

杨亦典,彭菊蓉,白爱娟,等.西南涡的中尺度特征及其对陕南降水影响的研究综述[J].陕西气象,2021(5):9-14.

文章编号:1006-4354(2021)05-0009-06

# 西南涡的中尺度特征及其对陕南降水影响的研究综述

杨亦典<sup>1</sup>,彭菊蓉<sup>2</sup>,白爱娟<sup>3</sup>,乔娟<sup>1</sup>,杨波<sup>4</sup>

(1. 西安市气象台,西安 710016;2. 汉中市气象局,陕西汉中 723000;

3. 成都信息工程大学,成都 610225;4. 勉县气象局,陕西勉县 724200)

**摘要:**西南涡是生成于我国西南地区,除台风外影响我国降水的最主要天气系统之一。通过回顾对西南涡的统计结果、结构特征、其降水落区以及秦巴山区对西南涡的影响等研究成果,阐述西南涡的基本概况及其中尺度结构特征。同时,根据已公开发表的2008、2011—2019年全国4—10月主要暴雨过程的统计结果,挑选出该时段内陕南地区的暴雨过程并分析得出西南涡是造成陕南暴雨的主要影响系统,其34.3%的暴雨过程受到了西南涡的影响。

**关键词:**西南涡;中尺度系统;陕南暴雨

**中图分类号:**P44

**文献标识码:**A

西南低涡(简称西南涡)是受青藏高原特殊地形影响,生成于我国西南地区 $100^{\circ}\sim 108^{\circ}\text{E}$ , $26^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 范围内700或850 hPa等压面上的气旋性环流或有闭合等高线的 $\alpha$ 中尺度涡旋。西南涡所引发的暴雨从强度、频数和范围而言,是我国仅次于台风的暴雨天气系统<sup>[1]</sup>。

统计结果表明,西南涡全年各月都会出现,以春夏季节4—9月居多。西南涡的两个主要生成区为高原东南缘(九龙生成区,即九龙、昌都、康定一带)和四川盆地<sup>[2-6]</sup>。大部分低涡会在原地生消,部分低涡发展东移,引发下游地区大范围(如长江流域、淮河流域、华北、东北、华南和陕南等地)暴雨、雷暴等高影响天气。

近年来,随着卫星、雷达等非常规气象观测资料的应用,对于西南涡结构的研究更加细致和深入,对西南涡结构的认识逐渐清晰。多位研究人员发现,西南涡内部所包含 $\beta$ 中尺度低涡是造成暴雨的重要原因之一。

陕南地区位于四川盆地东北部,位于西南涡

东北移动路径前沿,是西南涡移出涡的主要影响区域之一。西南涡的发生发展与移动对陕南地区的降水起着至关重要的作用。同时,陕南地区受秦岭山脉和巴山山脉影响地形复杂、起伏明显,造成了其降水分布的不均匀性,极易引发山区泥石流、滑坡等次生灾害,从而造成人员伤亡、植被破坏、交通中断等问题。例如2020年8月6日洛南县暴雨过程,造成5人死亡,10人失联,部分村电力、通讯中断,242省道中断。

本文将回顾近年来各位学者对西南涡统计结果、移动、结构特征、其降水落区等,并分析其中尺度特征,总结陕南暴雨主要影响系统,提出西南涡影响下陕南暴雨天气预报的关注重点。

## 1 西南涡概况及研究进展

### 1.1 西南涡统计结果分析

西南涡生成及活动的统计是研究西南涡活动的基础工作。不同单位或个人在不同时期对西南涡的统计分析结果表明,西南涡在初夏季节活动较为活跃<sup>[2]</sup>,且以九龙地区为主要涡源发生地,其

收稿日期:2021-02-04

作者简介:杨亦典(1991—),女,汉族,陕西汉中,硕士研究生,助理工程师,从事天气预报预警工作。

基金项目:陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室面上基金(2020G-16)

次为四川盆地。其中九龙生成区的低涡大部分会在原地生消,而盆地生成区低涡则较多移出盆地。其主要移动路径<sup>[4-6]</sup>包括以下三类:偏东路径(占移动类低涡约 50.0%)、东北路径(占移动类低涡约 33.3%)、东南路径(占移动类低涡 5.0%),其中东北路径经陕西南部、华北、山东出海,最远可到达东北地区。

