

何光碧. 西南低涡研究综述[J]. 气象, 2012, 38(2): 155-163.

西南低涡研究综述^{*}

何光碧

中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072

提 要: 西南低涡是影响我国降水的重要天气系统之一。最初对于西南低涡的研究可以追溯到 20 世纪 40 年代前后。文章主要回顾近半个世纪以来有关西南低涡活动及结构特征, 西南低涡形成维持机制, 西南低涡发展东移机制等方面的研究成果。在此基础上, 指出研究存在的不足, 如对西南低涡的云系特征和雷达回波特征的认识, 不同尺度系统之间的相互作用对西南低涡发生发展的影响, 大气边界层过程如何影响西南低涡发生发展, 西南低涡活动异常机理的研究等, 以便进一步深入开展西南低涡的研究, 提高对此类天气影响系统的认识。

关键词: 西南低涡, 研究, 回顾, 展望

Review of the Southwest Vortex Research

HE Guangbi

Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610072

Abstract: Southwest vortex is one of the main rainfall weather systems in China. The research on southwest vortex can be traced back to about forty years in the twentieth century. First, the review of southwest vortex research on its activities, structures, mechanisms of forming, maintaining and eastwards moving has been presented in the last half century. Then, in order to deepen the research on the southwest vortex and to heighten the understanding of weather systems such as southwest vortex, there are some deficiencies to be pointed out, such as the understanding of southwest vortex cloud system and radar echo characteristics, the effects of systems at different scales on southwest vortex forming and developing, the impact of atmospheric boundary layer on the vortex forming and developing, the study on abnormality mechanics of southwest vortex activities and so on.

Key words: southwest vortex, research, review, prospect

引 言

西南低涡是在青藏高原特殊地形和一定环流条件下, 发生于我国西南地区 700 或 850 hPa 等压面上的气旋性环流或有闭合等高线的低涡, 是一个尺度约为 300~500 km 的中尺度系统, 属 α 中尺度涡旋。西南低涡全年各月都会出现, 以 4—9 月居多, 主要集中在九龙、巴塘、德钦、康定、昌都一带, 其次为四川盆地。低涡生成后有的在源地减弱消

失, 有的能够移出源地, 移出源地的西南低涡以 5—8 月的几率最大^[1-4]。

西南低涡在影响我国降水的天气系统中, 占有相当重要的地位。就西南低涡所造成的暴雨天气的强度、频数和范围而言, 仅次于台风, 许多我国历史上罕见的特大洪涝灾害, 都与西南低涡活动密切相关^[1-2, 5-13]。四川位于西南低涡源地, 受西南低涡影响大, 频数高, 如 1981 年 7 月 11—15 日四川盆地受强烈发展的西南低涡影响, 发生了百年不遇的特大洪灾; 1993 年 7 月 28—30 日四川盆地西南部出现

* 国家自然科学基金项目(40775032, 40965004)和中国气象局成都高原气象研究所科研专项经费(西南低涡研究项目)共同资助

2011 年 5 月 19 日收稿; 2011 年 8 月 16 日收修定稿

作者: 何光碧, 主要从事数值预报技术开发应用与高原气象研究. E-mail: hegb_gaoyuansuo6@163.com

了特大暴雨,峨眉山市 24 小时降水量达 509.5 mm,打破四川 40 年日降水量极值;2005 年 7 月 6—9 日四川东部达州市出现了持续大暴雨天气过程,宣汉县累计降雨量达 320.9 mm,其乡镇雨量累计达 500 mm 左右,西南低涡长时间稳定在四川盆地东北部是造成这次持续大暴雨天气过程的重要原因。西南低涡不仅影响源地的天气,当它外移发展时,影响源地以东地区,如 1974 年 5 月 4—7 日一次西南低涡东移,在湖南、江西两省的部分地区造成暴雨,产生“63.8”河北特大暴雨的重要影响系统之一就是东移北上的西南低涡,1998 年长江流域发生了自 1954 年以来的一次全流域性大洪水,与西南低涡频繁出现及东移活动密切相关。

最初对于西南低涡的研究可以追溯到 20 世纪 40 年代前后^[1]。我国的气象科技工作者针对西南低涡活动及结构特征、形成维持机制、发展东移机制等开展了一系列的研究^[1-54],其研究成果对正确预报强降水,对西南地区及我国东部地区防灾减灾决策具有重要的指导意义。马振锋^[52]、陈忠明等^[53]、刘红武等^[54]曾分别在上世纪末和本世纪初就西南低涡研究总结了关注的不同时期、不同方面的一些研究成果,如陈忠明等总结第二次大气科学试验前后西南低涡研究进展,刘红武等从研究方法上概述西南低涡研究成果。以下主要从近 50 年西南低涡活动的统计分析,西南低涡的结构研究,西南低涡形成的大尺度环流背景及气候成因研究,西南低涡发生发展机制研究,西南低涡移动机制研究,西南低涡与高原低涡、热带气旋相互作用机制研究等六方面给予回顾,并指出西南低涡研究工作存在的不足,以便进一步深入开展西南低涡的研究。

