#### 研究意义和必要性

我国是受暴雨洪涝灾害影响最为严重的国家之一,因此暴雨研究一直是气象工作者最为 关注的问题之一。四川地处中国西南腹地,青藏高原东缘,境内地形复杂,四周山地环绕, 其中米仓山、大巴山、巫山坐落于东北侧,西面则为邛崃山、大凉山等山脉,暴雨频发,青 藏高原与盆地过渡地带更是局地性、突发性暖区暴雨的高频区域,该区域暴雨的空间分布与 地形的关系非常密切,极易造成山洪、泥石流等气象灾害。

四川盆地降水分布和日变化具有明显的区域性特性。日降水峰值出现时间从青藏高原向 东侧的下坡方向移动,盆地降水日变化呈现"一峰一谷"型,具有明显的活跃单峰型结构下 夜雨峰值位相特征,青藏高原东坡与四川盆地过渡带 "夜雨"尤为典型。

目前关于四川盆地暴雨的研究大多基于环流背景和地形作用等方面开展的一些典型个 例分析,而针对四川盆地西部复杂地形区不同落区降水与环境变量之间的关系以及夜雨与盆 地大气日变化特征之间的关系研究都较少。

本文基于 2015~2018 年四川盆地西部边缘出现的暴雨过程,挑选其中 27 个典型个例, 以落区为依据进行了统计分类,着重分析了不同空间分布特征暴雨的环境场条件,并从四川 盆地夏季大气日变化特征角度来探讨了该区域易出现夜雨频发的原因。研究表明: (1)受 四川盆地西部边缘高大陡峭地形影响,盆地西部中低层大气温湿条件好,暖湿东南气流在此 遇大地形产生迎风辐合抬升,易发生强降水。当暴雨发生在整个盆西(西部型)时,整个盆 地西部的湿度非常大,东南风较强;当暴雨发生在盆地西北部(西北型)时,中低层东南风 最强,动力作用最显著;当暴雨发生在盆地西南部(西南型)时,大多伴随有偏北风进入盆 地,存在明显的南北风切变辐合。水汽散度通量对四川盆地西部暴雨强度和落区具有较好的 指示意义。(2)对流有效位能、相对湿度、假相当位温、中低层风场以及散度这些热力和 动力变量的日变化特征,都表明了四川盆地西部降水易发生在夜间。进一步证明了高原和盆 地过渡区的热力/动力日变化与夜雨在密切关系。

本文讨论了局地环境场条件对四川盆地西部陡峭地形边缘强降水分布的影响,并从夏季 (雨季)局地大气的日变化特征来探索当地"夜雨"频发的原因,两个分析都是基于局地环 境条件和合成结果,这与此前惯有的研究视角有所差异。 四川盆地西部边缘不同落区暴雨的气象场差异及夜雨浅析1

杨康权<sup>3,4</sup> 卢萍<sup>1,2,4</sup>
1中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室
2中国气象局成都高原气象研究所,成都 610072
3四川省气象台,成都 610072
4高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,四川 成都 610072

**摘要**本文基于 2015~2018 年四川盆地西部边缘出现的典型暴雨个例,以落区为依据进行 了统计分类,着重分析了不同空间分布特征暴雨的环境场条件,并从四川盆地夏季大气日变 化特征角度来探讨了该区域夜雨频发的原因。研究表明: (1)受四川盆地西部边缘高大陡 峭地形影响,盆地西部中低层大气温湿条件好,暖湿东南气流在此遇大地形产生迎风辐合抬 升,易发生强降水。当暴雨发生在整个盆西(西部型)时,整个盆地西部的湿度非常大,东 南风较强;当暴雨发生在盆地西北部(西北型)时,中低层东南风最强,动力作用最显著; 当暴雨发生在盆地西南部(西南型)时,大多伴随有偏北风进入盆地,存在明显的南北风切 变辐合。水汽散度通量对四川盆地西部暴雨强度和落区具有较好的指示意义。 (2)对流有 效位能、相对湿度、假相当位温、中低层风场以及散度这些热力和动力变量的日变化特征, 都表明了四川盆地西部降水易发生在夜间。

关键词 四川盆地 暴雨落区 夜雨 日变化

文章编号

中图分类号 P447

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2305.22205

1 引言

我国是受暴雨洪涝灾害影响最为严重的国家之一,因此暴雨研究一直是气象 工作者最为关注的问题之一(李泽椿等,2019;罗亚丽等,2020)。四川地处中 国西南腹地,青藏高原东缘,境内地形复杂,四周山地环绕,其中米仓山、大巴

收稿日期 2022-10-24; 网络预出版日期

作者简介 杨康权,1985年8月,男,硕士,高级工程师,主要从事中小尺度天气及数值预报释用等研究。 E-mail: <u>154394478@qq.com</u>

通讯作者 卢萍。E-mail: abc-123@mail.iap.ac.cn

**资助项目** 四川省自然科学基金项目 2022NSFSC0021,科技部国家重点研发计划 2022YFC3003902,灾害 天气国家重点实验室开放课题项目(2021LASW-A06)。

**Funded by** Natural Science Foundation of Sichuan Province (Grant 2022NSFSC0021), National Key R&D Program of China (Grant 2022YFC3003902), Open Lab Foundation of State Key Laboratory of Hazardous Weather(Grant 2021LASW-A06)

