

李超, 李跃清, 蒋兴文. 2015. 四川盆地低涡的月际变化及其日降水分布统计特征 [J]. 大气科学, 39 (6): 1191-1203. Li Chao, Li Yueqing, Jiang Xingwen. 2015. Statistical characteristics of the inter-monthly variation of the Sichuan Basin vortex and the distribution of daily precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (6): 1191-1203, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14270.

四川盆地低涡的月际变化及其日降水分布统计特征

李超¹ 李跃清² 蒋兴文²

¹ 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

² 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072

摘要 利用ERA-interim再分析资料 and 全国824个气象基准站的日降水资料, 统计分析了1983年1月1日~2012年12月31日发生在四川盆地的低涡天气过程及其降水特征, 结果表明: 盆地涡初生位置主要位于盆地的西南部和东北部, 盆地涡夏季出现最多, 冬季出现最少, 其中初生位置位于盆地西南部的低涡7月出现最多, 12月和1月出现最少; 位于东北部的低涡6月出现最多, 1月出现最少; 盆地涡具有明显的日变化, 西南型盆地涡3~10月夜晚发生概率均大于白天, 其他月份低涡夜发性不明显, 而东北型盆地涡只在5~9月期间夜晚发生概率大于白天, 其他月份低涡夜发性不明显; 盆地涡生命史与对流程度具有相关性, 对流发展有利于盆地涡长时间维持, 然而, 夏季西南型盆地涡即使对流没向上发展也能长时间维持; 盆地涡夏季移出最多, 尤其以7、8月最明显, 冬季移出最少, 7月前以偏东路径为主, 7月后以东北路径为主; 盆地涡频数的月际变化与川西高原西南涡源地的风场扰动移出有密切联系, 九龙地区夏季风场扰动移出活跃, 冬季移出不活跃。小金地区春季风场扰动移出活跃, 冬季移出不活跃。九龙地区风场扰动移出对盆地涡频数的月际变化贡献明显, 小金地区风场扰动移出对盆地涡频数的月际变化贡献不明显; 夏半年(5~10月)西南型盆地涡和东北型盆地涡引起的日降水区域分布的月际变化特征不同, 前者的日降水最大值中心随月份先由盆地东北部向西南部移动, 之后再由盆地西南部向东北部折回, 后者的日降水最大值中心会一直稳定维持在盆地的东北部达州地区。东北型盆地涡虽然出现频次低, 但各月的日降水强度要远大于西南型盆地涡。

关键词 西南涡 四川盆地 日降水强度 时空分布 变化特征

文章编号 1006-9895(2015)06-1191-13

中图分类号 P458.1

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14270

Statistical Characteristics of the Inter-monthly Variation of the Sichuan Basin Vortex and the Distribution of Daily Precipitation

LI Chao¹, LI Yueqing², and JIANG Xingwen²

¹ College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

² Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072

Abstract Based on ERA-interim reanalysis data and the daily meteorological precipitation data from 824 observation stations in China, we quantify and analyze the weather processes and the characteristics of precipitation contributed by the Sichuan Basin vortex during 1 January 1983 to 31 December 2012. The results suggest that the vortex usually occurs in the southwest or the northeast of the Sichuan Basin, which are referred to as southwest-type and northeast-type vortices, respectively. The vortex occurs most frequently in summer and least frequently in winter. The southwest-type vortex

收稿日期 2014-09-20; 网络预出版日期 2015-02-12

资助项目 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目91337215, 国家自然科学基金项目41275051, 公益性行业(气象)科研专项GYHY201006053、国家重点基础研究发展计划(973计划)项目2012CB417202

作者简介 李超, 男, 1989年出生, 硕士研究生, 主要从事高原天气研究。E-mail: 276385240@qq.com

occurs most frequently in July and least frequently in January and December, while the northeast-type occurs most frequently in June and least frequently in January. The frequency of the vortex varies significantly in terms of its timing throughout the day; the southwest-type occurs more frequently at night than during daytime from March to October, while the northeast-type has the same pattern but from April to September. There is a significant correlation between the lifespan of the vortex and its convection; however, the southwest-type is still able to maintain even if the convection is not reinforced. The vortex moves out of the Sichuan Basin most frequently in summer and least frequently in winter; moreover, it advances on an eastward path before July and a northeastward path after July. There is a significant correlation between the frequency of the vortex and wind disturbance in the cradle land of the southwest-type vortex; the wind disturbance in the Jiulong region moves out of the cradle land actively in summer but less actively in winter, while in the Xiaojin region it moves out of the cradle land actively in spring and less actively in winter. The wind disturbance in the Jiulong region contributes more to the frequency of the vortex than it does in the Xiaojin region. The daily precipitation distribution contributed by each type is different during May to October; the maximum precipitation area of the northeast-type remains stationary while the southwest-type moves regularly. Although the northeast-type occurs less frequently, it brings more daily precipitation than the southwest-type.

Keywords Southwest China vortex, Sichuan Basin vortex, Daily precipitation intensity, Spatiotemporal distribution, Variation characteristics

1 引言

西南低涡(简称西南涡)是出现于我国青藏高原东南侧川西高原及四川盆地 700 或 850 hPa 等压面上的一种 α 中尺度(水平尺度为 300~500 km, 也称次天气尺度或中间尺度)气旋系统, 平均以 700 hPa 等压面最清楚, 它是青藏高原大地形和川西中尺度地形共同影响的产物(李国平, 2007)。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。就其造成的暴雨天气的强度、频数和范围而言, 仅次于台风及其残留低压(王作述等, 1996), 许多我国历史上罕见的特大洪涝灾害, 都与西南涡活动密切相关。例如, 1981 年 7 月 11 到 15 日的四川省洪涝灾害, 1998 年我国夏季长江上游暴雨, 2004 年 9 月上旬渝北川东大暴雨等。西南涡在青藏高原的东南麓产生后, 不仅对西南地区的天气和降水带来重要影响, 其移出后, 对长江中下游地区天气和降水也产生重要的影响。

关于西南涡气候统计特征的研究前人做了许多富有成效的工作, 也取得了许多有意义的研究成果。如徐裕华(1991)指出西南涡多出现在两个地区, 分别是九龙、巴塘、德欣、康定、昌都一带和四川盆地地区, 第一个源地的西南涡称为“九龙涡”, 第二个源地的西南涡称为“盆地涡”。关于西南涡频数日变化方面, 陈忠明和闵文彬(2000)、谌贵珣和何光碧(2008)均认为西南涡夜间发生的概率大于白天。Fu et al. (2014)认为西南低涡一天之中在早上(02:00~08:00, 北京时)出现最多;

