度环境场有关^[19-20]。选择全年强降水频次距平百分率大于 35% 和小于 35% 的年份作为多强降水年和少强降水年的典型年, 按此标准多强降水年有 4 a, 即 2013、2016、2017、2018 年, 简称为强年。强降水少年有 6 a, 即 2004、2007、2008、2009、2014、2015 年, 简称为弱年。从这些典型年里提取 7 月 200 hPa、500 hPa、700 hPa、850 hPa 的平均位势高度、风场和温度场, 以及假相当位温和水

汽通量散度等特征量,对不同位势高度层的环流特点和能量条件进行强弱年的比较,总结强弱年的主要差异。

3.1 500 hPa 环流形势

从强年7月500 hPa平均高度场(图4a)可看出,副高588 dagpm线位于120°E附近,西脊点位于30°N,比平均气候态(27°N,124°E)偏西偏北,西风带30°N~45°N为纬向气流和>20%的正距平区,584 dagpm线在陕西黄土高原37.5°N形成槽区。温度场(图略)上,30°N~50°N陕西黄土高原到华北地区升温显著,正距平达到2℃,贝湖西北侧为负距平达-1.2℃,经向冷热差异增大。

从弱年7月500 hPa高度场(图4b)可看出,

副高588 dagpm线接近气候态,西风带30°N~50°N呈西高东低的经向型环流,陕西黄土高原处于贝湖高脊区前侧,为弱的正距平区,584 dagpm线位于黄河流域以南,槽区位于32°N。温度场(图略)上,30°N~50°N中国大陆范围内,新疆为弱的正距平0.8℃,河套及以东为负距平-0.4℃,冷热差异小。

强弱年的主要差异:588 dagpm线的位置强年偏北偏西,584 dagpm线槽区的位置强年位于陕西黄土高原,弱年位于黄河以南;强年陕西黄土高原及华北地区平均高度场为>20%的正距平区,西风带强年为平直气流,多波动,有利于降水天气,弱年为西高东低形势,不利于产生降水天气。

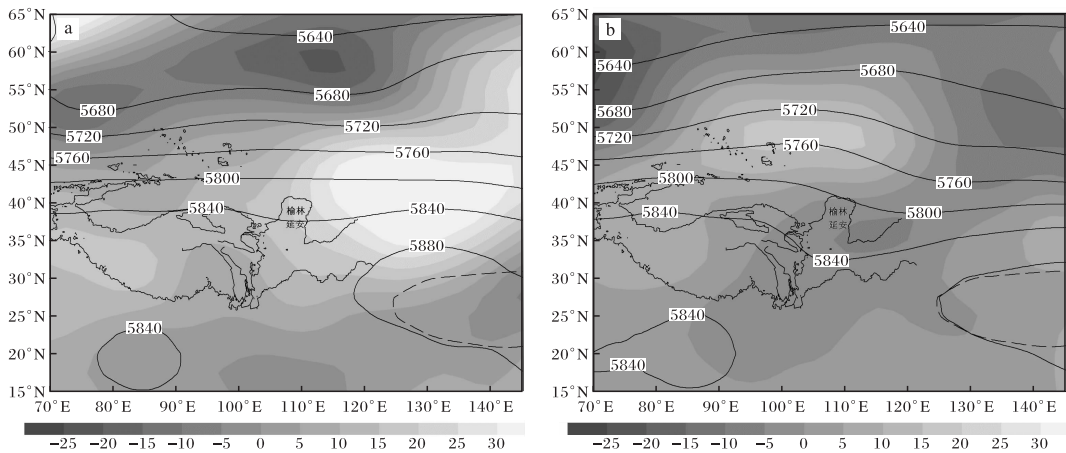


图4 陕西黄土高原短时强降水强年(a)与弱年(b)7月500 hPa平均位势高度场对比
(黑色实线为高度场,阴影为距平,单位为gpm;虚线为气候态5880 gpm线)

3.2 高空急流与低层辐合

分析强年7月200 hPa平均环流(图5a)可见,强年高空急流位于38°N~45°N,76°E~102°E之间(图中阴影区),东西长26经距,南北宽7纬距,陕西黄土高原处于急流右前侧的强辐散区37.5°N(图中圆圈);而弱年(图5b)高空急流位于40°N~45°N,位于84°E~96°E之间,东西长12经距,南北宽5纬距,水平尺度远小于强年,急流前侧的辐散区南移到35°N附近。分析强年低空700 hPa风场及水汽通量散度(图5c)可见,陕西黄土高原有较强的偏南气流,平均风速>4 m/s。水汽通量辐合区位于陕西黄土高原的东侧,水汽输送通过孟加拉湾和南海两支偏南气流(图中箭头位置),由青藏高原南侧吹向东北的西南风和副

高边缘的偏南风越过长江到达陕西。700 hPa偏南气流与高空急流右前侧的辐散区形成垂直叠置,容易形成高低空急流的耦合。由图5d可知,弱年到达陕西黄土高原的偏南风较弱,风速<4 m/s,水汽辐合区同样位于陕西黄土高原的东侧,但辐合值偏小,风场输送(图中箭头位置)仅到达长江流域,动力条件和水汽条件均不利于陕西黄土高原产生强降水。

