

# 西南涡研究和观测试验回顾及进展

李跃清<sup>1</sup> 徐祥德<sup>2</sup>

(1 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072;

2 中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要:** 西南涡是我国最主要的灾害性天气系统之一, 对西南涡及其影响的研究和预报, 一直是天气学领域的重点和难点。从西南涡研究和观测试验的回顾及10年来的进展两个方面, 系统总结了国内外关于西南涡系统及其降水影响的主要成果; 重点讨论了西南涡研究与应用存在的基础数据、中尺度特征、演变机理、天气影响和预报技术等主要问题; 并且, 强调了深入开展西南涡中尺度分析研究, 尤其是其观测布局试验的重要性; 最后, 指出了基于与西南涡结构、演变和影响尺度匹配的观测系统、多源数据、分析技术和研究理论, 加强西南涡及其影响的中尺度气象学观测、试验、理论和应用的综合研究是其未来的重要发展方向。

**关键词:** 西南涡, 科学研究, 观测试验, 发展方向

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.018

## A Review of the Research and Observing Experiment on Southwest China Vortex

Li Yueqing<sup>1</sup>, Xu Xiangde<sup>2</sup>

(1 Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu/Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin

Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072 2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** The Southwest China vortex is one of the most important severe weather systems in China. The research and forecasting of Southwest China vortex and its influences on weather are always the key and difficult points in weather science. This paper systematically summarizes major advances in both aspects of researching and observing experiments about the Southwest China vortex and precipitation in recent ten years, and focuses on the main problems, such as basic data, mesoscale feature, evolution mechanism, weather influence and prediction technology. Furthermore, we emphasize the importance to carry out the mesoscale research of Southwest China vortex, specially on the observing-layout experiments. Finally, we point out that it is an important development direction in the future to strengthen the comprehensive research on mesoscale meteorology, including the observing system, multi-source data, analytical technique and theory research that match with the scales of Southwest China vortex.

**Keywords:** Southwest China vortex, scientific research, observing experiment, development direction

### 0 引言

西南低涡(简称西南涡)是影响我国夏半年降水天气过程的一个相当重要的影响系统,西南涡暴雨也是中国暴雨中非常复杂、富有特色的暴雨现象。

研究表明,青藏高原不仅是大地形和抬高热源,对我国、亚洲、北半球乃至全球的天气、气候变化都有着极其重要的影响<sup>[1-4]</sup>,而且其东侧陡峭复杂地

形的作用,使该区域成为我国中小尺度天气系统异常活跃并东移影响的一个中心<sup>[5-8]</sup>。而西南涡作为其中一个非常重要的高原灾害天气系统,是在青藏高原复杂地形与大气环流相互作用下,发生于我国西南地区(26°—33°N, 100°—108°E)700或850hPa等压面的中尺度气旋式闭合低压系统<sup>[5]</sup>,它的发生、发展及其移动往往引起下游我国广大地区异常强降水过程,并带来严重的暴雨洪涝灾害<sup>[5]</sup>。因此,对于灾害性天气系统西南涡活动及其影响的研究和预报,一直是我国灾害天气领域的重点和难点。

本文在西南涡及其影响认识的基础上,从西南涡研究和观测试验的回顾、近10年来的进展两个方面,全面系统总结了西南涡及其影响研究的基本状况,分析了其存在的主要问题,并指出了其未来发展的重点

收稿日期:2015年9月6日;修回日期:2015年12月12日

第一作者:李跃清(1960—),Email:yueqingli@163.com

资助信息:国家自然科学基金项目(41275051,91337215);国家

重点基础研究发展计划项目(2012CB417202);

公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406001,

GYHY201006053)

方向, 以进一步提升我国西南涡系统及其天气影响的理论水平与业务技术。

## 1 回顾及进展

长期以来, 通过观测分析、诊断研究、数值模拟, 以及科学试验等方法, 对西南涡已开展了不少卓有成效的分析研究, 取得了一些重要的进展, 尤其是在关于西南涡的热力与动力结构、天气与气候特征、发生发展与形成机理、西南涡的影响与预报、西南涡观测试验等方面都有新的认识<sup>[5, 9-13]</sup>。下文, 首先对21世纪之前西南涡研究和观测试验成果做一重点回顾, 然后总结21世纪近10年来西南涡研究和观测试验的主要进展。