1 西南低涡活动的统计分析

西南低涡活动的统计分析工作是一项基础性工

作,也是非常必要和有意义的工作。这方面的工作开展的比较早,且不定期的有新的时间序列的统计研究成果出来^[1-4,8-12]。表 1 给出部分统计分析结果。尽管统计西南低涡的范围,样本长度不同,西南低涡的标准略有差异,但得到的结论基本一致,如西南低涡活动频繁期在初夏,涡源最为集中在九龙区,其次是四川盆地区,移出涡源的涡以偏东路径居多,即由源地沿长江流域东移入海。但不同分析年份时段得到的结果,还是存在一些差异,如在移出涡频率上,早期四川省气象局的统计结果与陈忠明、谌贵询等的统计结果有出入,前者认为大部分的低涡是能够移出的,后者认为移动类低涡仅是低涡中的少部分。在低涡的季节变化、移动涡的源地分布上,谌贵询与陈忠明的统计结果存在差异,前者认为冬季出涡个数最多,夏季最少,后者的结论正好相反;前者认为移动涡的源地以九龙涡最多,后者认为以盆地涡最多。这些差异是否是由于评判的标准所致?也有可能是由于全球气候变化及人们生存环境变化,从而引起天气系统的一些特征也发生变化。同时,陈忠明等的研究结果还发现,统计分析资料 10 年间,1988 年后康定、马尔康小球测风项目取消后,致使西南低涡源地资料密度降低,1988 年后的低涡总数明显减少。

因此,在统计分析的基础上,在西南低涡源地和主要移动路径上增设观测站点,将有助于监测西南低涡的活动。统一西南低涡活动特征判定指标,将能够更清楚地认识西南低涡气候特征。同时,在统计分析研究工作中也看到,没有西南低涡致灾的评价标准,及相应的西南低涡灾害数据库。因此,将西南低涡活动与相关的灾害性天气进行长时间序列分析,提出西南低涡强度及其灾害的评价标准,建立西南低涡数据库将是很有必要作的基础性研究工作。

表 1 西南低涡统计特征
Table 1 Statistical characteristics of southwest vortex

作者	文献号 (发表年)	资料 年代	范围 (°E/°N)	统计 月份	高频 源地	高频(不) 活跃月	高频(不) 活跃季	高频(不) 活跃年	48 h 以上 生命期	低涡移出 百分率	高频移 动路径	高频移 出季节
陈忠明	[3] (2000)	1983— 1992	100~108/ 26~33	1—12 月	九龙区	(2)7	(冬)夏	(1992) 1983	23%	20.5%	偏东 路径	夏季
谌贵询	[4] (2008)	2000— 2007	100~108/ 26~33	1—12 月	九龙区	(4)1	(春秋)冬	(2005) 2001	15.36%	9.2%	偏东 路径	夏季
高正旭	[13] 2009	1948— 2007	100~108/ 26~33	5—10 月	无	5 月和 6 月	无	(1961) 1998	1.3%~5.1% (不确定)	无	无	无
四川省局	[12] 1986	1970— 1980	西南地区 (不明确)	4—9 月	九龙区	(8)5	无	无	无	71.4%	偏东 路径	无

统计分析还发现,根据文献[3],夏季西南低涡生成,能移出源地的仅为23.8%,1998年是西南低涡活动异常频繁年^[3,7,14],该年汛期有21个西南低涡出现,其中就有15个低涡移出源地。造成西南低涡活动异常的机制是什么,或者说气候变化对西南低涡活动的影响又是如何,是西南低涡研究的一个薄弱部分。

2 西南低涡的结构研究

卢敬华^[1]在“西南低涡概论”一书指出,西南低涡是对流层中、下层的浅薄扰动,呈近圆形而非对称的中性气旋的特征。彭新东等^[16]认为西南低涡对流层低层具有暖心结构,中层则不明显。陈忠明等^[15]对一次强烈发展西南低涡的中尺度结构分析,揭示的西南低涡的三维结构是:在初生阶段是一个500 hPa以下的浅薄天气系统,成熟阶段的西南低涡正涡度可伸展到100 hPa以上,中心轴线垂直,是一个准圆形而非对称的中尺度系统,而且还是一个深厚的暖湿低压系统(但不具暖心结构),低涡在减弱阶段是一个斜压浅薄系统,受冷空气入侵影响,对流层低层低涡为冷性结构。Wang等^[57]的研究表明一个发展成熟的涡可从地面伸展到300 hPa,气旋附近非常潮湿,温度廓线近湿绝热,风值很小,几乎无风切变。韦统建等^[17]用合成方法对移出盆地的西南低涡结构分析指出,西南低涡的温湿场和垂直流场在低涡区明显存在不对称分布,低涡是一个显著的斜压系统。顾清源等^[18]指出西南低涡内存在着一个向西南倾斜的深厚的 β 中尺度低涡,特大暴雨区逐渐向中尺度低涡中心靠近。解明恩等^[19]用大气边界层模式,对一次西南低涡活动进行了Ekman层的流场分析,发现西南低涡行星边界层具有中尺度扰动的特征,在整个气旋环流中有局部的反气旋环流出现,这是850和700 hPa天气图上得不到的,且与边界层诊断分析相符合。邹波等^[22]研究西南低涡活动期的边界层特征是低涡表现出非连续特征。卜玉康等^[20]对西南低涡大气边界层结构的数值模拟得到,西南涡在行星边界层内最大正涡度位于涡旋中部地区,从地面向上涡旋中心正涡度值逐渐增大,并在边界层达到最大;在西南涡的东西两侧有两个次级环流存在,而南北方向则主要表现为南北气流的辐合。赵思雄等^[21]对2004年9月川渝大暴雨期间西南低涡结构分析指出,最大正涡度

值和上升速度值位于850 hPa。

西南低涡的结构研究表明,西南低涡呈近圆形而非对称特性,西南低涡在不同发展阶段其结构是不同的。对于一个典型的西南低涡,初生阶段的西南低涡是一个暖性浅薄天气系统;成熟阶段的强烈发展的西南低涡正涡度可伸展到100 hPa以上,是一个深厚的暖湿低压系统,涡区内动量、层结、垂直运动等呈非对称分布;减弱阶段的西南低涡是一个斜压浅薄系统,对流层低层低涡为冷性结构。西南低涡活动期的边界层结构及其演变非常复杂,加之,西南低涡在不同阶段温湿场、动力场特征还有待更全面地刻画。因此,采用更多的非常规观测资料,如雷达、卫星资料,大气科学试验加密观测资料,采用数值预报模拟技术和资料同化技术,将有助于更细致和客观地揭示西南低涡结构及其演变。