由于统计标准不同,关于低涡的季节变化和移动涡的涡源仍存在一定的分歧。谌贵询<sup>[6]</sup>认为冬季出涡个数最多而夏季最少,且移出涡的原地以九龙涡最多,陈启智<sup>[4]</sup>则认为夏季最多,冬季最少,且移出涡源以盆地涡为主。这样的统计差异是否是由于全球气候变暖所致的则需要进一步统计分析。

总而言之,不同时期对西南涡的统计能够得出基本一致的结果,但存在的分歧也是显而易见的,这与统计标准、观测手段、数据来源等多方面有关。不同的统计标准对西南涡的深入研究造成了一定的不确定性,因而制定统一且科学的西南涡统计判定指标是必须的,同时还需要采用新型探测资料对西南涡的活动特征进行统计得出更为确切的结果。另外,不同资料所造成差异的原因也值得进一步关注和研究。

### 1.2 西南涡结构特征

卢敬华<sup>[2]</sup>提出西南涡是对流层中、下层的浅薄扰动,呈近圆形而非对称的中性气旋。陈忠明<sup>[7]</sup>通过对西南涡诊断分析揭示了西南涡成熟期的三维结构。成熟阶段的西南涡正涡度可延伸至 100 hPa 以上,中心轴线垂直。其流场和高度场表现为贯穿对流层的中尺度气旋和低压;涡区内动量、层结、垂直运动等呈非对称结构,是一个准圆形而非对称的中尺度系统。Wang 等<sup>[8]</sup>研究表明发展成熟的低涡可从地面延伸到 300 hPa,气旋附近非常潮湿,温度廓线近湿绝热,风速很小,近乎无风切变。王新敏等<sup>[9]</sup>研究表明西南涡正涡度中心可延伸到 200 hPa 以上,成熟阶段西南涡正涡度具有明显的向西倾斜的垂直结构,同时正涡度中心有向下游和低层传播的特征,次正涡度中心能够预示着未来西南涡的移向。

对西南涡的结构研究表明,西南涡呈近圆形

而非对称结构,西南涡在不同发展阶段结构不同。成熟阶段的西南涡正涡度可延伸至 200 ~ 100 hPa 以上,且 500 hPa 以上开始有明显的向西倾斜的结构。

### 1.3 西南涡的降水落区

西南涡作为重要的降水天气系统,其暴雨产生的区域与西南涡位置的关系也是研究的重点方向之一。李明等<sup>[10]</sup>在对 2010 年 7 月发生在川陕地区的大暴雨天气研究时发现,对流涡度矢量(convective vorticity vector, CVV)的垂直分量和气柱云水量中心值的重合区是大暴雨的发生区。同时,雨带与高相位温( $\theta_e$ )弧带形态一致,高 $\theta_e$ 中心即大降水所对应的区域。陈栋等<sup>[11]</sup>对 2005 年 7 月 6—9 日发生于川东和陕南交界处的暴雨过程通过湿位涡诊断分析研究发现低层暖湿空气相当位温的水平梯度对西南涡的发展和暴雨发生有重要影响,并且暴雨发生在高温高湿的对流不稳定地区,湿位涡水平分量( $P_{m2}$ )正中心对暴雨落区有很好的指示性。同时,以上两项研究表明 $\theta_e$ 对雨带有很好的指示作用。李明发现,雨带与高 $\theta_e$ 弧带形态一致,高 $\theta_e$ 中心即大降水所对应的区域,陈栋则提出相当位温的水平梯度对暴雨发生和降水区都有很好的指示性,在暴雨区低层相当位温有向高空强烈发展的趋势,并且在暖湿能量锋出现后高层出现相当位温为 345 K 的冷空气活动迹象。王新敏等<sup>[9]</sup>提出,成熟期的西南涡涡度场和垂直运动同相,对应降水发生的旺盛期,整层强上升运动区与西南涡暴雨区有较好的对应关系,暴雨和大暴雨区位于西南涡移动方向的右前方,距西南涡中心 2~4 个经度。