月际变化方面, 陈启智认为西南涡最多的月份出现在 4 月和 6 月, 最少的出现在 2 月和 12 月。陈忠明和闵文彬(2000)认为西南涡 7 月出现最多, 2 月出现最少。马振峰和汪之义(1993)认为 7 月份出现西南涡天数最多, 12 月份出现西南涡天数最少。Fu et al. (2014)认为 6 月初出现西南低涡最多; 季节变化方面, 陈忠明和闵文彬(2000)认为西南涡夏季出现最多, 春秋季节次之, 冬季最少。陈启智等(2007)得出的结论与此类似, 认为生命史一天以上的低涡夏季最多, 春秋季节次之, 冬季最少。而谌贵珣和何光碧(2008)认为西南涡冬季出现最多, 夏季出现最少。Zhong et al. (2014)认为相比于其他季节, 夏季西南低涡产生最少, 但是此时低涡最有可能从源地移出; 低涡生命史方面, Fu et al. (2014)指出大多数西南涡是短生命史的, 另有 66 例(占 11.4%)持续时间超过 24 h, 长生命史(≥ 36 h)西南涡也会出现。陈忠明认为半数以上西南涡生命史低于 36 h, 但个别低涡在夏季可维持 6~7 天, 谌贵珣和何光碧(2008)认为能够生存 24 h 的西南涡只有不到一半, 维持 36 h 的西南涡不足三分之一, 能够维持在 72 小时或 84 小时的西南涡约占 3%~5%; 关于低涡生成后的位势高度场变化, 谌贵珣和何光碧(2008)认为绝大多数低涡生成后 12 h 以内低涡中心位势高度下降, 而陈忠明和闵文彬(2000)认为低涡生成后, 仅有三分之一左右低涡位势高度降低, 陈启智等(2007)做了较细致的统计, 认为西南涡生成后从南向北移动低涡中心位势高度会降低, 从北向南移动低涡中心位势高度会升

高，从东向西移动，低涡中心位势高度会先降低再升高；关于低涡移动路径方面，已有结论（马振峰和汪之义，1993；陈忠明和闵文彬，2000；陈启智等，2007；谌贵珣和何光碧，2008）基本一致，低涡移动路径主要有三条，分别是偏东路径，东南路径，偏北路径，其中以偏东路径为主要移动路径。此外，徐裕华（1991）指出4、5、6月低涡移动路径以偏东方向为主，7、8、9月低涡移动路径以东北方向为主。

关于西南涡与降水的关系，徐裕华（1991）做过系统全面的分析研究，指出西南涡是夏半年造成西南地区重大降水过程的主要天气系统之一，四川省4~9月的降雨过程，约60%左右与西南涡有关。尤其是暴雨天气过程，与西南涡直接关系更为密切。通常在低涡形成初期，降水范围不大，降水强度也偏弱。随着低涡发展东移，降水范围也随之扩大，雨量也显著增大，产生暴雨甚至特大暴雨。雨区多分布在西南涡中心及周围，降水强度最大的地区在低涡东半部，尤其是低涡移动方向的东南方，多为暴雨区所在。在西南涡减弱消失阶段，降水也逐渐减小。

从上述关于西南涡气候统计特征的工作中，不难看出某些方面得到的结论相类似，而其他一些方面却有很大的出入，造成这种差异的原因是多方面的。一般有几条原因：第一，川西高原地区尤其是其中北部地区测站较少，低涡源地监测资料密度不够；第二，统计时选取的资料不同和样本长度不同；第三，统计时制定的西南涡标准不同。此外，西南涡与降水关系以前主要研究西南涡不同发展阶段降雨的强度和落区，但是，针对不同月份出现的西南涡的日降水强度和落区的统计却很少涉及。

基于西南涡研究的成果和不足，考虑：四川盆地作为西南涡的源地之一，有别于初生在川西高原的西南涡，而初生在四川盆地的西南涡，以前很少单独进行系统分析研究，对其发生发展规律及其与降水的关系缺乏系统的认识；并且，九龙和小金所处的川西高原地区常规观测资料密度不够，而盆地地区观测资料密度相比能更好地满足研究的要求。因此，本文将研究侧重点集中在初生于四川盆地的西南涡系统。

2 资料选取及处理方法

本文所用资料为1983年1月1日00:00（协调

世界时）至2012年12月31日18:00（协调世界时），每日4个时次ERA-interim的位势高度场、风场再分析资料，水平分辨率为 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ ，以及中国国家气象信息中心的1983年1月1日至2012年12月31日全国824个国家标准气象站的日降水资料。

结合以前关于西南涡的定义（云南大学物理系气象专业，1975；徐裕华，1991；卢敬华和陈刚毅，1993；陈忠明和闵文彬，2000；卢敬华，1986），本文将出现在（ $26^{\circ} \sim 33^{\circ} \text{N}$ ， $103^{\circ} \sim 110^{\circ} \text{E}$ ）范围以内，满足以下条件的涡旋定义为四川盆地低涡，具体条件分别为：（1）位势高度场上的低值中心出现在上述规定范围以内，而且，上述规定范围以内位势高度场上出现至少一条闭合或趋于闭合（等于或大于 $3/4$ 个圆周）的等值线；（2）高度场低值中心附近对应有风场的散度低值中心（中心数值小于或等于 10^{-5} ）；（3）高度场低值中心附近对应有风场的涡度高值中心，满足以上条件的涡旋系统定义为盆地低涡（简称盆地涡）。此外，按涡旋生命史的不同，将盆地涡划分为只维持一个时次、两个时次、三个时次、四个时次以及四个时次以上这五类低涡，对应的生命史分别为6 h、12 h、18 h、24 h和24 h以上；按低涡发展高度的不同，将盆地涡划分为一次低涡过程，始终只有850 hPa上出现满足上述前提条件的闭合环流定义为浅薄型低涡，低涡整个生命史中不仅能在850 hPa，也能在700 hPa（有时甚至600 hPa）上出现满足上述前提条件的闭合环流定义为深厚型低涡。

具体统计方法主要是：按照本文设定的盆地涡标准，分别对1983年1月1日至2012年12月31日，每日四个时次850 hPa、700 hPa、600 hPa、500 hPa四个层次（ $26^{\circ} \sim 33^{\circ} \text{N}$ ， $103^{\circ} \sim 110^{\circ} \text{E}$ ）盆地范围内位势高度场和风场图进行普查，统计盆地涡的中心位置、生命史、对流程、低涡发生时刻、移动情况和各次低涡天气过程引起的日降水分布等能反映各次低涡活动的特征量。首先，根据这些统计到的特征量将盆地涡进行简单分类，之后，分别分析各类盆地涡初生位置的时空分布、月际变化、日变化、夜发性及各次盆地涡对应的日降水分布月际变化，从而得出关于盆地涡及其引起日降水的气候统计特征和时空变化规律。根据上述定义，30年资料一共提取到1382次满足本文定义标准的盆地涡天气过程，极少数情况下850 hPa上未发现满足定义条件的低涡，但700 hPa上会发现满足前述定

义前提条件的低涡, 30 年里共提取到 34 次, 所占比例仅为 2.46%, 上述两类不同发展类型的盆地涡旋与傅慎明(2009)研究西南低涡结构时, 指出的西南低涡最先生成的层次存在两种基本形式: “由下至上”和“由上至下”结论相一致。由于本文统计结果中, 前者占有绝大多数, 后者所占比例极小, 因此分析的重点放在“由下至上”这一类, 更能反映出盆地涡的实际特征。

3 盆地涡生成总频数的区域分布

根据上述盆地涡制定的标准, 基于初生时(第一个时次)位势高度场最低值所处的经纬度位置, 分类统计得到了盆地涡总频数的区域分布以及各个季节的区域分布, 结果如下图:

从图 1a 可以明显看出, 盆地涡生成高频区主要分布在两个区域, 其中一个区域主要包括(27°~30°N, 103.5°~106°E)范围以内的盆地西南部地区、云南东北部及贵州西北部部分地区, 最大频数中心出现在(28.5°N, 104.25°E)这一区域主要位于川西高原南部和云贵高原北部与四川盆地相连的地带; 另一区域主要包括(30°~31.5°N, 106°~108°E)范围以内的盆地东北部地区(包括四川东北部和重庆西部), 最大频数中心出现在(30.75°N, 107.25°E), 这一区域主要位于四川东部大巴山以南的四川东北部达州及重庆以北附近地区。根据以上低涡生成的高频中心可以将盆地涡大致分为: 西南型盆地涡和东北型盆地涡。此外, 西南型盆地涡的出现频数要远大于东北型盆地涡的出现频数。