3 西南低涡形成的大尺度环流背景及气候成因研究

在探讨西南低涡形成的大尺度环流背景及气候成因方面,黄福均等^[23,58]用Reed的合成方法,选取14例西南低涡大暴雨个例作合成诊断,得出西南低涡的平均中心位置位于30.4°N、103.3°E,提出西南低涡的环境流场存在“三支气流”的概念模型,即200 hPa上在低涡中心北侧5~7纬距处为一支西风急流,500 hPa上低涡西侧为一支西风槽前的西南气流,700和850 hPa上在低涡东侧3~4纬距处存在一支偏南和偏东的湿急流。这三支气流代表了合成西南低涡的平均背景场。Wu等^[59]指出,伴随中纬度西风带的北支气流,低层季风急流的南支气流和西太平洋副高的东风气流的辐合与地形相互作用,对西南低涡的形成和位置起着重要的作用。王赛西^[24]在对1975—1986年西南低涡生成及其分布状况的统计分析基础上,分析讨论了角动量方程中角动量平流项与西南低涡生成关系,指出角动量平流变化对西南低涡的生成作用。低涡源地正角动量的大量增加为西南涡的形成提供了必须的动力,对西南涡的生成具有一定的促进作用;而该地区角动量减小,则对低涡的形成产生明显的抑制作用。角动量输送变化是造成低涡逐月出现频率不同的不可忽视的动力因素。分析指出角动量平流正值区与低涡出现源地有很大的对应关系。高守亭^[25]采用定常二层模式讨论较小地形及高、低层流场配置对西

南低涡形成的动力作用,指出西南低涡的形成是与盆地、河谷以及其上下气流分层有关的一种定常态。低层的浅薄暖湿西风有利于西南低涡的形成,小型的凸起山脉对西南低涡的形成没有影响。徐祥德等^[26]的研究进一步指出,初夏低层相对薄而稳定的西南暖湿气流与高空干冷偏西气流之间形成稳定的分层流,这种分层流与地形相互作用最有利于涡旋扰动的形成。高正旭等^[14]对近 60 年西南低涡个例的分析表明,当西南低涡发生异常时,高空西风急流的位置会发生明显变化,西南低涡偏多时所对应的西风急流偏南明显,偏少时则偏北明显。沈如贵等^[48]分析了印度季风槽与西南低涡活动关系,发现当印度季风槽比平均位置偏北时,西南低涡的发生效率比其偏南时多两倍以上。夏季,西南低涡的生成并发展东移,主要是在印度季风槽位置偏北的季风环流背景下出现;低涡的生成发展与季风槽的正涡度平流向东输送是密切联系的。叶笃正等^[60]指出,低涡的生成与发展有两个重要条件,其一是高原东侧要有旺盛的偏南气流,使等压面高度因增温降压而不断降低,其二是要有促使低涡生成的引发条件,例如低槽自西北迅速东移,使南北气流相遇发生强烈辐合。同时高原侧边界的摩擦作用也是极有利的条件,这是由于高原东南方的偏南气流受到高原侧边界的摩擦会产生气旋性切变,高原东北方的偏北气流则产生反气旋性切变,因辐合作用产生低涡。

上述“三支气流”的概念模型再配合有利的温湿场,如 850~700 hPa 西南低涡附近和前方偏南气流中平均 $\theta_{se} > 70^{\circ}\text{C}$ 的高能区,而 500 hPa 上的 θ_{se} 大值中心在低涡的西南侧,有利于在低涡东侧的高能位势不稳定区内,产生中小尺度对流单体和复合体,加之低涡西南侧深厚的湿层,从而导致大范围持续暴雨发生,这一概念模型在日常天气预报中得到了很好的应用。西南低涡形成与南支气流输送有很大关系,印度季风槽位置偏北,有利于西南低涡生成,这不仅是印度季风槽输送了正涡度,同时还输送了暖湿气流。基于角动量倾向方程,分析表明角动量平流与低涡出现频率关系密切,角动量平流变化是导致低涡逐月出现频率变化的原因之一。而分层流与地形的相互作用也在一定程度上解释了初夏低涡活跃,盛夏低涡活动减弱的事实。高原东侧边界层摩擦作用普适性地解释了西南低涡为何常出现在高原东侧的西南地区大气边界层内。

4 西南低涡发生发展机制研究

在地形影响西南低涡发生发展机制研究方面,罗四维等^[61-62]指出西南低涡是受青藏高原动力作用影响特有的产物,它集中出现在高原东侧四川盆地附近,由于青藏高原的隆起存在低层西风气流分支从其南北两侧绕过,在南北两支西风的相互作用及在高原上东移低压系统的影响下而产生强度不一的西南涡。李国庆等^[63]也指出青藏高原大地形对西南低涡形成有着重要影响。王其伟等^[27]通过理想条件下的数值模拟,研究了不同气流条件下、不同地形对西南低涡涡源形成的动力影响作用,指出西南低涡的三个涡源形成原因主要是四川盆地与青藏高原和横断山脉相连接的陡峭地形附近由于涡管的伸展加强而产生,四川盆地南侧的横断山脉背风侧的涡度带以及四川盆地北侧沿青藏高原东北侧南移的背风槽所携带的涡度带。在西南低涡形成初期,横断山脉的主要作用是形成其东南侧的涡度带,当该涡度带并入西南低涡时,可以导致西南涡的加强。在西南低涡形成后,西南涡可以促使该涡度带向其靠拢,但当该涡度带向下游移动时,它可以拖带西南低涡东移。西北、西南向的风都不利于西南低涡的形成,而西风条件下西南低涡一般都能形成,但强的西风不利于西南低涡在源地的维持,更易向下游平流而脱离四川盆地地区。