### 1.4 秦巴山区对西南涡活动的影响

除青藏高原特殊地形对西南涡发生、发展和移动的影响外,近年来,逐渐有学者开始关注秦巴山脉对于西南涡活动的影响。

母灵<sup>[12]</sup>在利用中尺度非静力平衡模式对 2010 年 7 月 16—18 日西南涡暴雨过程的控制实验和地形敏感性实验的研究中发现,秦岭大巴山脉对西南涡的形成不具有决定性影响,但对西南涡的维持和发展有着重要的作用。王沛东<sup>[13]</sup>利用 CFSv2 再分析资料和中尺度数值模式对

2014年8月8—9日四川东北部、陕西南部的一次西南涡强降水过程进行数值实验,重点分析了秦巴山区对此次暴雨的影响作用。研究表明,秦巴山区地形对西南涡降水的增幅作用明显,且随地形高度的升高,降水强度增大,雨带位置向西偏移。

总体来讲,秦巴山区对西南涡的发展、移动有明显影响。秦巴山区对南北气流的阻挡影响了西南涡的移动方向,同时,其特殊地形影响水汽输送、辐合和垂直运动,进一步影响降水的强度和分布。

## 2 陕南暴雨的特征及近年主要暴雨过程

陕南位于长江、黄河两大水系之间的秦巴山区,山大沟深,地形复杂,是我国南北过渡的亚热带北沿地区,其暴雨影响系统复杂多变,值得关注。

不同的研究人员采用 REOF、五年滑动平均等方法统计了陕西地区降雨量的气候变化,均得出陕南地区的降水量主要集中在夏季,夏季降水

量占全年降水量的 47%,并且夏季降水呈现增加态势<sup>[14-16]</sup>。王蒙等<sup>[15]</sup>发现 2006—2008 年前后至今,陕南的年极端降水日数、年极端降水量、年极端降水强度均呈现显著上升的趋势,进入了新一轮极端降水波峰期。

利用中国气象局武汉暴雨研究所以及中央气象台对 2008 年、2011—2019 年(部分年份中断)中国 4—10 月暴雨天气过程的分析结果<sup>[17-26]</sup>统计该时段内陕南暴雨天气过程,并分析其主要影响系统。

该时段内陕南地区共发生 35 次暴雨天气过程,其中有 12 次过程受到了西南涡的影响(表 1),占比高达 34.3%。此外,还有 8 次暴雨过程受到了低涡切变线的影响。以上统计结果充分说明西南涡对于陕南暴雨天气的发生发展起着至关重要的作用。同时,存在明显的月季特征,由表 2 可知,9 月发生暴雨的频率最高为 34.3%,其次为 7 月和 6 月,分别为 28.6%和 25.7%。

表 1 陕南地区暴雨过程中不同影响系统发生频次及占比

影响系统	高空槽	西南涡	中低层切变线	低涡切变线	低空急流	冷暖空气	副高	江(黄)淮切变线	台风
频次/次	13	12	10	8	8	3	3	2	1
占比/%	37.1	34.3	28.9	22.9	22.9	8.6	8.6	5.7	2.9

表 2 陕南地区 5—9 月暴雨过程发生频次及占比

月份	5	6	7	8	9	合计
频次/次	1	9	10	3	12	35
占比/%	2.8	25.7	28.6	8.6	34.3	100

## 3 西南涡的中尺度特征

对不同西南涡降水的个例研究发现,部分降水是由于西南涡的中尺度系统直接引起的。陶诗言<sup>[27-28]</sup>根据 1953—1977 年的中国大暴雨资料研究了历史上发生的中国大暴雨,指出暴雨虽然是中尺度现象,却是几种不同尺度天气系统相互作用的结果。造成暴雨的天气系统是尺度为 25~250 km 的中尺度系统,它对暴雨有两个作用:(1)产生强上升运动并造成水汽通量的辐合和明显的位势不稳定层,其强度一般要比天气尺度大 1 个

量级。(2)对积云对流活动起明显的组织与增强作用。在这种 25~250 km 的中尺度系统中,包含有若干尺度为 2.5~25 km 的直接造成暴雨的积雨云团,而 25~250 km 的中系统又是在尺度 250~2 000 km 的系统里生成的。