山、巫山坐落于东北侧, 西面则为邛崃山、大凉山等山脉, 暴雨频发, 青藏高原 与盆地过渡地带(即四川盆地西部)更是局地性、突发性暖区暴雨的高频区域(肖 红茹等,2021),该区域暴雨的空间分布与地形的关系非常密切,极易造成山洪、 泥石流等气象灾害(李国平等,2018;黄楚惠等,2020)。此前的研究大部分集 中在环流背景和地形作用。如:四川盆地西部暴雨多发生在副高西伸北抬,对流 层中低层有利的天气系统相配合(西南涡和切边线、急流等)的环流背景下(李 琴等, 2016; 张芳丽等, 2020; 晏红明等, 2021; 张武龙等, 2021; 付智龙等, 2022)。青藏高原和四川盆地过渡带复杂地形区,地形对降水有着相当重要的影 响,山地降水比平坦下垫面地区的降水更为复杂,其中山体几何形状、相对湿度、 地表位温、低层风速、潜热释放、大尺度环流等都与山地降水有十分密切的联系 (Jiang, et al., 2003; Rotunno, et al., 2007; Tushaus, 2015; Colle, B. A., et al., 2013; Morales, et al., 2018)。地形效应则揭示了青藏高原的动力阻 挡作用使得西南暖湿气流带来的水汽积聚在四川盆地,并影响四川盆地的水汽输 送通道及西南涡的形成,高原东侧的陡峭地形加强了流场辐合和气流的垂直上升 运动(王成鑫等, 2013: 段静鑫等, 2018: 周秋雪等, 2019: 陈得圆等, 2022: 黄楚惠等,2022)。

四川盆地降水分布和日变化具有明显的区域性特性(Qian, et al., 2015; 甘露等, 2021)。日降水峰值出现时间从青藏高原向东侧的下坡方向移动,高原 降水峰值出现在白天,而盆地降水峰值出现在夜间。盆地降水日变化呈现"一峰 一谷"型,活跃时段集中在傍晚至凌晨,午夜达到峰值,具有明显的活跃单峰型 结构下夜雨峰值位相特征(Zhou, et al., 2008; Li, et al., 2008; Yu, et al., 2010; Yuan, et al., 2010;李强等, 2017)。青藏高原东坡与四川盆地过渡带 "夜雨"尤为典型,其产生机制被归因于高原和盆地的热力差造成的环流日变化, 以及青藏高原东部和云贵高原的对流系统向下游移动,夜间进入四川盆地并达到 峰值(Chen, et al, 2018), Zhang (2019)等的研究则强调来自盆地东南侧的 边界层内气流的非地转风惯性振荡的作用。

目前关于四川盆地暴雨的研究大多基于环流背景和地形作用等方面开展的 一些典型个例分析,而针对四川盆地西部复杂地形区不同落区降水与环境变量之 间的关系研究以及从盆地夏季大气平均态角度开展夜雨成因研究都较少。本文基

于 2015~2018 年四川盆地西部边缘出现的暴雨个例,以落区为依据进行了统计 分类,对比分析了不同空间分布特征暴雨的环境场条件差异,并从四川盆地夏季 大气日变化特征角度来探讨该区域易出现夜雨的原因,以期为该区域暴雨预报提 供一些有益的参考和支撑。第2节介绍数据和个例概况。第3节对比不同落区暴 雨的热力、动力场差异。第4节浅析夜雨原因。第5部分进行总结。

#### 2 数据和个例概况

本文所用资料包括四川省国家自动站和区域自动站观测的逐小时降水量,国家气象信息中心 CRA40 再分析资料,包括纬向风、经向风、气温、比湿、位势高度等高空物理量和一些常规地面物理量。时间分辨率为 6h,分别为 02,08,14,20 时(文中均采用当北京时 BJT),水平空间分辨率为 0.3125°\*0.3125°,垂直方向从 1000-1hPa 共 47 个气压层,所用资料长度为 2015~2018 年 5~9 月。



图1 (a)西部型, (b)西北型, (c)西南型合成24h累计降水分布(彩色阴影,单位: mm); (d)、(e)、(f)降水中心(上图黑色小方块区域平均)逐时降水分布(单位: mm h<sup>-1</sup>),其中,黑实线对应西南中心,红实线为西北中心。

Fig.1 Distribution of 24h synthetic precipitation different drop zone(color shadings, unit: mm), (a)w-a, (b)w-n, (c)w-s. (d), (e) and (f) Hourly precipitation distribution in precipitation centers (average of the black small square area in

the figure above) (unit:  $mm h^{-1}$ ), where the solid black line corresponds to the southwest center and the solid red line to the northwest center.