3.3 边界层气温和不稳定能量

短时强降水多为对流系统,近地层高能高湿有利于对流产生。陕西黄土高原海拔高度800~1400 m,接近850 hPa平均高度,因此用850 hPa温度和假相当位温能够反映近地层的热量和能量条件。强年850 hPa由青藏高原向陕西黄土高原

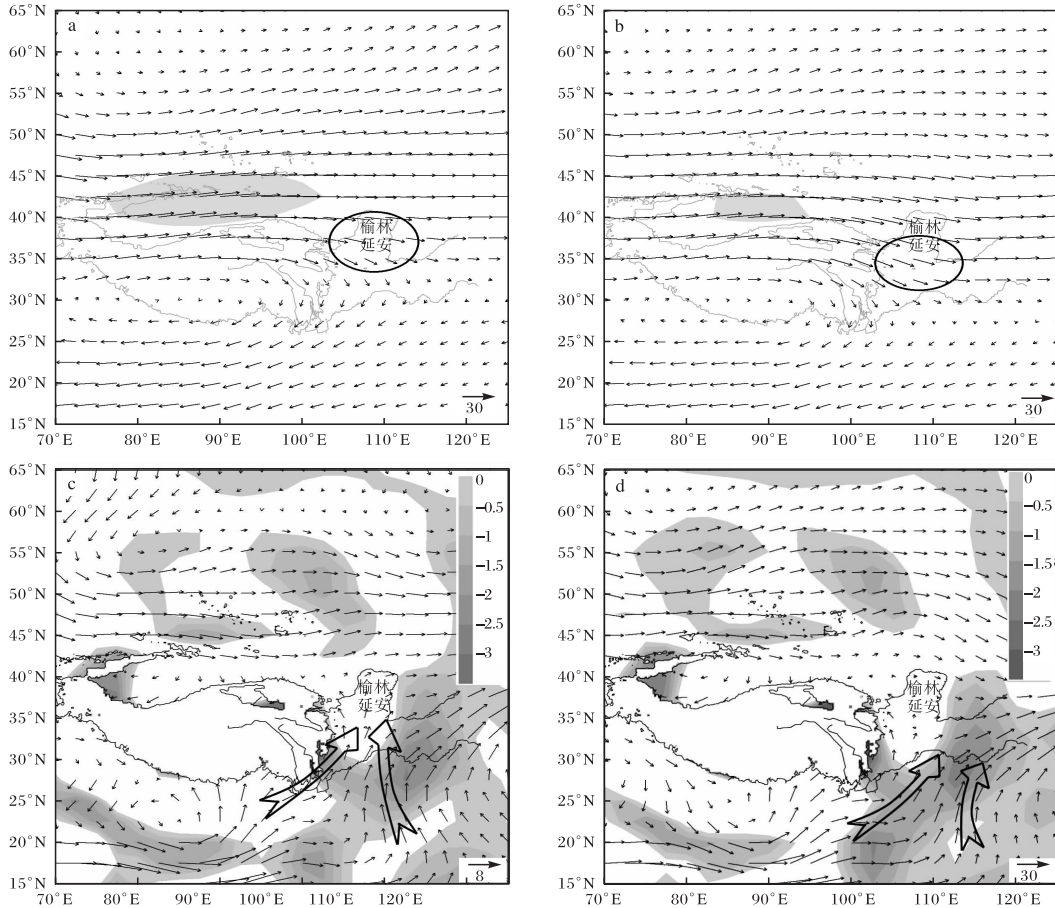


图5 陕西黄土高原短时强降水强年(a)弱年(b)7月200 hPa风场(箭头,单位为m/s;圆圈为强辐散区;阴影区为高空急流)和强年(c)弱年(d)7月700 hPa风场(箭头,单位为m/s;双箭头为偏南气流)及水汽通量散度(阴影为辐合区,单位为 $10^{-7} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$)

伸出 26°C 的暖脊。弱年850 hPa青藏高原伸向陕西黄土高原的暖平流较弱,增温不明显。假相当位温强弱年略有差异,强年假相当位温 $>320 \text{ K}$ 覆盖陕北大部分地区。弱年 $>320 \text{ K}$ 区域位于陕西关中及以南地区。850 hPa与500 hPa的假相当位温差($\Delta\theta_{\text{sec}(850-500)}$)能够反映大气层结的潜在不稳定,850 hPa与500 hPa的假相当位温差较大时,表征大气具有下暖上冷的不稳定层结,有利于对流的发展,从而易出现短时强降水。强年陕西黄土高原 $\Delta\theta_{\text{sec}(850-500)}$ 达到 $10\sim 12^\circ\text{C}$,弱年为 $8\sim 10^\circ\text{C}$ 。

4 结论与讨论

(1)陕北黄土高原2004—2018年共出现短时强降水386次。短时强降水最早出现在5月上旬,最晚在10月中旬,6月下旬至8月下旬为集中出现时段,短时强降水频次占总频次的89%。其中7月下旬出现最多,占总频次的27%。年际