### 1.1 前期研究回顾

在西南涡活动与结构方面, 认识到西南涡全年各月都会出现, 以4—9月居多, 形成于700hPa (或850hPa), 水平尺度约300~500km, 为 $\alpha$ 中尺度涡旋, 生成初期是一个浅薄系统, 生命史一般低于48h, 但少数发展东移后可达7d。主要集中在九龙、巴塘、德钦、康定、昌都一带(28°—34°N, 97°—102°E), 通常称为“九龙涡”, 其次为四川盆地, 又称为“盆地涡”。其移动路径主要有偏东、东南和东北路径三个方向, 其中偏东移动是主要路径<sup>[5-6, 14]</sup>。陶诗言等<sup>[14]</sup>通过大量个例分析得到, 西南涡在垂直方向上较浅薄, 形成初期700hPa出现气旋环流, 而500hPa、300hPa常为高压区或高压脊。并发现“雅布”—九龙地区、黑河地区和四川盆地是西南涡三个最易发生的源区。卢敬华<sup>[5]</sup>考虑了高原涡后进一步指出: 西南涡源地主要集中于两个地区: 一是九龙、巴塘、康定、德钦一带, 二是四川盆地, 并较系统地分析总结了西南涡形成、发展和移动等主要特征。解明恩等<sup>[15]</sup>的数值模拟发现, 700hPa西南涡在边界层内具有较复杂的流场结构, 整个气旋式环流的局部存在反气旋式环流, 形成了上升与下沉运动的交替出现。陈忠明等<sup>[16]</sup>通过中尺度滤波得到, 强烈发展的西南涡是一个十分深厚的系统, 可伸展到100hPa, 同时也是一个非对称的中尺度系统。彭新东等<sup>[17]</sup>通过对高原东侧低涡的分析认为, 西南涡具有暖湿的中心结构。韦统健等<sup>[18]</sup>通过对3次西南涡过程的合成分析指出, 西南涡的温湿场和垂直流场在低涡区呈现明显的不对称分布, 低涡是一个显著的斜压系统。

在西南涡演变与机制方面, 王赛西<sup>[19]</sup>发现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, 角动量平流正值区与低涡出现源地有很好的对应关系。刘富明等<sup>[20]</sup>指出, 西南涡与高原涡处于

非耦合时, 将抑制背风坡系统发展, 当处于耦合时, 会激发背风坡系统发展。西南涡上空有高原涡活动, 有利于西南涡的发展加强, 提出了西南涡与高原涡垂直耦合作用的观点。高守亭<sup>[21]</sup>认为西南涡的形成与盆地、河谷和气流分层有关。大气低、高层气流形成的稳定分层流与地形的相互作用最有利于涡旋扰动的形成, 从环流与地形的相互作用解释西南涡活动的动力学机制。吴国雄等<sup>[22]</sup>提出了西南涡形成的倾斜涡度发展(SVD)机制, 指出由于地形作用引起等熵面倾斜是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。李国平等<sup>[23]</sup>指出, 地面感热加热与暖平流通过产生正值非热成风涡度, 对暖性西南涡形成起着重要作用。

在西南涡数值模拟方面, 郑庆林等<sup>[24]</sup>的数值模拟表明, 青藏高原地形作用是西南涡发生发展的动力因子。Kuo等<sup>[25]</sup>通过数值模拟指出, 1981年7月中旬, 四川大范围的大暴雨和特大暴雨天气, 青藏高原东侧西南涡是造成其严重暴雨洪涝灾害的重要天气系统。杨洋等<sup>[26]</sup>的数值模拟得到, 冷空气的补充是西南涡发生发展的重要条件。赵平等<sup>[27]</sup>基于数值模拟指出, 地形动力作用对高原南侧的西南气流有着明显的阻挡作用, 并决定着西南涡的形成, 潜热通过加强西南涡上空高层辐散和低层辐合使低涡发展。彭新东等<sup>[28]</sup>指出, 青藏高原地形对于西南涡在四川盆地700hPa的维持非常必要。王革丽等<sup>[29]</sup>的敏感性数值试验得到, 西南涡降水对于青藏高原及周边地区的植被覆盖和土壤湿度非常敏感。

在西南涡天气影响方面, 竺可桢早在1916年就注意到了西南涡活动与中国夏半年降水的密切关系。陶诗言等<sup>[14]</sup>、卢敬华<sup>[5]</sup>指出, 发展东移的西南涡能引发我国长江流域、淮河流域、华北、东北、华南等下游广大地区的暴雨等灾害性天气。陶诗言等<sup>[30]</sup>分析了1991和1998年长江流域的持续性大暴雨洪水灾害, 卫星资料表明, 造成异常暴雨的一些涡旋系统, 其胚胎可以追溯到高原上空的对流云团。李国平等<sup>[31]</sup>指出, 西南涡暴雨的发展趋势与湿位涡变率的演变趋势基本一致, 负的湿位涡对应暴雨的发展, 湿位涡由负转正预示暴雨的减弱和结束, 有一定指示意义。陈忠明等<sup>[32]</sup>的合成分析表明, 中尺度西南涡先于暴雨出现, 暴雨未来发生在低涡东部的偏南暖湿气流中, 低层的非平衡强迫作用对于暴雨具有指示意义。李跃清等<sup>[33]</sup>通过西南涡暴雨的合成分析得到, 与青藏高原地形相关的边界层风场的动力作用是西南涡暴雨产生的一个

重要原因。王作述等<sup>[34]</sup>分析指出，西南涡造成的暴雨天气强度、频数和范围仅次于台风，是我国位居第二的暴雨天气系统。图1是2012年7月8—15日一次西南涡东移影响过程，造成了四川、重庆、贵州、云南、甘肃、宁夏、陕西、河南、安徽、湖北、湖南、江西、山西、山东、江苏和浙江等地暴雨洪涝灾害天气。