黄福均等<sup>[29]</sup>对 1979—1987 年 5—9 月发生的西南涡暴雨的研究发现,西南涡暴雨雨团之下有数个中尺度对流系统和中小尺度雨团存在,这些系统可在雷达回波和降水自记的雨强中追踪到,这类中小尺度降水系统活动特征有三。其一,它们活动于西风扰动前的西南季风气流中;其二,初生于水陆交错的江河区域,在盆地内多由南向北或沿江河北移;其三,停留并合并与地形切割的高原东侧边界河口或低层辐合线附近。这些中小尺度对流系统的活动存在明显的日变化。这一点在

陈贵川等<sup>[30]</sup>对发生于2012年7月21日重庆盘龙的特大暴雨的研究中得到了很好的认证,在盘龙的此次降水过程中,对单站多普勒雷达、多站SWAN拼图以及TBB卫星云图的研究表明,仅仅两个小时就完成了超级单体的生消活动,并且在盘龙的小时降水量达到了180.9 mm。中小尺度对流系统的传播方式与我国北方中尺度回波单体产生于原单体东侧的生命史截然不同。初生的中小尺度对流系统的雷达探测较卫星探测有明显的先兆性。

赵玉春<sup>[31]</sup>研究表明2008年7月20—21日西南涡引发的川中特大暴雨由中尺度对流系统(mesoscale convective system, MCS)的活动直接引起;王新敏<sup>[10]</sup>在对此次西南涡向东北移动中造成7月21—23日河南东南部(南阳、信阳、周口、商丘)、山东等地出现的区域性大暴雨的地面风场和中尺度雨团活动研究发现,在西南涡移动路径右前方、低层切变线附近,对应多条中尺度辐合线和多个辐合中心;顾清源等<sup>[32]</sup>利用Barnes带通滤波和非平衡动力强迫的中尺度特征分析方法针对2007年7月9日西南涡诱发的川南特大暴雨中尺度系统活动特征分析发现,特大暴雨过程中西南涡内存在一个向西倾斜的、深厚的 $\beta$ 中尺度低涡;刘瑞芳和赵奎锋<sup>[33-34]</sup>分别对发生在2007年8月6—7日和2009年7月10—11日发生陕南地区的降雨进行了研究,结果表明MCS是造成安康两次暴雨天气过程的直接原因,最强降水出现在MCS的成熟期。

陈忠明等<sup>[7]</sup>对诱发大暴雨天气过程的西南涡进行中尺度滤波分析得出,强烈发展的西南涡在流场和高度场上表现为贯穿对流层的中尺度气旋或低压,是一个准圆形且非对称的中尺度系统。张秀年等<sup>[35]</sup>对8个典型个例低纬高原西南涡暴雨的研究指出,向东南方向移动的西南涡是造成低纬高原暴雨的重要天气系统,并指出中尺度滤波分析是一个重要而有效的工具,特别是通过对流场的滤波可以从大尺度流场中滤出直接造成暴雨的中尺度系统。陈茂强等<sup>[36]</sup>发现暴雨是由西南涡内4个中尺度对流云团,即2个中尺度对流复合体(mesoscale convective complex, MCC)和2

个MCS连续生消造成的,这几个对流云团发展强度依次减弱,时空尺度依次减小。在其开始阶段,有一巨大的中尺度对流复合体(MCC)沿基本气流、高TBB梯度方向发展,是一个向前发展的系统,强降水出现位置与云团发展方向一致,但在时间上滞后,站点上空TBB曲线和降水曲线位相有一致性。师锐等<sup>[37]</sup>利用卫星云图对发生在2014年秋季一次受西南涡影响的暴雨过程研究发现,中尺度系统是暴雨发生的直接原因,在有利的中尺度系统稳定少动的情况下,中尺度对流云团活动异常活跃,在减弱的冷云罩中,与中小尺度对流云团相互嵌套、演变,中尺度对流云团的发展、旺盛导致较强降水的发生。