分布极不均匀,2013年最多,出现52次,2004年最少,仅出现8次。短时强降水频次和日数年代际变化呈阶梯上升趋势,并有较大的年际差异,短时强降水强弱年有3a左右的周期变化。

(2)短时强降水以单站强降水和局地强降水居多,单站强降水共出现133d,占短时强降水总日数的64%,局地强降水出现47d,占22%。短时强降水的年际变化幅度大于年雨量的年际变化。

(3)短时强降水各时次均有出现,17时最多,10时最少,将一天分为上午、下午、夜间三个时段,下午(14—19时)为高发时段,占短时强降水总频次的37%,前半夜(20—01时)和后半夜(02—07时)次之,分别占26%和24%,上午(08—13时)最少,占13%。日变化的特征与全国大部分地方相似,与午后和夜间易出现强对流天

气一致。大多数短时强降水时间尺度为 1 h 以内,占总频次的 92%;雨强以 20~39.9 mm/h 最多,占总频次的 93%,雨强 ≥ 50 mm/h 的极端强降水偶有出现,15 a 共出现 8 站 11 次,占总频次的 2%。

(4)短时强降水频次的空间分布有两个高中心,分别是无定河流域和洛河流域。无定河流域的吴堡、榆阳、子长、延川是高值中心,吴堡最多,年平均 1.7 次;洛河流域的富县、洛川是高值中心,富县年平均 1.3 次。雨强大值区有 3 个中心,分别为吴堡及其以南的黄河沿岸包括延川、宜川,无定河流域的子洲、榆阳、横山,洛河流域的甘泉、黄陵。吴堡县雨强最大为 73.5 mm/h。

(5)选取强降水频次较多的年份和较少的年份进行强弱年比较可知,强年副高 588 dagpm 线偏西偏北,584 dagpm 线在陕西黄土高原形成槽区,中高纬经向热力差异增大,200 hPa 高空急流偏强,700 hPa 偏南气流到达陕西黄土高原,容易在该地区形成高低空急流的耦合,850 hPa 气温偏高,陕西黄土高原为暖脊, $\Delta\theta_{se(850-500)}$ 达到 10~12 °C。弱年上述特征不明显。

参考文献:

[1] 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, 2007:360-361.

[2] 井喜,贺文彬,毕旭,等. 远距离台风影响陕北突发性暴雨成因分析[J]. 应用气象学报, 2005, 16(5): 655-662.

[3] 刘慧敏,高维英,李爱华,等. 陕西北部一次对流性特大暴雨的中尺度分析[J]. 陕西气象, 2014(4):1-6.

[4] 刘勇,郭大梅,胡启元. 2012 年 7 月 27 日陕北佳县特大暴雨天气的成因[J]. 干旱气象, 2014, 32(3): 424-430.

[5] 李晓利,严珠琴,康磊,等. 2015 年 7 月 18 日子洲气象站短时暴雨的中尺度特征分析[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(6):922-926.

[6] 李晓利,康磊,刘慧敏,等. 榆林一次短时突发性暴

雨中尺度特征及成因分析[J]. 陕西气象, 2018(6): 1-7.

[7] 马晓华,马青,刘嘉慧敏,等. 陕西榆林一次大暴雨成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(2):40-47.

[8] 白志娜,肖天贵,安娟,等. 1986—2016 年辽宁省强降水气候特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(3): 112-117.

[9] 孟丽霞,许东蓓,狄潇泓,等. 甘肃省短时强降水的时空特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(6):34-39.

[10] 王国荣,王令. 北京地区夏季短时强降水时空分布特征[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(3):276-279.

[11] 钟一丹,贾仰文,李志威. 北京地区近 53 年最大 1 小时降雨强度的时空变化规律[J]. 水文, 2013, 33(1):32-37.

[12] 李萍云,赵强,王楠,等. 2005—2018 年陕西短时强降水时空分布特征[J]. 陕西气象, 2019(5):34-39.

[13] 郑小华,娄盼星,刘环,等. 陕西极端降水时空变化特征研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(4):9-16.

[14] 王玉龙,张子涵. 2011—2018 年东营短时强降水时空分布特征[J]. 陕西气象, 2020(2):24-29.

[15] 俞小鼎,王迎春,陈明轩,等. 新一代天气雷达与强对流天气预警[J]. 高原气象, 2005, 24(3):456-464.

[16] 杜继稳,侯明全,梁生俊,等. 陕西省短期天气预报技术手册[M]. 气象出版社, 2007:215-251.

[17] 章国材. 强对流天气分析与预报[M]. 北京:气象出版社, 2015:58-59.

[18] 孙激. 北京地区暴雨气候特征及其变化分析[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(5):673-676.

[19] 张仲杰,康景芬,王士新,等. 西北地区东部降水异常的大气环流及水汽特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(1):87-92.

[20] 纪玲玲,杨雪艳,张婷,等. 吉林省主汛期典型多雨年和少雨年成因对比分析[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(3):42-47.