从图 1b-e 可以看出, 春、夏、秋这三个季节盆地涡频数的区域分布情况类似于总频数的区域分布, 盆地西南部与东北部均出现一个高频中心, 而且西南型盆地涡的频数要远大于东北型盆地涡的频数; 但冬季盆地涡频数的分布有别于其他季节, 强度明显减弱, 只在盆地东北部出现一相对高频中心。

4 盆地涡的月际气候特征

4.1 西南型盆地涡和东北型盆地涡出现频次的月际变化特征

本文将提取到的四川盆地涡按西南型与东北型进行了分类统计, 各个类型盆地涡频数和总频数的月际变化如下:

分析不同类型盆地涡频数月际变化(图 2)可

以发现: 西南型盆地涡频数随月份呈现先增加后减少的趋势, 1~7 月随月份增加, 7~12 月随月份减少, 7 月频数达到最大值, 12 月和 1 月达到最小值; 东北型盆地涡频数变化趋势也是呈现先增加后减少的趋势, 只是月际之间有微小的起伏, 变化较缓慢, 6 月频数达到最大值, 1 月频数达到最小值。相同月份西南型盆地涡出现的次数要明显多于东北型盆地涡出现的次数。因此, 盆地涡总频数的月际变化特征与西南型盆地涡频数的月际变化特征类似。

4.2 两类盆地涡的日变化和夜间发生概率的月际变化

本文分别统计了西南型盆地涡和东北型盆地涡一天四个时段(协调世界时 18:00~00:00、00:00~06:00、06:00~12:00、12:00~18:00, 分别对应北京时 02:00~08:00、08:00~14:00、14:00~20:00、20:00~02:00)发生的频数(图 3a), 以及西南型盆地涡和东北型盆地涡夜间发生的概率, 统计标准是, 盆地涡首次出现时刻是北京时 20:00~02:00 或者 02:00~08:00, 归为夜间发生的盆地涡, 其余时刻归为日间发生的盆地涡。此外, 本文中盆地涡夜间发生概率定义为该月此类低涡夜间发生的频数除以该月此类低涡发生的总频数, 盆地涡夜发概率月际变化如图 3b 所示:

从两类盆地涡生成的日变化(图 3a)可以看出: 西南型盆地涡和东北型盆地涡发生频数日变化明显, 西南型盆地涡北京时 14:00~20:00(协调世界时 06:00~12:00)发生频数最高, 而东北型盆地涡北京时 20:00~02:00(协调世界时 12:00~18:00)发生频数最高, 二者在北京时 08:00~14:00(协调世界时 00:00~06:00)发生频数均为最低; 这两类盆地涡的变化趋势也不相同, 西南型盆地涡发生频数是先减少再增加, 紧接着又减少, 东北型盆地涡发生频数是先减少再增加。此外, 东北型盆地涡夜间(北京时 20:00~02:00、02:00~08:00, 对应协调世界时 12:00~18:00、18:00~00:00)发生频数要明显多于日间(北京时 08:00~14:00、14:00~20:00, 对应协调世界时 00:00~06:00、06:00~12:00)发生频数, 西南型盆地涡夜间发生频数与日间发生频数各占一半, 说明无论西南型盆地涡还是东北型盆地涡, 都具有夜发性的特点, 只是东北型盆地涡的夜发性特点要更明显一些。

从两类盆地涡夜间发生概率的月际变化(图

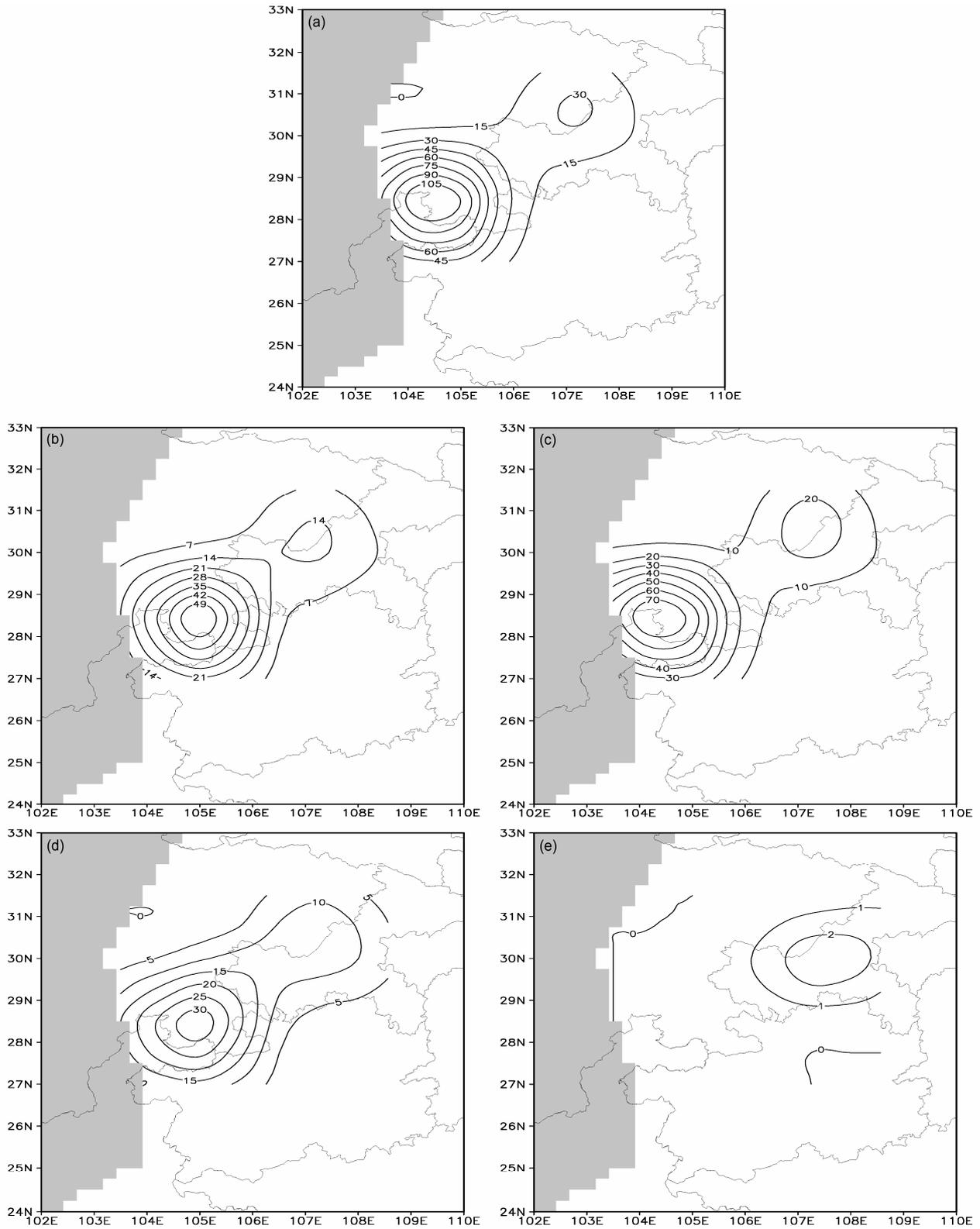


图1 (a) 盆地涡生成总频数以及 (b) 春、(c) 夏、(d) 秋、(e) 冬季盆地涡生成频数的区域分布 (灰色阴影表示海拔 1500 m 以上地形)
Fig. 1 Regional distribution of the frequency of the Sichuan Basin vortex in (a) all four seasons, (b) spring, (c) summer, (d) autumn, and (e) winter (gray shading represents terrain above 1500 m)