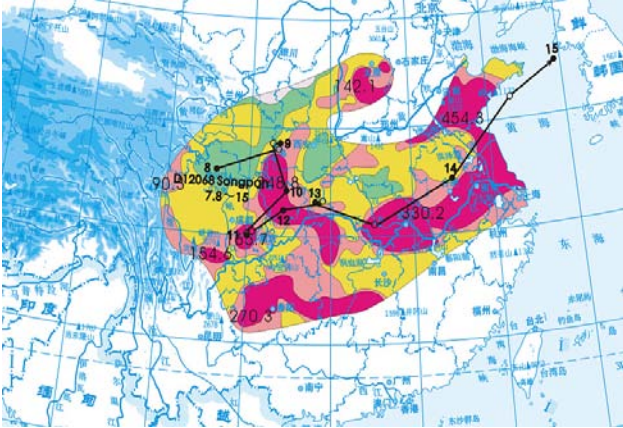


图1 2012年7月8—15日西南涡东移影响暴雨天气过程<sup>[35]</sup>  
(点折线与数字代表西南涡移动路径与日期；着色区与数字代表强降水区与最大降水量，单位：mm)

Fig. 1 The torrential rain process caused by Southwest China vortex moving eastward, during the days from 8 to 15 July, 2012<sup>[35]</sup>. (solid lines and numbers: the moving path and date respectively; color areas and numbers: the precipitation area and maximum precipitation, respectively, unit: mm)

在西南涡观测试验方面，实际上，21世纪之前的这一阶段，针对高原天气系统西南涡的观测试验可以说还是空白<sup>[13]</sup>。虽然，也开展了不少有影响的青藏高原大气科学试验，如1979年我国第一次青藏高原气象科学实验，1998年我国第二次青藏高原大气科学试验等，但并不是具体针对西南涡的专项观测试验。

由上可以看到，这一阶段西南涡的研究绝大多数仅是针对某次典型个例的分析，共性认识薄弱；基本观测资料稀少、时空分辨率很低，主要是大尺度天气分析；虽然通过各种插值方法得到较高密度数据，但西南涡活动的高原一盆地区域复合地形，陡峭复杂，其具体结果存在可靠性问题；并且，数值模式自身性能和高原山地的特殊性，也限制了其研究的深度。

## 1.2 近 10 年来进展

进入21世纪，由于大气探测技术、综合观测系统的逐步发展，多种雷达、卫星等特殊探测资料的积累丰富，国际再分析资料的不断完善，在西南涡研究进一步深入的基础上，实施了西南涡专项大气观测试验<sup>[36-38]</sup>及其分析应用是这一阶段的主要特点。10年来，在西南涡的观测数据、科学研究和预测技术等方

面取得了一些新的重要成果。

在西南涡活动与结构方面，中国气象局成都高原气象研究所<sup>[35, 39]</sup>第一次编著出版了我国西南低涡年鉴系列，逐步改变了基础数据薄弱、定义不统一、个例差异等有关问题，对于推动西南涡研究和实际应用有显著意义。陈忠明等<sup>[40]</sup>利用1983—1992年逐日资料统计分析得到，九龙地区、四川盆地和小金一带是西南涡的三个生成集中区；移动类西南涡仅占低涡总数的20.5%，且主要取偏东路径（70.7%）。邹波等<sup>[41]</sup>指出，西南涡的边界层结构及其演变非常复杂，在边界层内，低涡表现出非连续特征。王晓芳等<sup>[42]</sup>分析了影响2005年6月25日长江流域暴雨过程的西南涡结构特征及其移动发展机制，进一步得到西南涡是一个显著不对称的斜压系统。

在西南涡演变与机制方面，高守亭等<sup>[43]</sup>通过转槽实验发现青藏高原对切变线上低涡及气旋波的发展起着重要的驱动作用。王晓芳等<sup>[42]</sup>得到西南涡发展过程始终伴随强盛的西南低空急流；高层正涡度平流和低层暖平流的共同作用，是西南涡移动过程中周围大气维持较大非热成风涡度，从而造成其上空强烈上升运动的重要原因。朱禾等<sup>[44]</sup>通过个例分析指出，地形与环流的恰当配置与耦合作用，即低层强风带造成的气旋性切变和低空气流受地形抬升作用可能是西南涡生成的主要因素。并且，充沛的水汽与不稳定能量是西南涡发展的有利热力条件，青藏高压变动相伴的中上层环流形势的调整与西南涡对流和降水发展相联系。邹波等<sup>[41]</sup>指出，大气低层的非平衡动力强迫通过激发电流辐合和正涡度增长，由此促进西南涡的发展，且对流层中层的正涡度平流强迫加剧了低涡的发展。陈忠明等<sup>[45]</sup>通过个例分析进一步指出，高原涡与西南涡相互作用的差异性，两者不同的位置配置，可以抑制西南涡的发展，也可以导致西南涡的强烈发展。

在西南涡数值模拟方面，何光碧等<sup>[46]</sup>指出西南低空急流建立于暴雨出现之前，暴雨和盆地涡同时出现，而暴雨、低空急流和盆地涡几乎同时减弱。卢萍等<sup>[47]</sup>对3次西南涡影响的华南持续性暴雨过程进行了数值模拟，并由此诊断分析了其动力、热力演变特征，指出降水过程强弱与西南涡的伸展高度、涡度、散度等动力特征强度变化一致，散度适度超前；涡度变率能很好地反映低涡的发展强度及伸展高度，一定程度上客观地反映出西南涡的发生发展演变史。但是，由于西南地区复杂地形和数值模式自身问题<sup>[48]</sup>，数值模拟研究有一定局限性。