多项研究表明,西南涡的中尺度系统是造成西南涡暴雨发生的直接原因,大部分西南涡影响下的暴雨伴随着中尺度系统的发生、发展,暴雨发生的位置也同中尺度系统位置相对应。因此研究西南涡中尺度特征,对指导降雨落区的预报有非常重要的作用。

#### 4 总结

西南涡作为重要的暴雨天气系统,对其移动所经之地的天气造成了巨大的影响。作为西南涡东北路径移动时的主要影响区域,陕南地区受其影响明显;而且,该地区地形复杂,降水分布不均匀,极易引发气象灾害。文章着重回顾和总结了西南涡的研究成果,分析其对陕南地区降水的影响,为进一步开展该区域西南涡影响下的暴雨研究提供一定的方向。

(1)对于西南涡源地、生消、移动等特征已取得一定的成果。西南涡在初夏季节活动较为活跃,主要涡源为九龙地区和盆地地区。西南涡呈现近圆形而非对称结构,在不同发展阶段结构不同。成熟阶段的西南涡正涡度可延伸至200~100 hPa以上,且500 hPa以上开始有明显的向西倾斜的结构,并且存在一向西倾斜的中尺度低涡。由于统计标准和所用资料的差异,不同学者的研究存在一定的差异;而且部分低涡生消时间过短,常规观测资料不利于捕捉其变化规律。因此,制定统一的标准,并引入雷达、卫星、高分辨率再分析资料等非常规气象资料对其进行统计有利于进

一步开展对西南涡的特征研究。

(2)西南涡的移动路径主要有偏东路径、东北路径和东南路径,但对其移动机制的研究结论仍不够明确;因此,进一步对西南涡移动机制的研究将是改进西南涡降水预报的重要环节。

(3)秦巴山区对于西南涡的生成无直接作用,但对西南涡的发生、维持、移动和降水落区影响明显。由于以上研究仅基于两次个例,需加强研究以形成具有普适性的研究结论。

(4)西南涡内的 $\beta$ 中尺度系统是影响降水落区和大小的主要因素,但目前结论仍为学者基于单一个例的研究,对于西南涡的中尺度特征的刻画仍缺乏统一的认知。基于一定分类方法对多个西南涡中尺度系统的研究,从而得出较为一致的、具有预报可参考价值的结论尤为重要,需要进行更加深入的研究和讨论。例如,通过对多个不同移动路径、降水量等级、低涡强度和范围的低涡中尺度特征开展针对性分析。

(5)作为陕南暴雨的主要影响系统,西南涡在35次陕南暴雨过程中共有13次为直接影响,8次为低涡切变线影响,说明西南涡对于陕南暴雨的发生发展至关重要。陕南地区地形复杂、降水局地性强,利用雷达、卫星等非常规气象资料开展西南涡影响下降水的研究,能够有效弥补常规观测资料的时空分辨率问题,为预报员开展汛期西南涡暴雨的短时临近预报预警服务提供参考方法或指标。