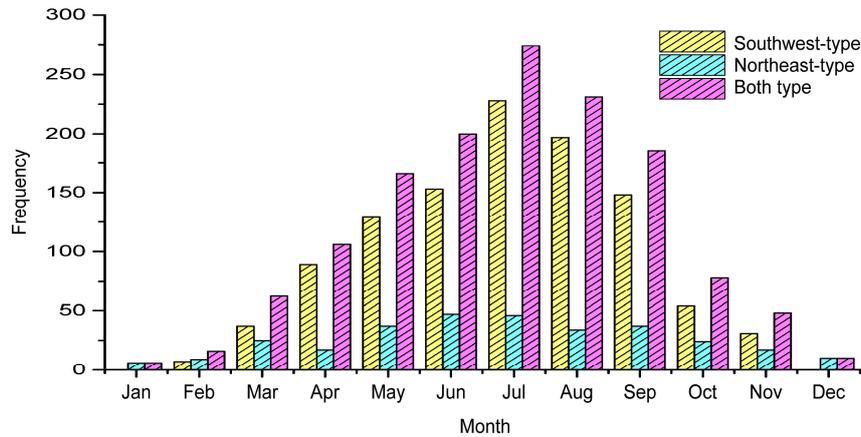


图2 不同类型盆地涡频数的月际变化图: 黄色代表西南型盆地涡, 蓝色代表东北型盆地涡, 红色代表盆地涡总量
Fig. 2 Monthly variation of the frequency of different types of the Sichuan Basin vortex. Yellow represents the southwest-type, blue represents the northeast-type, and pink represents both types

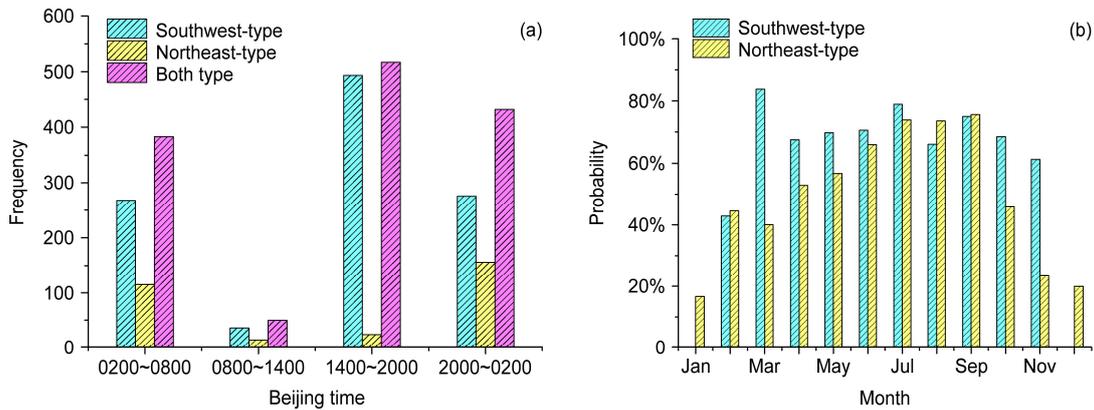


图3 两类盆地涡 (a) 生成频数的日变化特征和 (b) 夜间发生概率的月际变化特征。浅蓝色代表源地为西南型盆地涡, 黄色代表东北型盆地涡
Fig. 3 (a) Diurnal variation of the frequency and (b) monthly variation of the occurrence probability of each type of the Sichuan Basin vortex at night. Yellow represents the southwest-type, blue represents the northeast-type, and pink represents both types

3b) 可以看出: 西南型盆地涡夜间发生概率随月份变化有小幅的波动, 但波动不明显, 3~10 月低涡夜间发生的概率均维持在 60% 以上, 其中 3 月取得最大值, 7 月取得次大值, 说明除 11~12 月、1~2 月外, 其他月份西南型盆地涡夜间发生的概率都远大于白天; 东北型盆地涡夜间发生概率月际变化与西南型不同, 大致呈现先增加后减少的趋势, 9 月取得最大值, 其中 4~9 月低涡夜间发生的概率均超过了 50%, 说明除 10~12 月、1~3 月外, 其他月份东北型盆地涡夜间发生的概率大于白天。

盆地涡的夜发性与盆地夜雨的发生规律应有密切相关。对于盆地夜雨产生的原因, 已有研究 (Jin et al., 2013) 表明: 盆地西部夜雨的发生主要是因为气流在高原及其背风面的抬升造成, 盆地中东部

夜雨的发生是由于对流层低层沿着高原东南缘的西南低空急流在盆地中东部地区发生气旋性旋转和上升导致。因此, 对于西南型盆地涡而言, 西风带会出现季节性的南北移动, 对应越过高原的爬流作用在特定的月份会发生明显变化, 气流抬升的强度也随之变化, 对应西南型盆地涡的夜发概率在某些月份会发生明显的变化。而对于东北型盆地涡而言, 西南低空急流 5 月初开始建立, 10 月初减退消失, 对应东北型盆地涡夜发概率在这些月份则波动较小。