在西南涡天气影响方面，何光碧等<sup>[46]</sup>指出，发生

于盆地的西南涡出现在低空急流左侧,川东强降水发生在高空急流的南面、低涡东南侧与西南低空急流大风出口区之间。李跃清<sup>[49]</sup>指出,高原涡和西南涡等低值系统的异常活跃是1998年长江上游暴雨天气的主要影响系统。实际上,1998年夏季西南涡活动频繁,且发展和东移的低涡高达70%以上,近90%的西南涡活动带来了长江上游的区域性暴雨过程<sup>[50]</sup>。李德俊等<sup>[51]</sup>得到,由西南涡和非西南涡(南海西行台风)产生的四川南部暴雨天气,其降水云团结构和风廓线变化表现出差异性。西南涡暴雨比南海西行台风暴雨的降水云团更大,云顶高度更高,并存在低层辐合高层辐散的典型垂直环流结构,降水云团活动垂直方向是连续的,对应的降水也是连续性的,而南海西行台风暴雨则是时断时续的。Chen等<sup>[52]</sup>分析了一次西南涡东移过程及其引发的华南暴雨天气,发现暴雨影响系统西南涡始终处于较大相对螺旋度的大气环境中,风场不断将正涡度向其输送,以维持其发展。西南涡前(后)部暖(冷)平流明显,这是推动其移动的重要热力因子。暴雨区不断的水汽输送辐合,低涡扰动诱生的MCSs不断生成移动发展,造成了持续性暴雨天气。并且,综合考虑低涡动力及水汽作用的湿螺旋散度对降水落区有很好的指示意义。

在西南涡观测试验方面,基于依靠与西南涡结构、演变和影响尺度匹配的观测系统、综合资料、分析技术和研究理论这一认识,2010年夏季,中国气象局成都高原气象研究所发起了我国第一次西南涡加密观测大气科学试验,在西南涡主要活动区与影响区,完成了6月21日—7月31日的高时空分辨率的外场综合气象观测,获得了连续加密的大气地面、高空、雷达、边界层、地基GPS水汽和风廓线观测资料,实现了对西南涡发生、发展和东移及其影响的“过程观测”,建立了西南涡加密观测数据集,并开展了分析研究和实际应用,在灾害天气的分析预报中发挥重要作用<sup>[36]</sup>。之后,每年常态化的西南涡加密观测大气科学试验,空间加密九龙、名山、金川和剑阁4个探空站,时间观测每日4次,甘孜、红原、西昌、宜宾、达县、温江和巴塘7个业务探空站时间加密到每日4次(图2)。加密观测科学试验资料进入气象业务平台实时应用,为天气预报员及时、准确和精细地分析预报低涡、切变线和低压槽等天气系统变化及其影响到显著作用(图3)。并且,加密观测试验数据实时同化到成都区域气象中心的数值模式,改进了数值天气预报业务水平。同化了西南涡加密观测资料的降水预报TS评分明显提高,并随降水量级的增大,提高越

明显<sup>[37-38]</sup>。同时,也推进了对西南涡及其影响演变特征的分析研究。

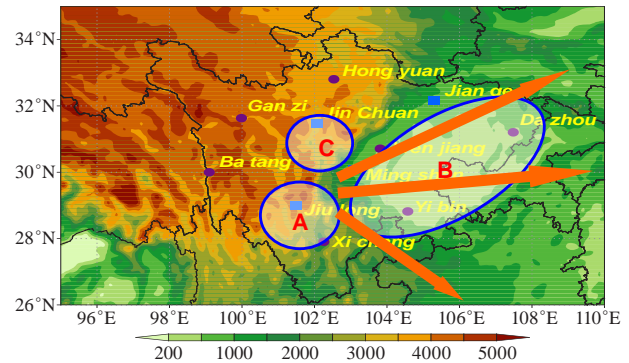


图2 西南涡加密观测大气科学试验高空观测网(蓝色矩形:4个空间加密探空站;紫色圆点:7个业务探空站)、西南涡活动主要源地(A:九龙一带,B:四川盆地,C:小金一带)与主要路径(箭头:偏东路径、东北路径和东南路径)、西南地形分布(着色区:地形高度,单位:m)  
Fig. 2 The radiosonde network of intensive observation scientific experiments of Southwest China vortex (blue rectangles: the four space intensive observing stations; purple solid rounds: the seven operational observing stations), the activity sources (A: Jiulong area; B: Sichuan basin; C: Xiaojin area) and the moving paths (arrows: eastward path, northeastward path and southeastward path) of Southwest China vortex and the terrain distribution in Southwest China (shaded areas: terrain heights, unit: m)

图3是2013年6月29日—7月2日四川盆地东部发生的一次特大暴雨天气过程,共有39个站点降雨量超过100mm,遂宁、南充、绵阳和德阳等地均超过200mm,遂宁72h累计降雨量达到519.5mm,创历史极值。而6月30日14时(北京时,下同)西南涡与高原涡合并加强,是暴雨最为集中的时段。30日08时西南涡已位于四川盆地眉山地区,在常规观测资料的基础上,结合西南涡科学试验4个空间加密观测站资料(图3a)能够清楚揭示出西南涡系统,但是,仅仅依靠常规观测资料(图3b)就不能揭示出其闭合的低压中心,难以反映西南涡的存在与活动。尤其是,30日14时西南涡与北部的高原涡相遇合并成为一个强烈发展的低涡时(图3c),基于西南涡加密观测科学试验的观测资料,有效反映了其耦合过程和合并涡特征,然而,这个时刻却没有常规的探空观测业务,表明了西南涡加密观测试验的重要性。