四川盆地西部属于青藏高原与盆地过渡带,地形复杂且陡峭,是四川强降水 的高频区域之一,相似的环流背景下,盆西的降水落区不尽相同,怎样的动力和 热力效应差异导致暴雨发生在高原东侧-盆地西部过渡带不同位置呢?这即本文 的研究议题之一。统计2015~2018年5~9月四川盆地的暴雨过程,以主雨带落 区为分型依据,挑选出位于盆地西部沿山区域的暴雨27例,按照地理分布将其 划分为整个盆西区域(9例,简称西部型,英文缩写w-a),盆地西北部(9例, 简称西北型,英文缩写w-n)和盆地西南部(9例,简称西南型,英文缩写w-s), 图 1a-c 即为三类合成降水分布图,表1列出了各类暴雨的发生日期和天气学分 型。其中,各类强降水中心的逐时分布如图1d-f 所示,盆地西部无论哪个区域 的降水皆以夜雨为主,降水多集中在23时-次日02时。

表1、三类暴雨的发生日期和天气学分型

Table 1, occurrence date and weather classification of three types of rainstorm

	整个盆西	盆地西北	盆地西南
	20150803(切变型)	20150802(低空急流型)	20150713 (西南低涡型)
个	20160705 (西南低涡型)	20160707 (低空急流型)	20160606(切变型)
例	20160722 (副高边缘型)	20160822(低空急流型)	20160614 (西南低涡型)
	20170817 (低空急流型)	20160823 (低空急流型)	20160712(切变型)
期	20170822(切变型)	20170726 (副高边缘型)	20160726(切变型)
及	20170827(切变型)	20170818 (副高边缘型)	20170802(切变型)
类	20180714(切变型)	20170821 (副高边缘型)	20180728(切变型)
型	20180715(切变型)	20180709 (低空急流型)	20180810(切变型)
	20180801(切变型)	20180710(低空急流型)	20180902(切变型)

附注(天气学分型):

西南低涡型: 700hPa 有西南低涡存在。

低空急流型: 700hPa 或 850hPa 有偏南风急流。

**副高边缘型:副高强且**稳定,588gpm线位于盆地附近,其西侧盆地内有东北-西南向切变线。

切变型: 700hPa或 850hPa等压面上,盆地内部有切变线。

## 3 三类暴雨的热力、动力场差异

由于该区域降水峰值通常集中在23时-次日02时,因此采用强降水发生前 临近时次(20时)的资料开展对比分析,从热力和动力场的角度探求预报这三 类暴雨关键指示因子。

## 3.1 整层水汽

西高东低的地形环境使得偏南暖湿气流带来的水汽积聚在四川盆地,并在迎风坡堆积。图2显示暴雨发生在四川盆地西部边缘时,整层水汽含量的高值区集中在盆地西部,当盆地西部整个沿山区都出现暴雨时,其上空的可降水量最多, 平均整层水汽量达到62kg/m<sup>2</sup>,整层水汽含量高值区与强降水落区有较好的对应 关系,由此可见,中低层的水汽聚集对强降水的发生和落区有一定的指示意义。



图 2 合成的(a)西部型,(b)西北型,(c)西南型整层水汽含量(彩色阴影,单位:kg m<sup>-2</sup>)。其中,灰色阴影表征地表气压(单位:hPa)。

Fig. 2. synthetic entire atmosphere precipitable water (color shadings, unit: kg  $m^{-2}$ ).

(a) w-a, (b)w-n, (c)w-s. Where, the gray shadings represents the surface pressure (unit:hPa) .

## 3.2 风场、涡度和散度

强的低空急流和陡峭的地形有利于形成地形降水(Lin et al, 2001)。对 于青藏高原的动力阻挡作用使得进入盆地的中低层风易于在西部产生气旋性弯 曲,700hPa风速比低层大,地形的动力作用也较大,最强正涡度通常出现在该 高度层附近。强降水发生在盆地西部边缘时,700hPa盛行偏南风,其中,当降 水落区位于盆地西北部时,偏南风最强,盆地与青藏高原过渡带存在明显的正涡 度区,正涡度最强,当强降水落区位于整个西部时,偏南风强度次之,当强降水 落区位于西南部时风速最小,正涡度值也最小(图3)。



图 3 合成 700hPa 风场 (风羽, 单位: m s<sup>-1</sup>) 和涡度 (彩色阴影, 单位: 10<sup>-5</sup>\*s<sup>-1</sup>)。 灰色阴 影覆盖的是地面气压小于 700hPa 的区域。其中, (a) 西部型, (b) 西北型, (c) 西南型 Fig. 3 700hPa synthetic wind field (barb, unit: m s<sup>-1</sup>) and vorticity(color shadings, unit: 10<sup>-5</sup>\*s<sup>-1</sup>), The gray shadows cover areas where surface pressure is less than 700hPa, (a) w-a, (b)w-n, (c)w-s.

青藏高原东侧陡峭地形的动力阻挡作用也会加强流场的切变辐合。强降水发 生在盆地西部边缘时,盆地内 850hPa 高度层上盛行东南风,该东南气流进入盆 地后呈现增强现象(可能是地形重力波效应造成气流越山后风速增大),当强降 水发生在盆地西北部时,风速最大,偏南风分量最显著,东南风受盆地西北部高 大地形的影响,在盆地西北部地形突变处表现为大的负散度,表明该区域存在辐 合抬升。西部型和西南型时,东南风在盆地西部产生转向,呈现逆时针方向的气 旋性弯曲,在盆地西南部转向为东北风,受盆地西南部地形阻挡,在此产生辐合 抬升。特定地形条件下,地形作用造成的辐合强度与迎风向风速大小表现为显著 正相关关系,迎风风速越大,辐合越强(图4)。



图 4 合成 850hPa 风场(风羽,单位:ms<sup>-1</sup>)和散度场(彩色阴影,单位:10<sup>-5</sup>\*s<sup>-1</sup>),灰色 阴影覆盖的是地面气压小于 850hPa 的区域。其中,(a)西部型,(b)西北型,(c)西南 型

Fig. 4 850hPa synthetic wind field (barb, unit:  $m s^{-1}$ ) and divergence (color shadings, unit:  $10^{-5}*s^{-1}$ ). The gray shadows cover areas where surface pressure is less than 850hPa,

(a) w-a, (b) w-n, (c) w-s.