4.3 不同生命史和对流程度的盆地涡

按照盆地涡不同生命史和对流程度, 将盆地涡分为不同类型, 分别统计了不同类型盆地涡的频数, 结果如图 4。

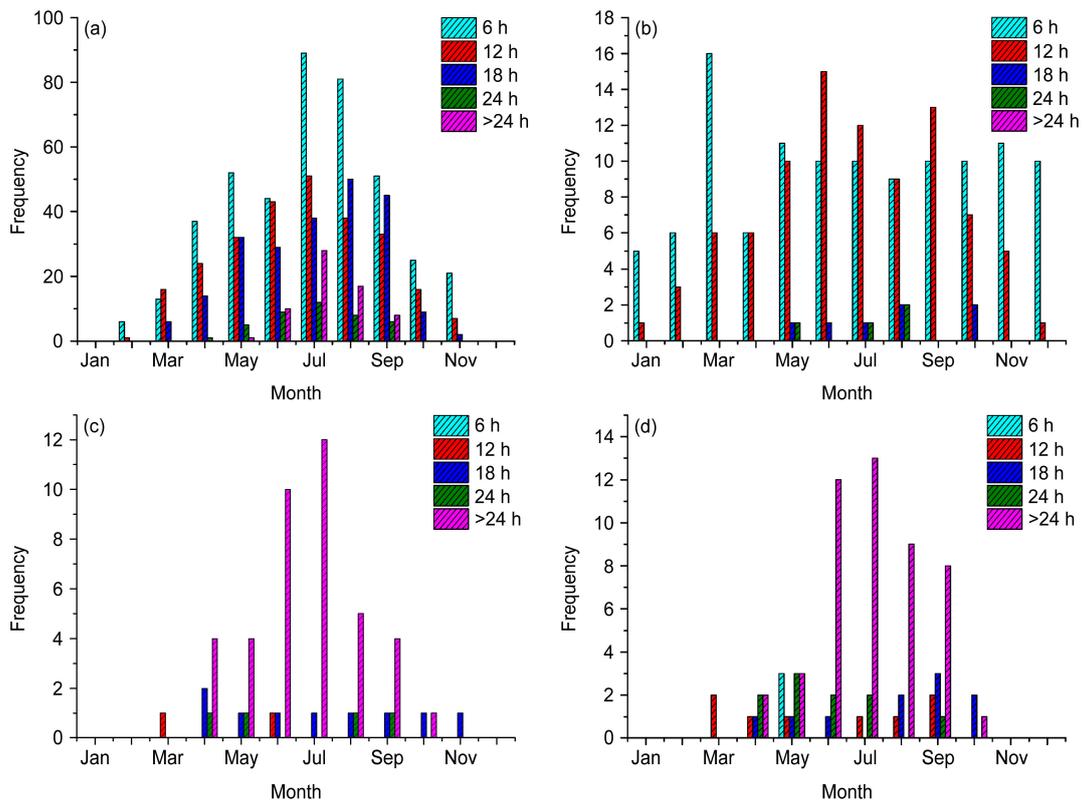


图 4 不同生命史的盆地涡月际发生频数 (单位: 次): (a) 浅薄西南型; (b) 浅薄东北型; (c) 深厚西南型; (d) 深厚东北型。浅蓝色、深红色、深蓝色、绿色、浅红色分别代表生命史 6 h、12 h、18 h、24 h 以及 24 h 以上
Fig. 4 Monthly variation of the frequency of the different lifespans of (a, c) the southwest-type and (b, d) the northeast-type Sichuan Basin vortices with (a, b) weak convection and (c, d) strong convection. Light blue represents 6 h, red represents 12 h, dark blue represents 18 h, green represents 24 h, and pink represents above 24 h

从上述不同类型盆地涡频数月际变化特征可以看出: 生命史小于等于 24 h 的浅薄西南型盆地涡, 其旋频数月际变化几乎都呈现随月份先增加后减少的趋势, 7 月频数取得最大值; 而生命史大于 24 h 的浅薄西南盆地涡则只在 6、7、8、9 月出现较多, 同样 7 月频数达到最大值, 说明这些月份大气环流背景最有利于长生命史的浅薄西南型盆地涡生成和维持; 生命史小于等于 24 h 的浅薄东北型盆地涡频数月际变化不明显, 其中各月份中生命史小于等于 12 h 的低涡占据大多数, 而且不会出现生命史大于 24 h 的浅薄东北型盆地涡; 生命史小于等于 24 h 并且对流发展起来的深厚西南型盆地涡月际变化也不明显, 但生命史小于等于 24 h 的深厚西南盆地涡在 3~11 月都有出现, 频次上没有明显的起伏, 生命史大于 24 h 的深厚西南盆地涡在 4~10 月均有出现, 夏季出现频次最高, 冬季出现频次最少; 图 4d 反映出与图 4c 类似的特征, 只是深厚东北型盆地涡 8~9 月出现频次要略微多于深厚西南

型盆地涡, 生命史大于 24 h 的深厚东北型盆地涡同样夏季出现频次最高, 冬季出现最少。

结合图 4a-d 可以发现: 对流没向上发展的浅薄盆地涡 (包括西南型和东北型盆地涡) 以短生命史 (生命史 ≤ 24 h) 居多, 其中, 夏季 6~9 月西南型盆地涡会出现对流没有发展起来, 但其自身也能长时间维持, 然而, 东北型盆地涡不存在这种现象, 其原因有可能是盆地西南部地势高度相比东北部要高, 地表感热作用更明显, 有利于低涡长时间维持和较少移动; 对流向上发展起来的深厚盆地涡 (包括西南型和东北型盆地涡) 以长生命史 (生命史 > 24 h) 居多, 对流向上发展导致的凝结潜热释放能够满足低涡自身维持发展所需的能量, 使盆地涡生命史延长。

4.4 两类盆地涡移出频数的月际变化和移动路径

统计结果显示: 少部分盆地涡对流向上发展成为深厚型盆地涡, 这些发展起来的深厚型盆地涡只有一小部分会移出统计区 ($26^{\circ} \sim 33^{\circ}N$, $103^{\circ} \sim$

110°E), 总共统计到的 1382 次低涡过程, 有 57 次低涡能够移出统计区, 所占比例为 4.13%。针对每个月移出统计区的盆地涡, 以及移出后的移动路径进行频数统计, 结果如图 5。

从图 5a 可以看出: 无论西南型盆地涡还是东北型盆地涡, 移出低涡的频数均是随月份先增加后减少, 每年的 7 月、8 月移出盆地地区的低涡次数最多, 潘昞等 (2011) 关于东移低涡气候特征的研究对上述规律特征给出了详细说明, 每年的 11~12 月、1~3 月两类低涡均没有移出, 而 4~8 月西南型盆地涡与东北型盆地涡移出频次方面, 两者移出频次较一致, 8~10 月后者移出频次要高于前者, 说明 8~10 月大气环流形势更有利于对流发展起来的东北型盆地涡移出。

从图 5b、c 可以看出: 无论是东北型盆地涡还是西南型盆地涡移出盆地地区之后移动路径主要有三条, 分别是东北路径、偏东路径、东南路径, 但是各月三条移动路径的所占比例有明显变化, 7 月份之前西南型盆地涡和东北型盆地涡, 均以偏东路径为主, 但是 7 月份之后, 东北路径成为主要移动路径。出现这种现象的原因, Zhong et al. (2014) 指出: 副热带高压的位置是一个决定西南低涡移动路径的非常重要的因素, 其位置会出现有规律的季节性移动。因此, 低涡移出统计区后的移动路径也对应出现变化。

4.5 上游风场气旋性扰动与两类盆地涡频数月际变化

初生于四川盆地(下游)的盆地涡会受到川西高原(上游)天气系统的影响, 为了探究盆地涡频数的月际变化特征与上游地区扰动活跃程度的联系, 分别普查了各次盆地涡天气过程, 以确定是否由上游地区风场气旋性扰动的移出而引起。确定风场扰动源地的方法为: 如果在这一时次盆地地区出现盆地涡, 那么考察前一时次在盆地上游地区[700 hPa 等压面 (26°~28.5°N, 100°~103°E) 范围内, 600 hPa 等压面 (28.5°~33°N, 100°~103°E) 范围内]风场中是否出现气旋性切变(风场中相邻四个格点中, 至少有三个格点可构成气旋性切变), 风场有气旋切变的这一地区就是产生该次盆地涡天气过程的扰动源地。本文寻找上游扰动源地时, 选择从风场角度去考察而不是位势高度场, 主要是因为盆地上游高原地区地形起伏大, 风场和位势高度场并不完全满足地转平衡。如果在(26°~

33°N, 100°~103°E) 范围内无法找到满足上述条件的地区, 那么就认为该次盆地涡天气过程风场扰动源地位于该次盆地涡过程第一个时次出现于盆地所在的位置, 而不是由上游扰动移出引起。本文统计了西南型和东北型盆地涡各月频数中不同风场扰动源地低涡的频数构成, 统计结果如图 6。