同时,这一阶段研编了西南涡及其影响的基础年鉴,基于西南涡加密观测科学试验,实现了西南涡及其降水的“过程观测”,由此推动了其综合观测、科学研究和业务预测的发展,意义重大。并且,应用雷达、卫星等新资料,分析了西南涡及其降水的内部结构、物理过程,提出了一些新的演变机制。但是,这

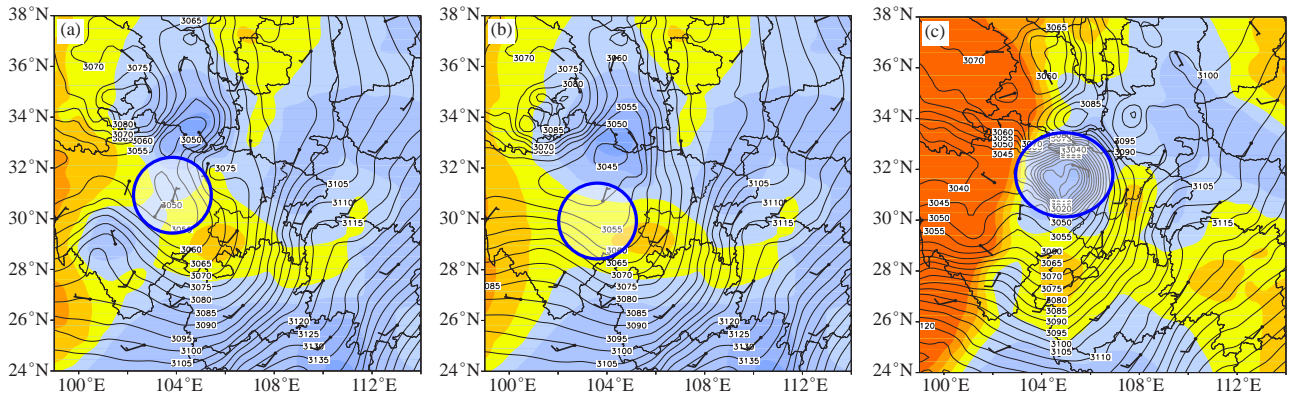


图3 2013年6月30日700hPa位势高度场(等值线,单位:gpm)、温度(着色区,单位:°C)和风场(风矢,单位:m/s):  
(a) 30日08时西南涡与高原涡耦合前,常规探空观测加上西南涡加密探空观测;(b) 30日08时西南涡与高原涡耦合前,仅有常规探空观测;(c) 30日14时西南涡与高原涡耦合时,常规探空观测加上西南涡加密探空观测  
Fig. 3 The 700hPa geopotential height (contours, unit: gpm), temperature (shaded area, unit: °C) and wind (vectors, unit: m/s) on 30 June, 2013. (a) Before the coupling of Southwest China vortex and Tibetan Plateau vortex at 08 in Beijing time with the conventional plus intensive observing data; (b) Before the coupling of Southwest China vortex and Tibetan Plateau vortex at 08 in Beijing time with the conventional observing data only; (c) When the coupling of Southwest China vortex and Tibetan Plateau vortex at 14 in Beijing time with the conventional plus intensive observing data

些工作只是一个好的起步,其系统性、深入性和应用性有待继续加强。

## 2 存在问题

从以上西南涡研究及观测试验的回顾与进展可知,关于西南涡的定义与性质、涡源与移动、热力与动力结构、发生发展与形成机理、与其他系统的相互作用,以及西南涡的影响与预报等已取得了不少重要的成果<sup>[5, 9-13]</sup>。但是,由于青藏高原及周边地区气象观测布局和能力的限制,在数量与质量上,都缺乏与西南涡活动及其影响匹配的基础资料,关于其涡源路径、时空结构和移动特征等一些基本事实都不是很清楚<sup>[5, 10]</sup>,严重制约了对西南涡的深入研究,以及西南涡影响的业务预报。目前,西南涡研究及观测试验主要存在以下问题:

1) 西南涡及其演变的有效观测与基础数据。由于青藏高原及周边地区现有观测台网稀疏,观测技术有限,资料的代表性较差,数据的分辨率不够,时空插值的可靠性不高,难以捕捉西南涡等中小尺度天气系统的基本特征和异常演变,也造成其资料收集与个例统计等基础工作非常薄弱,分析使用的个例事件,定义标准不同,西南涡及其影响的完整“过程观测”数据少,且数值模式初值不能准确描述西南涡的初始状态,其数值预报具有较大难度。

2) 西南涡及其演变的中尺度结构特征与规律。由于缺乏与西南涡天气系统相匹配的中尺度时空分辨率的基本观测资料,仅基于西南涡的不同典型过程及

其不同类型和不同阶段的个例分析,难以真正揭示西南涡的整体结构及其演变特征,并认识西南涡的内部物理图像。因而,对于西南涡及其演变过程的中尺度结构特征的认识还不够完整、系统,对于大气动力、热力作用对西南涡演变过程的具体作用和综合影响也不是十分清楚,