就诸多影响西南涡发生发展机制研究中,黄福均^[58]指出当中层有扰动重叠在低涡上空,扰动后部同时有冷平流从涡的西侧进入时,是低涡演变成斜压涡发展的重要原因。陈忠明^[28]指出,大尺度环境场的散度和由边界层摩擦作用产生的次级环流的积云对流释放的潜热是西南低涡发展的主要因子。李国平等^[29]认为地面感热加热与暖平流对暖性西南低涡形成起着较大的作用,地形与环流的恰当配置与耦合作用是西南低涡生成的主要因素。赵平等^[30]针对一次西南低涡形成过程的数值试验和诊断分析指出,潜热加热不影响西南低涡的形成,只对其起加强作用,潜热加热通过使低涡区气压降低,低层气旋性辐合以及高层反气旋性辐散加强,从而使西南低涡进一步发展。同时潜热作用还有利于西南低涡暖区的形成和维持。赵平等^[31]还对数值试验结果进行涡度方程以及位能、散度风动能和旋转风动能之间的能量转换函数诊断分析,进一步分析地

形和潜热对西南低涡的影响机制。Kuo 等^[64-65]对1981年7月11—15日四川盆地特大暴雨的研究表明,对流涡旋感热和潜热通量辐合引起的加热,其中有一半来自凝结潜热释放,指出与积云对流相伴的凝结潜热释放对西南低涡的发展起着重要作用。Chen 等^[66]的研究也表明凝结潜热释放是低涡维持与发展的重要机制之一。赵玉春等^[45]研究指出地形的动力作用仅能形成浅薄的西南涡,降水凝结潜热的加入才能使西南涡充分发展。盆地周边高大山脉对西南涡的位置分别有不同程度的影响,而盆地周边高大山脉上叠加的中小尺度地形对西南涡和暴雨带的整体位置影响不大。段海霞等^[36]分析凝结潜热对一次西南低涡暴雨影响指出,凝结潜热释放对暴雨区低涡的强度以及低涡向上发展层次的深厚均有非常重要的作用,且在强暴雨发生的时段,凝结潜热释放对中层正涡度发展的作用更加明显。范可等^[37]基于 Hoskins 位涡理论思想从等压面位涡守恒和湿等熵位涡守恒的角度来研究对流层高层位涡扰动对低层西南涡的发生发展影响,发现对流层高层位涡扰动是影响西南涡发生发展的重要因素,它对西南涡的影响表现出它有向南向下倾斜伸展的特点,高层湿等熵位涡面下滑的高度及风场的辐合强度与低层西南涡的发生发展有很好的对应关系。徐亚梅^[33]对1998年7月下旬东移西南低涡引发的长江中下游发生罕见的特大洪涝灾害,分析低空急流对低涡活动影响,认为低空急流突然加强,在四川盆地东北侧引起低层强辐合是西南低涡得以发展的重要原因;低空急流加强引起的低层强辐合产生的潜热释放,导致中层位涡的增加,使得低涡十分深厚;低空急流在降水过程中的另两次加强在西南低涡的南部引起的低层强辐合,弥补了低涡由于低层摩擦引起的旋转减弱,使低涡长期稳定维持。Chen 等^[66]的研究表明低空急流与高层东风带在西南低涡活动及降水期间非常活跃。王智等^[34]对一次西南低涡及其伴随低空急流的发展演变进行了数值模拟,结果表明在长江中下游大巴山地区低空急流先于西南涡东移发展,南风分量在西南低空急流的演变发展过程中起着更为主动的作用,南风分量增大中心位于南风分量中心的前方,促使南风分量中心东移。朱禾等^[35]对夏季一次西南低涡活动的数值模拟分析,认为西南低涡的出现可能是由于低层强风带所造成的气旋性切变和低空气流受地形抬升所引起。陈栋等^[38]研究指出,在“鞍”型大尺度环

流背景下,强西南气流绕流高原东侧直接进入四川盆地,而弱西南气流则绕流云贵高原输送进入四川盆地东部,受地形的阻挡和西伸的西太平洋副热带高压的作用在四川盆地东部形成向北的急流辐合带,盆地上空的低层不断聚集季风气流输送的大量暖湿空气,而当高层有冷干空气侵入,从而导致盆地内低涡系统强烈发展。吴国雄等^[32]提出了西南低涡形成的 SVD(倾斜涡度发展)机制,认为由于地形作用而使得等熵面倾斜是 SVD 发生的重要条件,西南季风气流北上与高原地形相互作用形成较强的南风垂直切变,两者结合导致 SVD 发生,垂直涡度快速增长。邹波等^[22]指出大气低层的非平衡动力强迫通过激发辐合和正涡度增长,进而促进西南低涡的发展,对流层中层的正涡度平流强迫加剧了低涡的发展。程麟生等^[5]对“81.7”四川暴雨期西南涡生成和发展分析指出,高低空气旋性涡度中心在四川盆地附近上空的叠加和耦合是西南涡在成熟阶段强烈发展的一种主要物理机制。并且指出,平均涡源和地形强迫对西南涡的初生和维持是很重要的,相互作用涡源对西南涡的持续发展起着决定作用,而纯扰动涡源在西南涡强烈发展的后期有其贡献。