从图 6a 看出, 3~9 月西南型盆地涡中来源于上游九龙地区附近风场扰动所占比例均超过一半, 7 月这一比例达到最大值, 但是来源于小金地区附近风场扰动一次也没有, 来源于九龙地区附近风场扰动的盆地涡频数的月际变化规律和西南型盆地涡总频数的月际变化规律是同步的。因此, 来源于九龙地区风场的扰动对西南型盆地涡频数的月际变化有重要贡献; 图 6b 东北型盆地涡中上游风场扰动源地既包括九龙地区, 也包括小金地区。各月来源于九龙地区风场扰动生成的低涡多于来源于小金地区风场扰动生成的低涡, 3~6 月来源于上游小金和九龙风场扰动生成的低涡多于本地生成的低涡, 7~9 月本地生成的低涡多于来源于上游九龙和小金风场扰动生成的低涡。结合图 6a 和 b, 九龙地区风场扰动移出的频数要远远多于小金地区, 而且九龙地区风场扰动移出频数有明显的月际变化, 夏季移出活跃, 冬季移出不活跃; 小金地区风场扰动春季移出活跃, 冬季移出不活跃。

5 两类盆地涡日降水分布月际变化

盆地涡引起的降水主要集中在夏半年(5~10月), 本文将重点研究夏半年盆地涡引起的降水分布特征和规律, 根据各次盆地涡天气过程, 按照其不同分类, 分别提取出各次盆地涡过程对应的降水区域分布, 经过处理后得出对应的川渝地区(24°N~34°N, 98°E~110°E)两类盆地涡引起的日降水强度的区域分布, 结果如图 7。

从图 7 左列可以看出: 东北型盆地涡引起的日降水强度的最大值中心位置几乎不随月份移动, 5 月日降水最大值中心出现在盆地的东北部和湖北的西南部, 进入 6 月份后, 湖北西南部的降水大值中心消失, 日降水强度的最大值中心稳定维持在盆地的东北部达州地区附近, 并一直持续到 10 月, 只是这期间降水强度会有一个明显的先增强后减弱的过程; 从图 7 右列可以看出: 西南型盆地涡引起的日降水强度的最大值中心位置会随月份

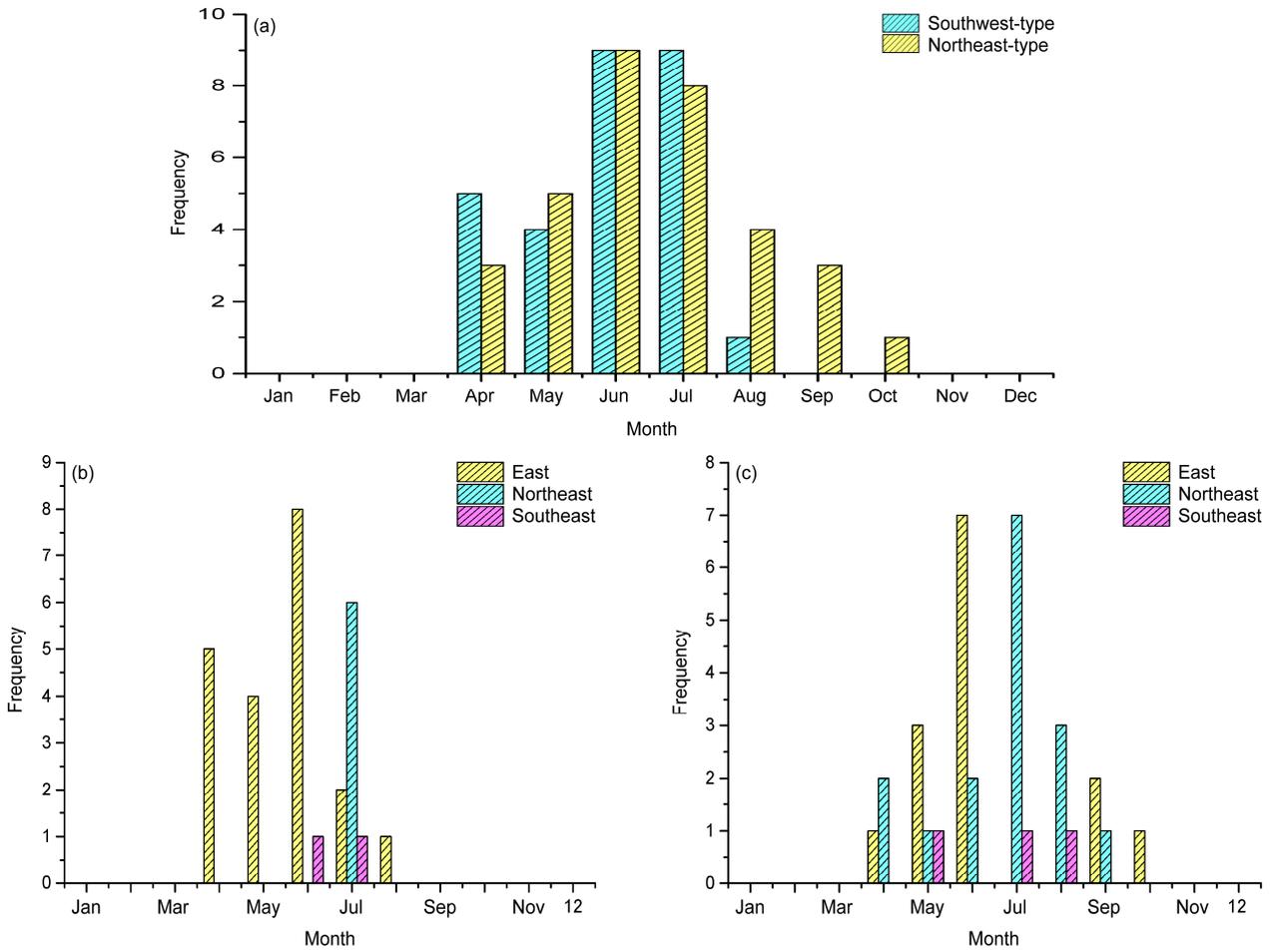


图 5 (a) 两类盆地涡移出频数的月际变化 (浅蓝色代表西南型盆地涡, 浅黄色代表东北型盆地涡)。盆地涡移出后不同移动路径出现频次 (浅黄色代表偏东路径, 浅蓝色代表东北路径, 粉红色代表东南路径): (b) 西南型; (c) 东北型

Fig. 5 (a) Monthly variation of the frequency of each type of the Sichuan Basin vortex moving out of the Sichuan Basin (blue represents the southwest-type and yellow represents the northeast-type). The frequency of the different propagation routes of the Sichuan Basin Vortex (yellow represents the eastward route, blue the northeastward route, and pink the southeastward route): (b) Southwest-type, (c) northeast-type

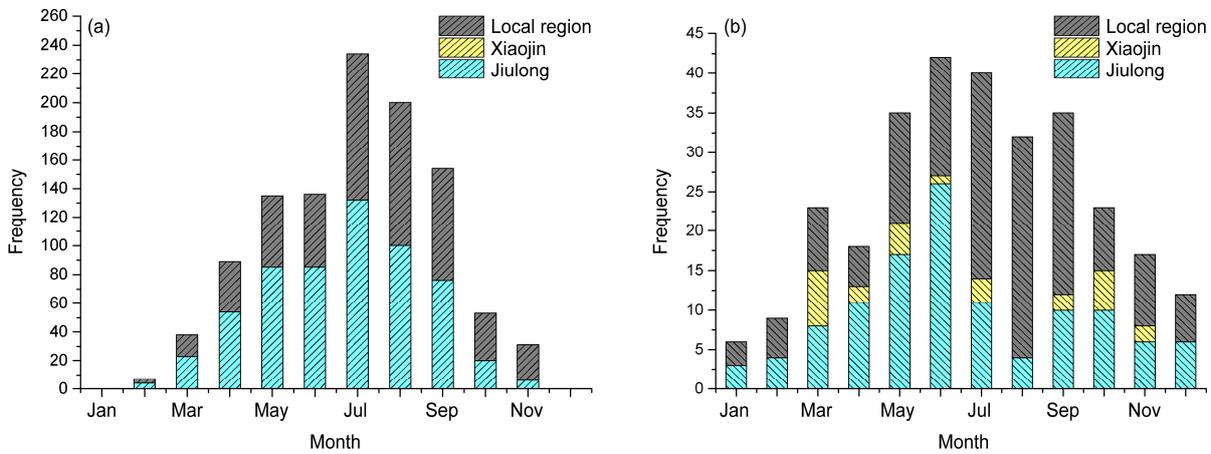


图 6 两类盆地涡各月频数中不同风场扰动源地所占比重 (灰色代表源地分别为盆地西南部和东北部即本地, 浅黄色代表源地为小金地区, 浅蓝色代表源地为九龙地区): (a) 西南型; (b) 东北型