3) 西南涡发生发展与移动过程及其机理。西南涡是青藏高原特殊地形与大气环流相互作用的产物,作为一个中尺度系统,其发生发展与东移等变化具有突发性、剧烈性和复杂性,对于其异常变化的基本特征及其物理机制一直是研究的重点。但是,西南涡源地的选择性,西南涡的生成、生成后的消失与东移原因,其异常发展机理等科学问题,由于高分辨率观测资料和数值模式技术等限制,一方面,西南涡大气动力学研究,由于基于简化和近似,与实际大气有一定偏差,需要观测的检验和修正;另一方面,西南涡数值模拟研究,由于高原东侧西南地区地形陡峭复杂<sup>[53]</sup>,其结果的普遍性和真实性也需要观测证实。关于西南涡生成、消失、移动,以及与高原涡系统耦合作用等演变过程及其物理成因一直是一个薄弱环节(图4)。

4) 西南涡暴雨天气及其变化过程。西南涡作为中尺度低压系统,一般与降水天气密切联系,其强烈发展将带来暴雨等灾害天气过程。并且,其降水的时空分布与云系、雨团演变等具有显著的区域特点。但是,由于观测站网分布和探测技术有限,缺乏与西南

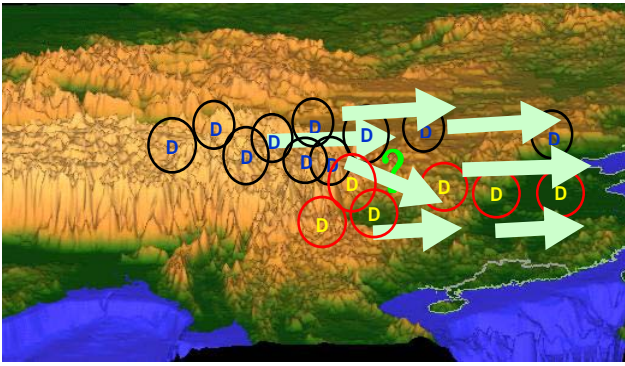


图4 高原天气系统西南涡（红色）与高原涡（黑色）活动（箭头）及其相互作用示意图

Fig. 4 The sketch map of activities (arrows) and interactions between the Plateau weather systems Southwest China vortex (red-ring) and the Tibetan Plateau vortex (black-ring)

涡降水天气尺度相当的观测与分析，对于西南涡强降水的范围、强度和持续等特征认识不够，对于西南涡强降水天气及其演变的中小尺度特征了解还不是很清楚，包括对西南涡系统的云雨、水汽、扰动等热力、动力及其微物理特征了解很少，没有建立西南涡诱发暴雨灾害天气的多尺度概念模型。

5) 西南涡系统及其降水的可预报性与预报技术。由于观测数据资料不够丰富的原因及其西南复杂山地的特殊困难，既影响了关于西南涡活动规律与变化机理的认识，又制约了西南涡及其天气预报技术的发展，如青藏高原与周边地区观测资料的严重匮乏，数值模式不能准确描述西南涡的初始状态，尤其是其剧烈、突发变化和奇异、持续活动，给西南涡系统及其天气影响的预报带来很大困难。而且，基于天气图的一些统计、动力预报技术，基于数值模式的一些扩展预报技术，都存在时空分辨率精细化程度不够的现实问题，往往难以准确预报西南涡活动及其天气影响。目前，关于西南涡的可预报性，包括生成与消失、移动与停滞、增强与减弱、群发与突发等变化，以及降水天气的预报，包括强度、时段、落区和演变等都缺乏有效的理论基础和关键技术。

### 3 未来方向

进入21世纪以来，高原气象学进入了涉及大气圈、水圈、冰冻圈、岩石圈和生物圈相互作用的新阶段，开展青藏高原影响灾害天气的系统化、精细化和协同化的观测、试验、研究和应用是未来的一个重要方向。但是，长期以来，大气科学的发展，其观测试验研究，如观测布局、科学试验等相对落后于其理论分析，其科学理论与工程技术非常薄弱<sup>[54]</sup>，西南涡研究也是如此<sup>[13]</sup>。因此，协调开展西南涡及其影响的观

测、试验、理论和应用的综合研究非常必要。

在大气科学高原气象学发展的基础上，基于与西南涡结构、演变和影响尺度匹配的观测系统、多源数据，结合关键区域、关键时段的观测试验，依靠观测分析、诊断研究和数值模拟的精细化分析研究，发展西南涡系统及其影响的基础理论和预测技术，是其未来最主要的发展趋势。其中，有以下几个基本方向：

1) 推进西南涡活动的基础观测和科学试验。加强西南涡的基础性工作，一是建设西南涡生成源地、移动路径和影响范围的气象综合观测系统，这是长期的任务；二是在现有业务观测站网的基础上，有针对性的布局开展西南涡专项加密观测科学试验，获取有效反映其状况与变化的观测数据，提升基础资料的数量和质量，加强西南涡活动气候特征和基本结构分析，推进西南涡研究与业务发展，为揭示西南涡活动及其影响的物理机制，提高其预测技术水平奠定基础。