大气环流与地形的相互作用不仅对低涡的形成,而且对其维持都有着重要的影响。凝结潜热释放、低空急流的形成与维持均有利于低涡的发展。高层位涡扰动机制、倾斜涡度发展机制和大气非平衡强迫机制都较好地解释了西南低涡的发生发展,对这些机制的认识还需要在多个个例分析中加以应用。由于西南低涡是在特定地区生成的中尺度系统,虽然关于地形和其他因素对西南低涡形成影响已经作了许多研究,但地形与环流的恰当配置与耦合作用研究仍然不足。众所周知,凝结潜热释放与大气的对流活动及所带来的降水密切相关,现在的问题是降水促进了低涡的发展还是低涡促使了降水的发生?目前关注点可能应该放在降水发生前西南低涡的发展机制研究上,以及降水发生后凝结潜热释放能够多大程度加强西南低涡并使西南低涡维持多久等问题的研究上,这有助于做好对西南低涡及所带来降水的预报。此外,从以上研究工作中也看到,冷暖平流和湿空气输送对低涡的发生发展研究相对较少。

5 西南低涡移动机制研究

西南低涡移动机制研究非常重要,西南低涡移

出源地,将影响下游地区的天气。

叶笃正等^[60]指出位于槽的底部或前部,离锋区较近的低涡,小股冷空气能在涡生成后 1~2 天内侵入,涡得以发展东移,由于涡位于槽前部的暖湿气流中,在槽前西南气流引导下向东北方向移动。而位于较均一暖区中的西南低涡,对应 500 hPa 较宽的暖脊中,常伴有切变线配合,从而引导 700 hPa 低涡东移。陈忠明等^[28,49]利用两层模式将环境场与扰动场分开,得到了环境场及其分布特征对西南低涡移动的影响,认为西南低涡的移动受到许多因子影响,其中环境流场的引导起着较重要作用,并进一步用正压模式讨论了低涡结构的非对称性及其与环境的相互作用是导致低涡移动偏离引导气流的一个重要原因,经向流的存在使得低涡朝着最大风速区风向右偏一小角的方向移动,这与台风沿最大风速区风向移动的情况类似。实际大气中,低涡的结构常常是风场环流近圆形,风速分布非对称,特别是在低涡发展时期,预报员发现,当低涡东北象限出现偏东南大风时,低涡常向偏北方向缓慢移动,有时甚至停止少动,造成川西发生持续性暴雨天气,而当低涡东南象限出现西南大风时,低涡向东北方向移动较快,暴雨天气也由川西较快地转移到川东北,这两种低涡暴雨的典型特征,可能与低涡结构非对称性使低涡产生一个偏北和偏东北方向的移速有关。丁治英等^[50]选取的个例发生在 1981—1987 年 4—7 月西南涡,通过对发展东移和不发展东移的西南涡的物理量以及动能的合成诊断发现:移出涡前为暖平流,涡后为冷平流,高层为暖平流控制,西南风低空急流较强,低层以辐合为主,上升运动区位于低涡的东北部;移出涡在 200 hPa 有较弱的负涡度平流与之对应;移出涡扰动动能的制造大于消耗,低涡移出后积云对流为维持低涡的主要因子。丁治英等^[51]对一次西南低涡的数值模拟得到,积云对流因子对西南低涡的移动有一定的影响。当冷暖平流较弱时,强大的积云对流可使低涡附近的西南风分量加大,促使低涡东部负涡度加大,不利于低涡东移。高空冷暖平流强弱对低涡的移动影响很大,当低涡附近冷暖平流较强时有利于低涡东移。卢敬华等^[39]通过对个例进行 6 层斜压模式的数值计算和诊断分析,认为 700 hPa 高度上物理量场不均匀分布,使西南涡向 700 hPa 辐合中心、正涡度平流增大的方向及动量垂直涡旋通量的旋度中心移动;西南低涡的移动很大程度上取决于引导气流的作用;700 hPa

高度附近大气的斜压性强度的分布不均匀,将影响低涡的移动方向。潘旻等^[40]对 1991—2004 年夏季(6—8 月)西南四川盆地的低涡活动进行统计分类,分析了移动类低涡与停滞类低涡环流背景三维空间结构的差异以及气象要素偏差分布特征,总结出影响低涡东移的三维环流结构的气候学特征:东亚中纬度地区对流层中高层的冷空气入侵造成中高层气温偏低,位势高度降低,伴随冷偏差中心南侧 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 由对流层顶至 850 hPa 都出现偏强西风,最大的西风偏差位于长江下游地区上空 200 hPa。一方面,高层风速差异的纬向梯度加强了长江中游地区的高空辐散,在西南低涡东部形成有利于降水和气旋性环流发展的动力抬升机制。另一方面,对流层低层的西风偏差在青藏高原南麓至我国东部长江以南形成一条异常的水汽输送带,加强了低涡南侧的偏西风水汽输送作用,为低涡东部的降水潜热反馈作用提供了充足的水汽。西南低涡在这样有利的环流形势和水汽条件下更容易移出盆地。杨帅等^[40]研究梅雨暴雨中高低空急流与西南涡的活动,发现高空急流的走向与西南涡的活动关系密切,当我国东部位于西北风急流时,西南低涡稳定少动;位于西风急流时,西南涡快速东移;位于西南风急流时,西南涡加强,移速减慢。王新敏等^[67]认为冷空气侵入路径是影响西南涡发展、移动的关键。

环境场的引导气流(高空急流、500 hPa 气流)对西南低涡的移动起着重要的作用,低涡的非对称结构与环境流场的相互作用机制可以合理地解释低涡移动。冷空气入侵、风场分布的不均匀性以及物理量场分布的不均匀性使低涡易朝着正涡度中心、辐合中心和冷暖平流中心(取决于冷暖空气势力强弱)移动。西南低涡是中尺度系统,可进一步加强物理量计算分析,并结合数值预报产品,探索物理量与西南低涡移动和发展关系,基于物理量变化的西南低涡移动发展机理和可预报性。