沿降水中心纬向风场垂直剖面显示,强降水发生在盆地西部边缘时,受西高 东低的地形影响,盆地内中低层盛行偏东风,高空则是偏西风,气流在盆地西部 上升,东部下沉,形成一个垂直环流。偏东气流越山后风速增大,大值中心位于 盆地中部 850hPa 高度层附近。当强降水落区在盆地西北部时,东风伸展高度在 700hPa 左右,强降水落区在盆地西南部时,东风伸展高度显著高于前者(图 5)。



图 5 沿降水中心纬向风场剖面(流场是 U-W 合成风,彩色阴影为 U 风,单位: m s<sup>-1</sup>),灰 色阴影是地表气压。其中, (a、b)西部型, (c)西北型, (d)西南型 Fig. 5 synthetic zonal wind profile along 30°N (The flow field is U-W synthetic wind, and the color shadings is U-wind, unit: m s<sup>-1</sup>, the grey shade is the surface pressure), where, (a、b) w-a, (c) w-n, (d) w-s.

风场的经向垂直剖面显示,受地形影响,盆地中部、北部上空低层(900hPa 以下)以弱的偏北风为主,中高空则是较强的偏南风。当强降水发生在整个盆西 时,偏北风仅在盆地内部,该现象是低层大气在盆地内部产生气旋性弯曲造成的, 盆地上空为较强的偏南风;当强降水发生在盆地西北部时,盆地低层也是非常弱 的偏北风,其上空是非常强的偏南风,甚至出现风速超过10m/s偏南风;当强降 水发生在盆地西南部时,北风风速和范围都大于前两者,偏北风来自盆地以北区 域,盆地南部上空为偏弱的南风,两支气流形成明显南北风切变辐合(图6)。



图 6 沿 106°E 经向风场剖面(流场是 V-W 合成风,彩色阴影为 V 风,单位:ms<sup>-1</sup>),灰色阴 影是地表气压。其中, (a)西部型, (b)西北型, (c)西南型 Fig. 6 synthetic meridional wind profile along 106°E (The flow field is V-W synthetic wind, and the color shadings is V-wind, unit: m s<sup>-1</sup>, the grey shade is the surface pressure), where, (a) w-a, (b) w-n, (c) w-s.

#### 3.3 水汽通量和水汽通量散度

地形降水与上游风、水汽通量密切相关(Falvey et al., 2007)。水汽含 量高的偏南气流不仅可使暴雨区局地辐合与气旋性涡度增强,还是主要的水汽输 送源。当强降水发生在盆地西北部时,偏南风最强,由南向北的水汽输送最大, 最强水汽通量出现在盆地西北部,部分水汽通量越过盆地继续向北输送;当强降 水发生在整个盆西时,由东南风向盆地西北部输送的水汽通量较大,水汽通量受 西部高地形阻挡产生滞留;当强降水发生在盆地西南部时,东南风和偏北风输送 来的水汽在盆地西南部汇合(图7)。



图7 合成的(a)西部型,(b)西北型,(c)西南型整层水汽通量(单位:gcm<sup>-1</sup>hPa<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>) Fig.7 (a) w-a,(b)w-n,(c)w-s vertically synthetic vertically integrated moisture flux (Unit: g cm<sup>-1</sup> hPa<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>).

涡度和散度是诊断分析暴雨系统发展演变的重要物理量,但涡度和散度与雨

区的关系并不是完全对应的,因此,结合垂直速度和水汽效应,形成了水汽垂直 螺旋度(垂直速度与水汽通量涡度的乘积ω[∂(vq)/(∂x-∂(uq)/∂y)])和水汽散 度通量(垂直速度与水汽通量散度的乘积ω[∂(uq)/(∂x+∂(vq)/∂y)])两个参数, 它们与暴雨的联系可能更紧密(冉令坤等,2009)。研究发现盆西强降水时,水 汽垂直螺旋度最大值通常出现在750hPa,水汽散度通量最大值出现在800hPa, 水汽垂直螺旋度和水汽散度通量与强降水落区位置对应较好,水汽散度通量对降 水强度及落区的指示意义都非常好(图8,9)。



图 8 750hPa 水汽通量(流线,单位:10<sup>-3</sup>\*m.s<sup>-1</sup>)和水汽垂直螺旋度(彩色阴影,单位:10<sup>-7</sup>\*m.s<sup>-2</sup>), 灰色阴影表示地面气压(单位:hPa)。其中, (a)西部型, (b)西北型, (c)西南型 Fig. 8 750hPa synthetic water vapor flux (streamline, unit: 10<sup>-3</sup>\*m.s<sup>-1</sup>) and water vapor vertical helicity (color shadings, unit: 10<sup>-7</sup>\*m.s<sup>-2</sup>). Grey shadow represents surface air pressure, (a) w-a, (b)w-n, (c)w-s.