#### 参考文献:

- [1] 何光碧. 西南低涡研究综述[J]. 气象, 2012, 38(2):155-162.
- [2] 卢敬华. 西南低涡概论[M]. 北京:气象出版社, 1986:58.
- [3] 乔全明,张雅高. 青藏高原天气学[M]. 北京:气象出版社,1994:156.
- [4] 陈启智,黄奕武,王其伟,等. 1990—2004年西南低涡活动的统计研究[J]. 南京大学学报(自然科学版),2007,43(6):633-642.
- [5] FENG X, LIU C, RASMUSSEN R, et al. A 10-yr climatology of Tibetan Plateau Vortices with NCEP climate forecast system reanalysis[J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2014, 53(1): 34-46.
- [6] 谌贵询,何光碧. 2000—2007年西南低涡活动的统计分析[J]. 高原山地气象研究, 2008, 12(1):18-26.
- [7] 陈忠明. 一次强烈发展西南低涡的中尺度结构分析[J]. 应用气象学报, 1998(3):273-282.
- [8] WANG W, KUO Y H, WARNER T T. A diabatically driven mesoscale vortex in the Lee of the Tibetan Plateau[J]. Monthly Weather Review, 1993, 121(9):2542.
- [9] 王新敏,张霞,孙景兰,等. 2008年7月黄淮暴雨过程中西南涡结构特征分析[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(1):54-63.
- [10] 李明,高维英,侯建忠,等. 一次西南涡东北移对川陕大暴雨影响的分析[J]. 高原气象, 2013, 32(1):133-144.
- [11] 陈栋,李跃清,黄荣辉. 在“鞍”型大尺度环流背景下西南低涡发展的物理过程分析及其对川东暴雨发生的作用[J]. 大气科学, 2007, 31(2):185-201.
- [12] 母灵,李国平. 复杂地形对西南低涡生成和移动影响的数值试验分析[J]. 成都信息工程学院学报, 2013, 28(3):241-248.
- [13] 王沛东,李国平. 秦巴山区地形对一次西南涡大暴雨过程影响的数值试验[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2016, 38(3):418-429.
- [14] 冯彩琴,董婕. 陕南地区近47年来气温、降水变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(8): 122-126.
- [15] 王蒙,殷淑燕. 近62年来汉中市极端降水变化研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(5):208-216.
- [16] 白爱娟,施能,方建刚. 陕西省降水量变化的区域特征分析[J]. 高原气象, 2005(4):635-641.
- [17] 杨荆安,孟英杰. 2008年5—9月我国主要暴雨天气过程[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(4):378-382.
- [18] 杨荆安,闵爱荣,廖移山. 2011年4—10月我国主要暴雨天气过程简述[J]. 暴雨灾害, 2012, 31(1):87-95.
- [19] 邓雯,闵爱荣,廖移山. 2012年4—10月我国主要暴雨天气过程简述[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(1): 88-96.
- [20] 张芳华,陈涛,徐珺,等. 2013年4—10月我国主要

- 暴雨天气过程简述[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(1): 87-95.
- [21] 廖移山,汪小康,邓雯,等. 2014年4—10月我国主要暴雨天气过程简述[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(1): 88.
- [22] 陶亦为,于超,张芳华,等. 2015年4—10月我国主要暴雨天气过程简述[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(2): 187-196.
- [23] 赵娴婷,廖移山,闵爱荣,等. 2016年4—10月我国主要暴雨天气过程简述[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(2): 182-191.
- [24] 沈晓琳,陶亦为,张芳华,等. 2017年4—10月我国主要暴雨天气过程简述[J]. 暴雨灾害, 2018(2): 187-196.
- [25] 汪小康,闵爱荣,廖移山. 2018年4—10月我国主要暴雨天气过程简述[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(2): 183-192.
- [26] 闵爱荣,廖移山,邓雯,等. 2019年4—10月我国主要暴雨天气过程简述[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(5): 539-548.
- [27] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社, 1980:31-32.
- [28] 高守亭,赵思雄,周晓平,等. 次天气尺度及中尺度暴雨系统研究进展[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 618-627.
- [29] 黄福均,肖洪郁. 西南低涡暴雨的中尺度特征[J]. 气象, 1989, 15(8): 3-9.
- [30] 陈贵川,湛芸,张勇,等. “12.7.21”西南涡极端强降雨的成因分析[J]. 气象, 2013, 39(12): 1529-1541.
- [31] 赵玉春,王叶红. 高原涡诱生西南涡特大暴雨成因的个例研究[J]. 高原气象, 2010, 29(4): 819-831.
- [32] 顾清源,周春花,青泉,等. 一次西南低涡特大暴雨过程的中尺度特征分析[J]. 气象, 2008, 34(4): 39-47.
- [33] 刘瑞芳,许新田,郭大梅. 安康地区一次突发性大暴雨天气过程成因分析[J]. 陕西气象, 2010(2): 27-30.
- [34] 赵奎锋,胡启元. 秦巴山区东部一次区域性暴雨过程分析[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(10): 4499-4501.
- [35] 张秀年,段旭. 低纬高原西南涡暴雨分析[J]. 高原气象, 2005, 24(6): 941-947.
- [36] 陈茂强,顾清源,汪延波,等. 一次西南低涡特大暴雨的中尺度对流云团特征[J]. 高原山地气象研究, 2008, 28(4): 66-71.
- [37] 师锐,陈永仁. 秋季川东北一次西南低涡大暴雨分析[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(2): 23-29.