6 西南低涡与高原低涡、热带气旋相互作用机制研究

早在 20 世纪 80 年代中期,刘富明等^[42]对高原天气系统与背风坡浅薄天气系统耦合作用的典型——高原低涡与西南低涡的相互作用这一问题进行了开拓性研究,提出了青藏高原—四川盆地垂直涡旋耦合作用的观点,认为当两者处于非耦合状态时,

抑制盆地系统发展;当两者成为耦合系统后,激发盆地系统发展与暴雨发生。程麟生等^[5]的研究也表明,高低空气旋涡度中心在四川盆地附近上空的叠加和耦合是西南涡在成熟阶段强烈发展的一种主要物理机制。陈忠明等^[43]进一步发展了此观点,加深了两者的相互作用的认识,指出 500 hPa 高原低涡前部强的正涡度平流与 850 hPa 四川盆地浅薄低涡区弱的正涡度平流在四川盆地高空形成垂直耦合,上下涡度平流强弱不同造成的垂直差动涡度平流强迫将激发 500 hPa 以下的上升运动与气旋性涡度加强,是盆地浅薄涡旋系统发展的一种动力机制。高原低涡与盆地浅薄低涡区内大气运动非平衡负值垂直叠加,其强迫作用同时激发出气流的辐合增长,也是导致高原低涡与盆地浅薄西南低涡共同发展的一种机制。周春花等^[44]针对个例作的高原涡与西南涡相互作用暴雨天气过程的诊断分析,指出当两者在经向方向发生耦合,上下涡度平流不同造成垂直差动,将激发 500 hPa 以下的上升运动与气旋性涡度加强,使得 500 与 700 hPa 涡心正涡度值的增大近 1 倍。赵玉春等^[45]对 2008 年 7 月 20—21 日一次高原涡东移诱生西南涡并引发川中特大暴雨的天气过程个例研究指出,高原涡形成后沿高原东北侧下滑,在四川盆地诱生出西南涡。高原涡的发展与否在很大程度上决定西南涡能否形成。

在对热带气旋与西南低涡相互作用的研究中,陈忠明等^[46]揭示出中低纬系统相互作用在促进西南低涡发展中所起的一些重要作用,得到活跃于南海的热带气旋,可通过其北侧偏东南低空强风带的向北伸展,与四川盆地西南低涡东侧的偏南气流贯通,实现两者的直接相互作用,建立水汽和能量输送带。热带气旋与西南低涡的相互作用通过改变低涡邻域内的风压场分布,使大气运动的非平衡性质发生改变,促进低涡中心及其东部非平衡负值增强,激发低涡发展。两者的相互作用所建立的能量输送带,通过改变低涡邻域内的假相当位温平流场的分布与风垂直切变,使两者的耦合作用激发涡区内辐合持续增长,并显著影响着低涡的结构,使西南低涡变成一个层结、温湿、动量等分布极不对称的系统。周国宾等^[47]对 2004 年 9 月初发生在川渝地区的西南涡影响下的特大暴雨分析指出,西南低涡生成后,由于受台风的阻塞影响,低涡移速变慢,强度增强,生命期延长,台风东北侧的东南气流在西南涡的东南侧转为西南气流,产生气流合并而使水汽聚集,造

成西南涡东侧特大暴雨天气过程。

事实上许多西南低涡引发强降水的天气过程个例都表明,西南低涡与高原低涡和热带气旋有着密切的关系。当西南涡与高原低涡耦合时,西南涡与高原低涡都得到发展;当热带气旋登陆西进北上时,一方面对西南低涡有阻挡作用,另一方面输送水汽和能量,使低涡得以发展。但西南低涡与其他天气系统如西风槽、切变线、副热带高压、南亚高压等不同尺度系统之间相互作用关系又如何,将是深入开展西南低涡研究的又一方面。

7 结束语

以上回顾了西南低涡活动及结构特征、西南低涡形成维持机制、西南低涡发展东移机制、西南低涡与中低纬度气旋相互作用机制等方面研究工作,取得了西南低涡活动基本事实,如涡源最为集中在九龙区,低涡活动高频期在初夏,低涡东移以偏东路径为主等,西南低涡呈准圆形非对称结构特征,地形与环流配置对低涡的形成起着重要的作用,凝结潜热释放有利于低涡的发展,冷空气入侵、引导气流与低涡非对称结构对低涡移动影响,中低纬气旋对西南低涡加强维持作用等诸多方面的丰硕成果。

西南低涡是一个中尺度系统,是特殊地形与环流相互作用的产物,要真正揭示西南低涡活动特征、发生发展的热力学和动力学机制,还需要有更多更细的监测资料,做更多更细的分析研究工作。2010 年 6 月 21 日至 7 月 31 日成都高原气象所联合武汉暴雨所开展了西南低涡活动频繁期加密观测试验^[68],获得的观测资料在科研业务工作中(数值模拟效果的检验、日常天气预报)发挥了积极的作用。因此,针对目前高原气象中西南低涡研究的薄弱环节,首先应解决观测资料不足这一关键问题。充分发挥业务观测网的作用,适度开展针对性强的科学试验是非常必要和有意义的。

由于基础工作薄弱,到目前为止,还没有关于西南低涡强度及其灾害的评价标准,及相关的西南低涡数据库系统。在统一西南低涡统计分析标准的基础上,将西南低涡活动与相关的灾害性天气,如暴雨、大风等进行长时间序列分析,提出西南低涡强度及其灾害的评价标准,建立西南低涡数据库将是很有必要做的基础性研究工作。

回顾以往的研究成果,不难发现西南低涡研究

仍然还存在许多不足,如对西南低涡的云系特征和雷达回波特征的认识,不同尺度系统之间的相互作用对西南涡发生发展的影响,大气边界层过程如何影响西南低涡发生发展,有利于西南低涡形成的大气环流形态特征,冷暖平流和干湿空气输送对低涡的影响,西南低涡活动异常机理的研究等。