2) 加强西南涡系统的精细分析和深入研究。基于加密观测与科学试验，应用获取的中尺度观测资料和捕捉的西南涡“过程观测”资料，建立西南涡基础数据集。通过中尺度观测分析、动力诊断和数值模拟，系统研究西南涡及其演变的中尺度结构特征，深入分析西南涡的动力、热力过程和发生发展与东移的物理机制。加强西南涡大气动力学研究与实际观测的结合，建立更普遍、更精确的基础理论，提升对西南涡的定量认识及其成果业务应用。

3) 开展西南涡暴雨及其变化的综合研究。在加密观测、科学试验的基础上，综合应用雷达、卫星和探空等多种资料，通过观测分析、诊断研究，进一步研究西南涡暴雨天气及其变化的降水结构、云团特征及其物理过程，认识西南涡暴雨的内在结构与基本特征，建立西南涡诱发暴雨灾害天气的多尺度概念模型。

4) 发展西南涡及其影响的预报新技术。在多源数据基础上，根据西南涡系统及其降水天气特点，研发基于观测、诊断和理论的西南涡预报关键技术，重点是应用加密观测高分辨率资料和中尺度数值模式，开展西南涡及其暴雨可预报性的敏感性研究，结合新型观测资料加强西南涡及其影响的数值模拟，发展基于多源资料同化的西南涡降水数值预报新技术。

### 4 结语

本文从西南涡研究和观测试验的发展历程，全面、系统地回顾了21世纪以前的主要成果和21世纪之后近10年来的基本进展，重点分析了存在的主要问题，指出了未来发展的基本方向。

需要指出的是，目前对于西南涡及其影响的认识

还非常薄弱，主要是缺乏西南涡变化及其影响的基础数据，包括西南涡形成、维持、发展和移动及其影响等基本变化信息，特别是没有实现高时空分辨率的持续、系统观测，制约了对西南涡基本结构、变化过程和影响机理的基础分析、理论与业务预报。追根溯源，今后应该以西南涡及其影响的综合观测与科学试验为起点，开展进一步的深入研究，由此发展我国西南涡系统及其天气影响的基础理论与关键技术，这才是正确高效之路。