图 9 800hPa 水汽通量(流线,单位:10<sup>-3</sup>\*m s<sup>-1</sup>)和水汽散度通量(彩色阴影,单位:10<sup>-7</sup>\*m s<sup>-2</sup>), 灰色阴影表示地面气压(单位:hPa)。其中,(a)西部型,(b)西北型,(c)西南型 Fig. 9 800hPa synthetic vapor flux (streamline, unit: 10<sup>-3</sup>\*m s<sup>-1</sup>) and vapor divergence flux (color shadings, unit: 10<sup>-7</sup>\*m s<sup>-2</sup>), grey shadow represents surface pressure (unit: hPa), (a) w-a, (b)w-n, (c)w-s.

综上所述,降水发生在盆地西部时,盆地内温湿条件和动力条件都非常好, 西部大地形作用显著,一方面由于西部高大地形的阻挡,水汽易在盆地西部滞留 聚集,增强了该区域大气的不稳定性,另一方面,中低层偏东风气流在盆地西部 遇大地形产生迎风辐合抬升。当强降水发生在整个盆西时,盆地内的湿度大,东 南风较强;当强降水发生在盆地西北部时,盆地中低层东南风最强,动力作用更 强;当强降水发生在盆地西南部时,大多伴随有偏北风进入盆地,南北风切变辐 合作用显著。

4 夜雨成因浅析

已有研究表明四川盆地降水日变化呈现典型的"夜雨"特征,上述盆西不同 区域强降水峰值也都出现在夜间(图1)。接下来就从夏季大气平均态的角度, 研究易于产生夜雨的大气环境场特征。以2017年(降水量与气候平均相当,因 此将该年视作多年平均态)夏(6-8月)为例,通过盆地内大气环境场的日变化 特征来探讨引发夜雨的关键因子。

地形对气流的抬升效应取决于地形附近大气静力稳定度。四川盆地受地形环 境影响,中低层大气湿度较大,风速较小,因此盆地内部易累积对流有效位能。 08时,对流有效位能均值较小(图略),随着陆-气物质和能量交换作用的增强, 对流有效位能迅速增大,08时~14时,乃盆地西部对流有效位能增长最快的时 段,最大增幅超过 500 J kg<sup>-1</sup>,增长过程一直维持到 20 时,20 时~次日 02 时,盆 地西部对流有效位能快速减少,最大降幅同样超过 500 J kg<sup>-1</sup>,这一日变化特征 也反映了该地区白天是对流有效位能积累过程,随着对流有效位能的增长,盆地 内中低层大气变得越来越不稳定,夜间是对流有效位能释放过程,强降水发生时 间与对流有效位能释放过程相一致(图 10)。



图 10 四川盆地 2017 年夏季对流有效位能较前一时次的差值(彩色阴影,单位: J kg<sup>-1</sup>), 灰色阴影表示地面气压(单位: hPa)。其中, (a) 08 时-02 时, (b) 14 时-08 时, (c) 20 时-14 时, (d) 02 时-20 时

Fig. 10 The difference of mean surface convective available potential energy between the current time and the previous time in summer 2017 in Sichuan Basin (unit: J kg<sup>-1</sup>),
(a) 08BJT-02BJT, (b) 14BJT-08BJT (c) 20BJT-14BJT, (d) 02BJT-20BJT.

要形成降水,通常要求有水汽凝结现象产生,因此相对湿度与降水间通常存 在密切的正相关关系。从 2m 相对湿度来看,夏季其大值区分布在盆地周边地形 突变区,尤其是盆地西部沿山区,相对湿度具有非常鲜明的日变化特征:08时, 盆地相对湿度在 80%以上,周边沿山区相对湿度能高达 95%;14时,盆地内部和 周边的相对湿度最小,周边沿山区的极大值区不足 90%;20时,盆地内部的相对 湿度比午间有所增长,周边沿山区相对湿度迅速增大,盆地西部沿山区大片区域 相对湿度超过 95%;02时,盆地内部和周边沿山区相对湿度进一步增大(超过 98%),接近饱和状态,为一日中相对湿度最大的时次。从相对湿度的时空分布 特征来看,夜间,周边沿山区是相对湿度高值区,这一分布特征使得夜间沿山区 低层大气极易凝结,触发降水(图 11)。



图 11 四川 2017 年夏季平均 2m 相对湿度的日变化 (彩色阴影,单位: %) 和地面气压 (黑 色等值线,单位: hPa)。其中, (a) 08 时, (b) 14 时, (c) 20 时, (d) 02 时 Fig. 11 Diurnal variation of mean 2m relative humidity (color shadings, unit: %) and surface pressure (black isoline, unit: hPa) in the Summer of 2017 in Sichuan, (a) 08BJT, (b) 14BJT, (c) 20BJT, (d) 02BJT.