Fig. 6 Monthly variation of the proportion of wind disturbance in the cradle region of the (a) southwest-type and (b) northeast-type Sichuan Basin vortices (gray represents the local region, yellow the Xiaojin region, and blue the Jiulong region)

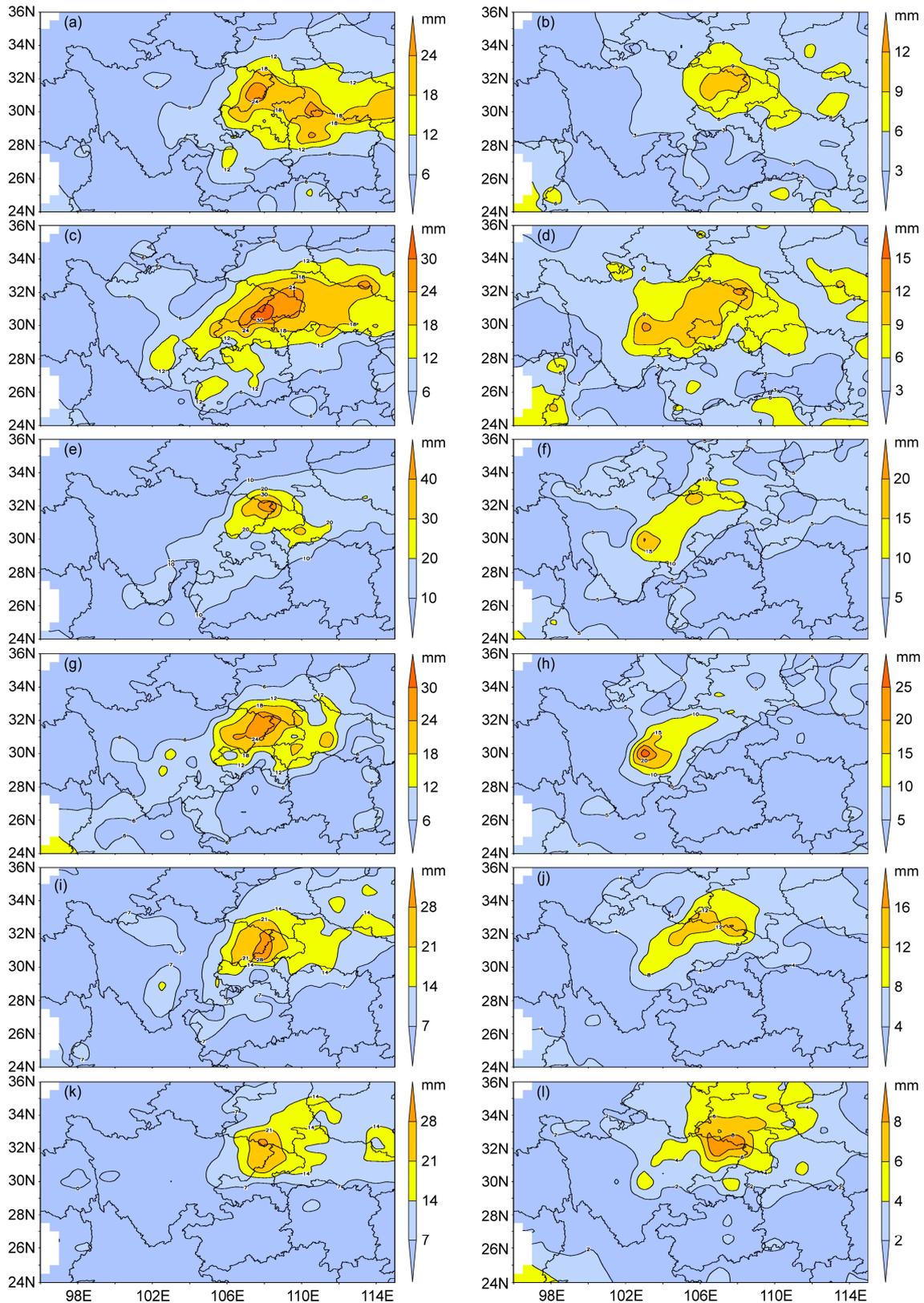


图7 东北型(左列)和西南型(右列)盆地涡分别引起的日均降水强度区域分布(单位: mm): (a-i) 1~12月

Fig. 7 Regional distribution of the daily precipitation (units: mm) caused by each type of Sichuan Basin vortex (a-i) from January to December: Northeast-type (left panels), southwest-type (right panels)

出现有规律的移动，5月日降水最大值中心首先出现在盆地东北部的达州地区，6月日降水大值区向盆地西南部延伸，7月和8月降水最大值中心在盆地西南部稳定维持，9月日降水最大值中心又再次出现在盆地东北部。对比每个月东北型盆地涡与西南型盆地涡日降水分布可发现：东北型盆地涡5~10月各月东北型盆地涡日降水最大值中心的强度均大于西南型盆地涡，东北型盆地涡日降水强度一年中的最大值出现在7月，西南型盆地涡日降水强度一年中的最大值出现在6月，比东北型盆地涡提前一个月。结合前面的分析，可发现东北型盆地涡虽然出现频次低，但是，各月东北型盆地涡的日降水强度远大于西南型盆地涡。

为了找出每次东北型盆地涡日降水强度大于西南型盆地涡的可能原因，对初始时刻两类盆地涡的水汽输送场和散度场进行合成对比分析，图8为两类盆地涡的水汽输送和散度场。从图中可以看出，初始时刻东北型盆地涡与西南型盆地涡相比，来自南海，流经盆地地区的偏南水汽输送强度相近，但是，东北型盆地涡初生时位于盆地地区的水汽辐合（辐合区的面积）要明显大于西南型盆地涡。因此，这两类盆地涡初生时，水汽输送都很强盛，但是，由于东北型盆地涡初生时，盆地地区的水汽辐合区面积更大，导致其引起的日降水强度要大于西南型盆地涡。

6 结论与讨论

本文对1983年到2012年30年每日4个时次的环流场进行普查，一共提取到1382次盆地涡天气过程，分别分析了盆地涡发生频数、生成位置、日变化和月际变化特征、移动路径、低涡引起的日降水强度区域分布，得到以下几点结论：

(1) 盆地涡的高频生成源地主要有两个地区，一个在盆地的西南部，一个在盆地的东北部，其中西南部生成的低涡频次远大于东北部生成的低涡频次。春、夏、秋三个季节盆地涡高频中心分布型与盆地涡总频数分布相似，而冬季盆地涡只在盆地涡东北部出现一相对高频中心。