### 参考文献

- [1] 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1979.
- [2] 章基嘉, 朱抱真, 朱福康, 等. 青藏高原气象学进展. 北京: 科学出版社, 1988.
- [3] 吴国雄, 孙菽芬, 陈文, 等. 青藏高原与西北干旱区对气候灾害的影响. 北京: 气象出版社, 2003.
- [4] 徐祥德, 等. 青藏高原影响与动力学机制探讨. 北京: 气象出版社, 2015.
- [5] 卢敬华. 西南低涡概论. 北京: 气象出版社, 1986.
- [6] 徐裕华. 西南气候. 北京: 气象出版社, 1991.
- [7] Li Y Q, Li D j, Yang S, et al. Characteristics of the precipitation over the eastern edge of the Tibetan Plateau. Meteorol Atmos Phys, 2010, 106: 49-56.
- [8] 李跃清, 张晓春. “雅安天漏”研究进展. 暴雨灾害, 2011, 30(4): 289-295.
- [9] 陈志明, 闵文彬, 崔春光. 西南低涡研究的一些新进展. 高原气象, 2004, 23(增刊): 1-5.
- [10] 刘红武, 李国平. 近三十年西南低涡研究的回顾与展望. 高原山地气象研究, 2008, 28(2): 68-73.
- [11] 李国平. 青藏高原动力气象学. 北京: 气象出版社, 2007.
- [12] 何光碧. 西南低涡研究综述. 气象, 2012, 38(2): 155-163.
- [13] 李跃清, 徐祥德, 赵兴炳. 西南涡大气科学试验的观测布局理论与实践. 中国工程科学, 2012, 14(9): 35-45.
- [14] 陶诗言, 等. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980.
- [15] 解明恩, 瑯建华, 卜玉康. 西南低涡Ekman层流场特征分析. 高原气象, 1992, 11(1): 31-38.
- [16] 陈志明, 缪强, 闵文彬. 一次强烈发展西南低涡的中尺度结构分析. 应用气象学报, 1988, 9(3): 273-282.
- [17] 彭新东, 程麟生. 高原东侧低涡切变线发展的个例数值研究—I 分析和诊断. 兰州大学学报(自然科学版), 1992, 28(2): 163-168.
- [18] 韦统健, 薛建军. 影响江淮地区的西南涡中尺度结构特征. 高原气象, 1996, 14(4): 456-463.
- [19] 王赛西. 西南低涡形成的气候特征与角动量输送的关系. 高原气象, 1992, 11(2): 144-151.
- [20] 刘富明, 杜文杰. 触发四川盆地暴雨的高原涡的形成和东移.// 夏半年青藏高原对我国天气的影响. 北京: 科学出版社, 1987.
- [21] 高守亭. 流场配置及地形对西南低涡形成的动力作用. 大气科学, 1987, 11(3): 263-271.
- [22] 吴国雄, 刘还珠. 全型垂直涡度倾向方程和倾斜涡度发展. 气象学报, 1999, 57(1): 1-4.
- [23] 李国平, 万军, 卢敬华. 暖性西南低涡形成的一种机制. 应用气象学报, 1991, 2(1): 91-99.
- [24] 郑庆林, 邢久星. 一个六层亚洲有限区域模式及对一次西南涡过程的数值模拟. 应用气象学报, 1990, 1(1): 12-23.
- [25] Kou Y H, Cheng L S, Bao J W. Numerical simulation of the 1981 Sichuan flood. Mon Wea Rev, 1988, 116: 2481-2504.
- [26] 杨洋, 张小松, 卜玉康, 等. 五层原始方程模式对西南低涡的数值预报及实验. 云南大学学报(自然科学版), 1988, 10(1): 480-492.
- [27] 赵平, 孙淑清. 一次西南低涡形成过程的数值试验和诊断(一) 一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. 大气科学, 1991, 15(6): 46-52.
- [28] 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. 兰州大学学报(自然科学版), 1994, 30(1): 124-131.
- [29] 王革丽, 陈万隆. 植被和土壤湿度对西南低涡降水影响的敏感性试验. 高原气象, 1997, 16(3): 243-249.
- [30] 陶诗言, 陈联寿, 徐祥德, 等. 第二次青藏高原大气科学试验理论研究进展(一). 北京: 气象出版社, 1999.
- [31] 李国平, 刘行军. 西南低涡暴雨的湿位涡诊断分析. 应用气象学报, 1994, 5(3): 354-360.
- [32] 陈志明, 缪强. 长江上游区域性暴雨发生前的中尺度特征. 气象, 2000, 26(10): 15-18.
- [33] 李跃清, 黄仪方. 西南低涡暴雨的边界层诊断分析. 四川气象, 1994, 14(3): 21-25.
- [34] 王作述, 汪迎辉, 梁益国. 一次西南低涡暴雨的数值试验研究. 暴雨科学、业务试验和天气动力学理论的研究, 85-906-08课题组. 北京: 气象出版社, 1996.
- [35] 中国气象局成都高原气象研究所, 中国气象学会高原气象学委员会. 西南低涡年鉴(2012). 北京: 科学出版社, 2013.
- [36] 李跃清, 赵兴炳, 邓波. 2010年夏季西南涡加密观测科学试验. 高原山地气象研究, 2010, 30(4): 80-84.
- [37] 李跃清, 赵兴炳, 张利红, 等. 2011年夏季西南涡加密观测科学试验. 高原山地气象研究, 2011, 12(4): 7-11.
- [38] 李跃清, 赵兴炳, 张利红, 等. 2012年夏季西南涡加密观测科学试验. 高原山地气象研究, 2012, 32(4): 1-8.
- [39] 中国气象局成都高原气象研究所, 中国气象学会高原气象学委员会. 西南低涡年鉴(2013). 北京: 科学出版社, 2015.
- [40] 陈志明, 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. 北京: 气象出版社, 2000.
- [41] 邹波, 陈志明. 一次西南涡发生发展的中尺度诊断. 高原气象, 2000, 19(2): 141-149.
- [42] 王晓芳, 廖移山, 闵爱荣, 等. 影响“05.6.25”长江流域暴雨的西南低涡特征. 高原气象, 2007, 6(1): 197-205.
- [43] 高守亭, 陈辉. 地形背风坡的转槽实验研究. 气象学报, 2000, 58(6): 653-664.
- [44] 朱禾, 邓北胜, 吴洪. 湿位涡守恒条件下西南低涡的发展. 气象学报, 2002, 60(3): 343-351.
- [45] 陈志明, 闵文彬, 缪强, 等. 高原涡与西南低涡耦合作用的个例诊断. 高原气象, 2004, 23(1): 75-80.
- [46] 何光碧, 陈静, 李川, 等. 低涡与急流对“04.9”川东暴雨影响的分析与数值模拟. 高原气象, 2005, 24(6): 1012-1023.
- [47] 卢萍, 李跃清, 郑伟鹏, 等. 影响华南持续性强降水的西南涡分析和数值模拟. 高原气象, 2014, 33(6): 1457-1467.
- [48] Yu R C, Li W, Zhang X H, et al. Climatic features related to Eastern China summer rainfalls in the NCAR CCM3. Adv Atmos Sci, 2000, 17(4): 503-518.
- [49] 李跃清. 1998年青藏高原东侧边界层风场与长江暴雨洪水的关系. 大气科学, 2000, 24(5): 641-648.
- [50] 陈志明, 徐茂良, 闵文彬. 1998年夏季西南低涡活动与长江上游暴雨. 高原气象, 2003, 22(2): 162-167.
- [51] 李德俊, 李跃清, 柳草, 等. 基于TRMM 卫星探测对宜宾夏季两次暴雨过程的比较分析. 气象学报, 2010, 68(4): 559-568.
- [52] Chen Y R, Li Y Q, Zhao T L. Cause analysis on eastward movement of Southwest China Vortex and its induced Heavy Rainfall in South China. Advances in Meteorology, 2015, 481735.
- [53] 宇如聪, 曾庆存, 彭贵康, 等. “雅安天漏”研究 II: 数值预报试验. 大气科学, 1994, 18(5): 535-551.
- [54] 李跃清. 第三次青藏高原大气科学试验的观测基础. 高原山地气象研究, 2011, 31(3): 77-82.