热力环境和上升运动都是触发产生降水的基本动力条件。夏季盆地中低大气的稳定性都较差,尤其08时,900~850hPa之间存在的稳定层结,抑制着对流运动从地面向上层发展,14时,该稳定层结层逐渐变薄,到了20时,整个盆地中下层大气都处于不稳定状态,大气扰动极易触发对流上升运动。盆地低层是弱的偏东风气流,高空为较强的偏西风,盆地西部陡峭地形处存在明显的山谷风环流,白天为上坡气流,夜间转向为下坡风。受地形和定常风的影响,中低层大气在盆地西部遇地形产生抬升作用,20时以后,偏东风较强,夜间(如02时),下坡风和东风在低层产生风向辐合(图12)。

K



图 12 四川盆地 2017 年夏季平均假相当位温梯度(彩色阴影,单位:KhPa<sup>-1</sup>)和纬向风(矢 量箭头,单位:ms<sup>-1</sup>)日变化,灰色阴影是地表气压。其中,(a)08时,(b)14时,(c) 20时,(d)02时

Fig. 12 Diurnal variation of mean pseudo-equivalent potential temperature gradient (color shadings,  $K h Pa^{-1}$ ) and zonal wind (vector arrow, m s<sup>-1</sup>) in summer 2017 in Sichuan. Among them, (a) 08BJT, (b) 14BJT, (c) 20BJT, (d) 02BJT.

四川盆地地形呈现西高东低的特征,故盆地内低层 850hPa 盛行东南风,其 中,偏南风分量更显著,风受盆地西北部高大地形的影响,夜间(02 时和 08 时) 在盆地西部地形突变处表现为负散度,表明该区域夜间存在辐合抬升(图 13), 结合环境场热力日变化特征,发现 20 时~次日 02 时这个时段热力和动力条件配 置都有利于降水的产生。进一步证实了青藏高原与四川盆地过渡带的热力和动力 的日变化特征既是夜雨频发的原因之一,也是该区域易发生暖区暴雨的原因之 一,同时又是数值模式盛夏降水预报的高空报区。



图 13 四川 2017 年夏季 850hPa 平均散度(彩色阴影,单位:s<sup>-1</sup>)和风场(流线,单位:ms<sup>-1</sup>) 日变化,灰色阴影表示地面气压(单位:hPa)。其中,(a)08时,(b)14时,(c)20 时,(d)02时

Fig. 13 Diurnal variation of 850hPa mean divergence (color shadings, unit: s<sup>-1</sup>) and
wind field (streamline, unit: m s<sup>-1</sup>) in summer 2017 in Sichuan. (a) 08BJT, (b) 14BJT,
(c) 20BJT, (d) 02BJT.

### 5 讨论和小结

本文甄选 2015~2018 年四川盆地西部边缘出现的典型强降水过程 27 例,统 计分析了不同落区强降水的环境场条件差异,并从四川盆地夏季大气日变化特征 角度来探讨了该区域降水易出现在夜间的原因,得到以下结论:

(1)四川盆地西部高大陡峭地形,使得水汽在盆地西部滞留聚集,盆西温湿条件较好,中低层暖湿东南气流在盆地西部遇大地形产生迎风辐合抬升,易发生强降水。当强降水发生在整个盆西(w-a)时,盆地内的湿度大,东南风较强;当强降水发生在盆地西北部(w-n)时,盆地中低层东南风最强,动力作用更强;当强降水发生在盆地西南部(w-s)时,大多伴随有偏北风进入盆地,南北风切变辐合作用显著。水汽散度通量对四川盆地西部降水强度及落区的指示意义好。

(2) 对流有效位能、相对湿度、假相当位温、中低层风场以及散度这些热力和 动力变量的日变化特征,都表明了四川盆地西部地区是"夜雨"的易发区。

参考文献(References)

陈得圆, 王磊, 李谢辉, 等. 2022. 四川盆地西部一次典型连续夜雨的数值模拟[J]. 高原气象, 41 (1):216-225. Chen Deyuan, Wang Lei, Li Xiehui, et al. 2022. Numerical Simulation of a Typical Continuous Night Rain Processin the Western Sichuan Basin[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 41 (1): 216-225. doi: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2019. 00109.

- Chen H, Li J, Yu R. Warm season nocturnal rainfall over the eastern periphery of the Tibetan Plateau and its relationship with rainfall events in adjacent regions[J]. Int J Climatol., 2018:1-16. doi:org/10.1002/joc.5696
- Colle, B. A., R. B. Smith, and D. A. Wesley. 2013. Theory, observations, and predictions of orographic precipitation[J]. Mountain Weather Research and Forecasting, Springer, 291-344. doi:org/10.1007/978-94-007-4098-3\_6.