因此,通过加强西南低涡大气观测科学试验,充分利用现有常规与非常规观测资料,资料同化融合技术、数值模拟与诊断分析技术,统一西南低涡评定标准,建立西南低涡灾害数据库,开展西南低涡活动异常机制研究,深入探讨西南低涡的动力、热力机制,如西南低涡的边界层特征、能量锋、冷暖空气活动、干湿空气输送等对西南低涡形成发展影响,高、低空环流与地形配置对西南低涡形成影响,西南低涡与其他天气系统如西风槽、切变线、副热带高压、南亚高压等不同尺度系统之间相互作用机制,西南低涡与物理量关联及机理研究等,将丰富西南低涡的研究成果,揭示西南低涡活动的新事实,从而提高对西南低涡的预测能力,以及西南低涡引发的灾害性天气预报水平,将有助于提高我国此类系统所带来的灾害性天气预报预测能力。

参考文献

- [1] 卢敬华. 西南低涡概论[M]. 北京:气象出版社,1986:58.
- [2] 乔全明,张雅高. 青藏高原天气学[M]. 北京:气象出版社,1994:156.
- [3] 陈忠明,闵文彬. 西南低涡的统计研究. 第二次青藏高原大气科学试验理论研究进展[J]. 气象出版社,2000:268-378.
- [4] 湛贵询,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,2008,28(4):59-65.
- [5] 程麟生,郭英华. “81.7”四川暴雨期西南涡生成和发展的涡源诊断[J]. 大气科学,1988,12(1):18-26.
- [6] 钱正安,顾弘道,颜宏,等. 四川“81.7”特大暴雨和西南涡的数值模拟[J]. 气象学报,1990,48(4):415-423.
- [7] 陈忠明,徐茂良,闵文彬,等. 1998 年夏季西南低涡活动与长江上游暴雨[J]. 高原气象,2003,22(2):162-167.
- [8] 朱官忠,黄景华,官凤山. 影响山东的西南低涡统计分析[J]. 山东气象,1994,54(1):1-6.
- [9] 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),2007,43(6):633-642.
- [10] 刘国忠,丁治英,贾显锋,等. 影响华南地区西南低涡及致洪低涡活动的统计研究[J]. 气象,2007,33(1):45-50.
- [11] 将国华,徐兵甲,黄福镇. 清远地区汛期西南低涡型暴雨统计特征[J]. 广东气象,2008,30(4):24-26.
- [12] 孙军,周兵,宗志平,等. 重庆开县雷击事件天气背景分析[J]. 气象,2010,36(3):70-76.
- [13] 周慧,崔应杰,胡江凯. T639 模式对 2008 年长江流域最大灾害性降水天气过程预报性能的检验分析[J]. 气象,2010,36(9):60-67.
- [14] 高正旭,王晓玲,李维京. 西南低涡的统计特征及其对湖北降水的影响[J]. 暴雨灾害,2009,28(4):302-312.
- [15] 陈忠明,廖强,闵文彬. 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,1998,9(3):273-282.
- [16] 彭新东,程麟生. 高原东侧低涡切变线发展的个例数值研究:Ⅱ中尺度数值模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学),1994,30(1):124-131.
- [17] 韦统键,薛建军. 影响江淮地区的西南低涡中尺度结构特征[J]. 高原气象,1996,14(4):456-463.
- [18] 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.
- [19] 解明恩,琚建华,卜玉康. 西南低涡 Ekman 层流场特征分析[J]. 高原气象,1992,11(1):31-38.
- [20] 卜玉康,琚建华,先泽进,等. 西南低涡大气边界层结构的数值模拟[J]. 云南大学学报(自然科学版),1993,15(4):360-366.
- [21] 赵思雄,傅慎明. 2004 年 9 月川渝大暴雨期间西南低涡结构及其环境场分析[J]. 大气科学,2007,31(6):1059-1075.
- [22] 邹波,陈忠明. 一次西南低涡发生发展的中尺度诊断[J]. 高原气象,2000,19(2):141-149.
- [23] 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.
- [24] 王赛西. 西南低涡形成的气候特征与角动量输送的关系[J]. 高原气象,1992,11(2):144-151.
- [25] 高守亭. 流场配置及地形对西南低涡形成的动力作用[J]. 大气科学,1987,11(3):263-271.
- [26] 徐祥德,高守亭. 外源强迫与波流作用动力学原理[M]. 北京:海洋出版社,2002:172-183.
- [27] 王其伟,谈哲敏. 地形对西南低涡涡源形成的动力影响作用[D]. 中国科技论文在线.
- [28] 陈忠明. 环流场作用与西南低涡移动的初步分析[J]. 高原气象,1989,8(4):301-312.
- [29] 李国平,万军,卢敬华. 暖性西南低涡形成的一种机制[J]. 应用气象学报,1991,2(1):91-99.
- [30] 赵平,孙淑清. 一次西南低涡形成过程的数值试验和诊断 I:地形动力作用和潜热作用对西南低涡影响的数值试验对比分析[J]. 大气科学,1991,15(6):46-52.
- [31] 赵平,胡昌琼. 一次西南低涡形成过程的数值试验和诊断 II:涡度方程和能量转换函数的诊断分析[J]. 大气科学,1992,16(2):177-184.
- [32] 吴国雄,刘环珠. 全型垂直涡度倾向方程和倾斜涡度发展[J]. 气象学报,1999,57:1-14.
- [33] 徐亚梅. 低空急流的加强对深厚西南低涡发展及稳定维持的作用[J]. 浙江大学学报(理学版),2003,30(1):98-102.
- [34] 王智,高坤,翟国庆. 一次与西南低涡相联系的低空急流的数值研究[J]. 大气科学,2003,27(1):75-85.
- [35] 朱禾,邓北胜,洪洪. 湿位涡守恒条件下西南低涡的发展[J]. 气象学报,2002,60(3):343-351.
- [36] 段海霞,陆维松,毕宝贵. 凝结潜热与地表热通量对一次西南