段静鑫,赵天良,徐祥德,等.2018.四川暴雨过程中盆地地形作用的数值模拟[J].应用气象
学报,29(3):307-320.Duan Jingxin, Zhao Tianliang, Xu Xiangde, et al.2018.Simulation of basin topography impacts on rainstorm in Sichuan[J].Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 29

(3) :307-320. doi: 10.11898/1001-7313.20180305

- 付智龙,李国平,姜凤友,等. 2022. 四川盆地西部一次暖区山地暴雨事件的动力过程分 析与局地环流数值模拟[J]. 大气科学,46(6):1366-1380. Fu Zhilong, Li Guoping, Jiang Fengyou, et al. 2022. Dynamic Analysis and Local Circulation Numerical Simulation of a Warm-sector Mountain Rainstorm Event in the Western Sichuan Basin [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(6): 1366 -1380. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2110.21054
- 甘露,刘睿,冀琴,等.2021.四川省极端降水事件时空演变特征[J].山地学报, 39(1):10-24. Gan Lu, Liu Rui, Ji Qin, et al.2021.Spatio-temporal evolution characteristics analysis of extreme precipitation in Sichuan province, China [J]. Mountain Research (in Chinese), 39(1):10-24.doi:10.16089 /j.cnki.1008-2786.000572
- 黄楚惠,李国平,张芳丽,等.2020.近10a 气候变化影响下四川山地暴雨事件的演变特征[J]. 暴雨灾害,39(4):335-343. Huang Chuhui, Li Guoping, Zhang Fangli, et al. 2020. Evolution characteristics of mountain rainstorms over Sichuan Province in the

past ten years under the influence of climate change [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 39(4):335-343. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.04.003

- 黄楚惠, 李国平, 牛金龙, 等. 2022. 2020 年 8 月 10 日四川芦山夜发特大暴雨的动热力结 构及地形影响[J]. 大气科学, 46(4): 989-1001. Huang Chuhui, Li Guoping, Niu Jinlong, et al. 2022. Dynamic and Thermal Structure and Topographic Impact of the Night Torrential Rainfall in Lushan, Sichuan on August 10, 2020 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(4): 989 - 1001. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2205.21205
- Jiang, Q. 2003. Moist dynamics and orographic precipitation[J]. Tellus, 55A, 301-316. doi:org/10.3402/tellusa.v55i4.14577.
  - 李国平,陈佳.2018.西南涡及其暴雨研究新进展[J].暴雨灾害,37(4):293-302. Li Guoping, Chen Jia. New progresses in the research of heavy rain vortices formed over the southwest China[J].Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 2018,37(4):293-302. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.04.001
  - 李琴,杨帅,崔晓鹏,等. 2016. 四川暴雨过程动力因子指示意义与预报意义研究 [J]. 大 气科学,40(2):341-356. Li Qin, Yang Shuai, Cui Xiaopeng, et al. 2016. Diagnosis and forecasting of dynamical parameters for a heavy rainfall event in Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(2):341 -356. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1507.14296.
  - 李强,邓承之,张勇,等.2017.1980-2012年5-9月川渝盆地小时强降水特征研究[J].气 象,43(9):1073-1083. Li Qiang, Deng Chengzhi, Zhang yong,et al.2017. Study on spatio-temporal distribution characteristics of hourly heavy rainfall in Sichuan and Chongqing from May to September during 1980-2012[J]. Meteorological Monthly (in Chinese),43(9):1073-1083.

doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.09.005

李泽椿,谌芸,张夕迪,等.2019.中央气象台暴雨预报业务的发展及思考[J].暴雨灾害, 38(5):407-415. Li Zechun, Chen Yun, Zhang Xidi, et al. 2019. Development and perspectives on torrential rain forecasting operation in National Meteorological Center [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 38(5): 407-415. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.002

- 罗亚丽,孙继松,李英,等. 2020. 中国暴雨的科学与预报:改革开放40年研究成果[J]. 气象学报,78(3):419-450. Luo Yali, Sun Jisong, Li Ying, et al. 2020. Science and prediction of heavy rainfall over China: Research progress since the reform and opening-up of the People's Republic of China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 78 (3):419-450. doi:10.11676/qxxb2020.057
- Li J, Yu R C, Yuan W H, et al, 2008. Seasonal variation of the diurnal cycle of rainfall in the southern contiguous China[J]. Journal of Climate, 21(22):6036-6043. Doi:10.1175/2008jcli2188.1.
- Morales, A., H. Morrison, and D. J. Posselt. 2018. Orographic precipitation response to microphysical parameter perturbations for idealized moist nearly neutral flow[J]. J. Atmos. Sci., 75: 1933 - 1953. doi:org/10.1175/JAS-D-17-0389.1
- Qian T T, Zhao P, Zhang F Q, et al, 2015. rainy-season precipitation over the sichuan basin and adjacent regions in southwestern China[J]. Monthly Weather Review, 143(1):383-394. Doi:10.1175/MWR-D-13-00158.1.
- 冉令坤, 楚艳丽. 2009.强降水过程中垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式的诊断分析[J]. 物理学报, 58(11):8094-8106. Ran Lingkun, Chu Yanli. 2009. Diagnosis of vertical helicity, divergence flux and their extensions in heavy-rainfall events[J]. Chin. Phys. Soc (in Chinese), 58(11):8094-8106. doi:1000-3290/2009/58 (11) /8094-13.
- Rotunno, R., and R. A. Houze. 2007. Lessons on orographic precipitation from the Mesoscale Alpine Programme[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 133: 811-830. doi:org/10.1002/qj.67.
- Tushaus , S.A. , D. J.Posselt , M.M.Miglietta , R.Rotunno and L.Delle Monache.2015.Bayesian exploration of multivariate orographic precipitation sensitivity for moist stable and neutral flows[J].Mon. Wea. Rev.,143: 4459 - 4475. doi:org/10.1175/MWR-D-15-0036.1
- 王成鑫,高守亭,梁莉,等. 2013. 动力因子对地形影响下的四川暴雨落区的诊断分析
  [J]. 大气科学, 37 (5): 1099 1110, Wang Chengxin, Gao Shouting, Liang Li, et
  al. 2013. Diagnostic analysis of dynamical parameters for Sichuan rainstorm

influenced by terrain [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),

37 (5): 1099 - 1110. doi:10.3878/j.issn.1006-9895. 2012.12112.