- 低涡暴雨影响分析[J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1315-1321.
- [37] 范可, 琚建华, 寿绍文. 位守恒原理在中尺度低涡降水中的应用研究[J]. 云南大学学报, 2001, 23(5): 374-378.
- [38] 陈栋, 李跃清, 黄荣辉. 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.
- [39] 卢敬华, 雷小途. 西南低涡移动的初步分析[J]. 成都气象学院学报, 1996, 11(1): 40-49.
- [40] 潘涛, 李建, 宇如聪. 东移西南低涡空间结构的气候学特征[J]. 气候与环境研究, 2011, 16(1): 60-70.
- [41] 杨帅, 丁治英, 徐海明. 梅雨暴雨中高低空急流与西南涡的活动[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(1): 122-128.
- [42] 刘富明, 杜文杰. 触发四川盆地暴雨的高原涡的形成和东移[G]. 下半年青藏高原对我国天气的影响. 北京: 科学出版社, 1987: 123-134.
- [43] 陈忠明, 闵文彬, 缪强, 等. 高原涡与西南低涡相互耦合作用的个例研究[J]. 高原气象, 2004, 23(1): 75-80.
- [44] 周春花, 顾清源, 何光碧. 高原涡与西南涡相互作用暴雨天气过程的诊断分析[J]. 气象科技, 2009, 37(5): 538-544.
- [45] 赵玉春, 王叶红. 高原涡诱发西南涡特大暴雨成因的个例研究[J]. 高原气象, 2010, 29(4): 819-831.
- [46] 陈忠明, 黄福均, 何光碧. 热带气旋与西南低涡相互作用的个例研究[J]. 大气科学, 2002, 26(3): 353-360.
- [47] 周国宾, 沈桐立, 韩余. 重庆“9.4”特大暴雨天气过程数值模拟分析[J]. 气象科学, 2006, 26(5): 572-577.
- [48] 沈如贵, 林新彬, 夏志强, 等. 印度季风槽的活动对我国西南低涡形成及发展的作用[J]. 中山大学学报, 1983(2): 64-72.
- [49] 陈忠明, 徐裕华. 非对称结构影响西南低涡移动的初步研究[J]. 四川气象, 1991, 11(3): 1-6.
- [50] 丁治英, 吕君宁. 西南低涡动态的合成诊断[J]. 高原气象, 1991, 10(2): 156-165.
- [51] 丁治英, 吕君宁. 积云对流与西南低涡的活动[J]. 南京气象学院学报, 1992, 15(3): 428-435.
- [52] 马振锋. 近十年来西南低涡研究进展. 大气科学应用与研究(五)[M]. 北京: 气象出版社, 1993, 117-125.
- [53] 陈忠明, 闵文彬, 崔春光. 西南低涡研究的一些新进展[J]. 高原气象, 2004, 23(增刊): 1-5.
- [54] 刘红武, 李国平. 近三十年西南低涡研究的回顾与展望[J]. 高原山地气象研究, 2008, 28(2): 68-72.
- [55] 顾清源, 师锐, 徐会明. 移出与未移出高原的两类低涡环流特征的对比分析[J]. 气象, 2010, 36(4): 7-15.
- [56] 尤红, 肖子牛, 王曼, 等. 2008 年“7.02”滇中大暴雨的成因诊断与数值模拟[J]. 气象, 2010, 36(1): 7-16.
- [57] Wang Wei, Kuo Ying-hwa, Thomas T W. A diabatically driven mesoscale vortex in the lee of the Tibetan Plateau[J]. Mon Wea Rev, 1993, 121: 2542-2561.
- [58] 黄福均. 西南低涡的合成分析[J]. 大气科学, 1986, 10(4): 402-408.
- [59] Wu Guoxiong, Chen Shoujun. The effect of mechanical forcing on the formation of a mesoscale vortex[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1985, 111: 1049-1070.
- [60] 叶笃正, 高由禧, 等. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 115-121.
- [61] 罗四维. 青藏高原东侧动力性低涡形成机理的分析[J]. 气象科技, 天气分析预报副刊, 1977: 54-65.
- [62] 罗四维, 等. 青藏高原及其邻近地区几类天气系统的研究[M]. 北京: 气象出版社, 1992: 56-96.
- [63] 李国庆, 陈瑞荣, 杨广基, 等. 青藏高原东南部低涡的初步模拟试验[J]. 中国科学, 1976, (3): 286-294.
- [64] Kuo Ying-Hua, Cheng Linsheng, Bao Jian-Wen. Numerical simulation of the 1981 Sichuan flood. Part I: Evolution of a mesoscale southwest vortex[J]. Mon Wea Rev, 1988, 116: 2481-2504.
- [65] Kuo Ying-Hwa, Cheng Linsheng, Anthes R A. Mesoscale analyses of the Sichuan flood catastrophe, 11-15 July 1981[J]. Mon Wea Rev, 1986, 114: 1984-2003.
- [66] Chen Shoujun, Lorenzo Dell'Oso. Numerical prediction of the heavy rainfall vortex over eastern Asia monsoon region[J]. J Met Soc Japan, 1984, 62(5): 730-747.
- [67] 王新敏, 宋自福, 张霞, 等. 一次西南涡路径预报偏差分析及数值模拟[J]. 气象, 2009, 35(5): 18-25.
- [68] 李跃清, 赵兴炳, 邓波. 2010 年夏季西南涡加密观测科学试验[J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(4): 80-84.