- 肖红茹,王佳津,肖递祥,等.2021.四川盆地暖区暴雨特征分析[J].气象,47(3):303-316. Xiao Hongru, Wang Jiajin, Xiao Dixiang, et al.2021. Analysis of warm-sector rainstorm characteristics over Sichuan Basin [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 47(3):303-316.doi:10.7519/j.issn.1000 -0526.2021.03.004
- 晏红明,字俣丞. 2021. 夏季副高次季节尺度东西变动特征及其与中国西南降水的关系[J].
  大气科学,45(1):1-20. Yan Hongming, Zi Yucheng. 2021. Characteristics of the Subseasonal-Scale Zonal Movement of Subtropical High in Summer and Its Relationship with Precipitation in Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 1 20. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.19204
- Yu R C, Yuan W H, Li J, et al, 2010. Diurnal phase of late-night against late-afternoon of stratiform and convective precipitation in summer southern contiguous China[J]. Climate Dynamics, 35(4):567-576. Doi:10.1007/s00382-009-0568-x.
  Yuan W H, Yu R C, Chen H M, et al, 2010. Subseasonal characteristics of diurnal variation in summer monsoon rainfall over central eastern China[J]. Journal of Climate, 23: 6684-6695. doi:10.1175/2010jcli3805.1.
  - 张芳丽,李国平,罗潇,2020. 四川盆地东北部一次突发性暴雨事件的影响系统分析[J]. 高 原气象,39(2):321-332. Zhang Fangli, Li Guoping, Luo Xiao, 2020. Some Influence Factors of a Sudden Rainstorm Event in Northeast Sichuan Basin of China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 39 (2): 321-332. doi: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2019. 00080.
  - 张武龙,康岚,杨康权,等.2021.四川盆地不同强度短时强降水物理量特征对比分析[J].
    气象,47(4):439-449. Zhang Wulong, Kang Lan, Yang Kangquan, et al. 2021. Comparative analysis on characteristics of physical quantity of flash-rain under different intensities in Sichuan basin[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 47(4): 439-449. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2021.04.005
  - 周秋雪,康岚,蒋兴文,等.2019.四川盆地边缘山地强降水与海菝的关系[J].气象,45(6): 811-819.Zhou Qiuxue, Kang Lan, Jiang Xingwen et al.2019.Relationship between

heavy rainfall and altitude in mountainous areas of Sichuan basin[J].Meteorological Monthly (in Chinese), 45(6) : 811-819. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.06.007

- Zhang Y, Xue M, Zhu K, et al, 2019. What is the main cause of diurnal variation and nocturnal peak of summer precipitation in Sichuan Basin, China?The key role of boundary layer low-level jet inertial oscillations[J]. Journal of Geophysical Research, 124:2643-2664. doi:10. 1029/2018JD029834.
- Zhou T J, Yu R C, Chen H M, et al, 2008. Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: A comparison of satellite data with rain gauge observations[J]. Journal of Climate , 21(16):3997-4010. doi:10.1175/2008JCLI2028.1.

Analysis on the difference of meteorological field and night

rain in different falling areas of slope area in western

Sichuan Basin

# Yang Kangquan<sup>3,4</sup> Lu Ping<sup>1,2,4</sup>

1State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
2Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration (CMA), Chengdu 610072
3 Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072

4 Heavy Rain and Drought – Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

Abstract Based on the typical rainstorm cases occurred in the western edge of Sichuan Basin from 2015 to 2018, the environmental field conditions of rainstorm with different spatial distribution characteristics were analyzed, and the reasons for frequent occurrence of night rain in Sichuan Basin were discussed from the perspective of atmospheric diurnal variation characteristics in summer. The results show that: (1) Influenced by the high and steep terrain in the western margin of Sichuan Basin, the air temperature and humidity in the middle and lower layers in the western Sichuan Basin are good, and the warm and humid southeast airflow converges and lifts when encountering the large terrain, which is prone to heavy rainfall. When the rainstorm occurs in the west of the whole basin (west type), the humidity in the west of the whole basin is

very high and the southeast wind is strong; When the rainstorm occurs in the northwest of the basin (northwest type), the southeast wind in the middle and low levels is the strongest, and the dynamic effect is the most significant; When the rainstorm occurs in the southwest of the basin (southwest type), most of them are accompanied by northerly wind into the basin, and there is an obvious north-south wind shear convergence. The water vapor divergence flux is a good indicator for the intensity and location of heavy rain in the western Sichuan Basin. (2) The diurnal variations of the convective available potential energy, relative humidity, pseudo-equivalent potential temperature, wind field at low and middle levels and divergence all indicate that the precipitation in the western Sichuan Basin tends to occur at night.

Keywords Sichuan basin, rainfall area, night rain, diurnal variation

き