(2) 两类低涡的月际变化特征明显，均呈现先增加后减少的趋势，西南型盆地涡7月出现次数最多，东北型盆地涡6月出现次数最多，较西南型提前一个月。西南型盆地涡各月出现频数远大于东北型。因此，盆地涡总频数的月际变化与西南型相类似。

(3) 西南型盆地涡和东北型盆地涡的日变化特征不同，西南型盆地涡北京时14:00~20:00（协调世界时06:00~12:00）发生频数最高，而东北型盆地涡北京时20:00~02:00（协调世界时12:00~18:00）发生频数最高，二者在北京时08:00~14:00（协调世界时00:00~06:00）发生频数均为最低，

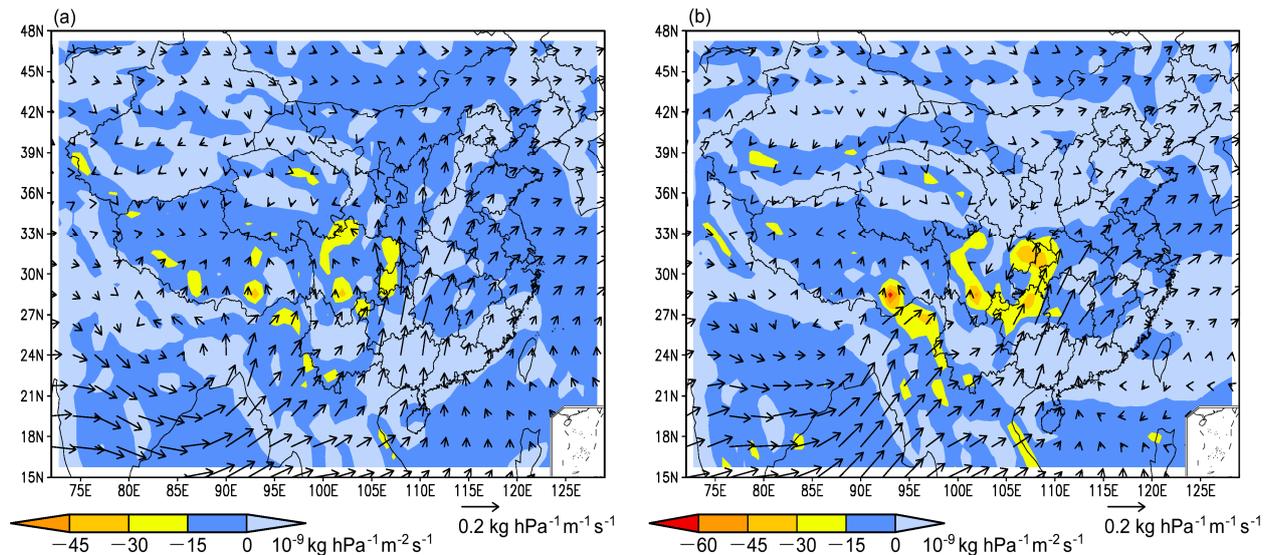


图8 两类盆地涡水汽输送通量场及其散度场：(a)西南型；(b)东北型盆地涡。图中箭头表示水汽输送通量，填色表示水汽散度场，其中水汽输送场的单位为 $\text{kg hPa}^{-1} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ，水汽散度场的单位为 $10^{-9} \text{kg hPa}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Fig. 8 Vapor transportation fluxes (units: $\text{kg hPa}^{-1} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$) and their divergence field (units: $10^{-9} \text{kg hPa}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) for each type of Sichuan Basin vortex: (a) Southwest-type, (b) northeast-type

西南型盆地涡 3~10 月夜间发生概率大于白天, 东北型盆地涡 4~9 月夜间发生概率大于白天。盆地涡具有明显的夜发性特点。

(4) 对流向上没发展起来的浅薄盆地涡以短生命史(生命史 ≤ 24 h)居多, 其中夏季 6~9 月西南型盆地涡会出现即使对流没有发展起来, 其自身也能长时间维持, 然而东北型盆地涡却没有; 对流向上发展起来的深厚盆地涡以长生命史(生命史 > 24 h)居多, 对流向上发展导致的凝结潜热释放能够满足低涡维持自身发展所需的能量, 使盆地涡生命史延长。

(5) 无论西南型盆地涡还是东北型盆地涡, 移出低涡的频数均是随月份先增加后减少, 每年的 7 月、8 月移出盆地的低涡次数最多, 7 月之前低涡移动路径均以偏东路径为主, 但是进入 7 月之后, 东北路径成为主要移动路径。

(6) 盆地上游川西高原九龙地区夏季风场扰动移出活跃, 冬季移出不活跃。而川西高原小金地区春季风场扰动移出活跃, 冬季移出不活跃。九龙地区风场扰动移出对盆地涡频数有重要贡献, 其中对西南型盆地涡频数的贡献大于东北型, 小金地区风场扰动移出对盆地涡频数的贡献相对较小。

(7) 不同类型盆地涡引起的日降水分布各不相同, 夏季半年(5~10 月)西南型盆地涡和东北型盆地涡各自引起的日降水区域分布的月际变化特征不同, 前者的日降水最大值中心随月份先由盆地东北部向西南部移动, 之后再由盆地西南部向东北部折回, 后者的日降水最大值中心会一直稳定维持在盆地的东北部达州地区一带。东北型盆地涡虽然出现频次低, 但各月的日降水强度要远大于西南型盆地涡。

虽然本文在四川盆地涡气候特征及其日降水影响方面, 揭示了一些有意义的事实, 但是, 这只是一个基础性的分析工作, 今后需要进一步深入研究, 尤其是在以下几个方面: 一是利用高时空分辨的观测资料进一步研究。由于本文统计选取的原始资料是再分析资料, 会给最终的统计结果带来一些误差。而目前盆地地区和川西高原获取到的探空资料, 其时空分辨率无法满足西南涡的气候分析要求, 但基于 2010 年开始的西南涡加密观测试验(李跃清等, 2010, 2011, 2012), 等到加密资料积累到一定程度后, 可再对统计结果进行验证与修改; 二是四川盆地涡作为西南涡的一个重要组成部

分, 绝不是一个单一孤立的天气系统, 盆地内生成的低涡与川西高原生成的西南涡有着密切的联系, 然而, 由于目前川西高原观测资料稀缺, 对于位于川西高原的西南涡源研究也还很薄弱, 有待深入分析; 三是关于低涡的定义在盆地西南部的适用性有待验证, 由于本文的研究重点是生成于四川盆地的低涡, 盆地西南部正好西连高海拔的川西高原, 南接云贵高原, 复杂地形背景下, 850 hPa 等压面提取到的位于盆地西南部的低涡往往处于大气边界层内, 湍流摩擦作用明显, 可能会影响到统计结果, 这也是 700 hPa 等压面提取川西高原西南涡时也需要考虑的问题; 四是本文只是从统计学的角度, 对不同时空类型的四川盆地涡及其引起的降水特征进行了分析, 但形成这些差异的机制及其相互联系, 还需要进一步的深入研究。

参考文献 (References)

- 陈启智, 黄奕武, 王琪玮, 等. 2007. 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), 43 (6): 633-642. Chen Qizhi, Huang Yiwu, Wang Qiwei, et al. 2007. The statistical study of the southwest vortex during 1990-2004 [J]. Journal of Nanjing University (Nature Science) (in Chinese), 43 (6): 633-642.
- 陈忠明, 闵文彬. 2000. 西南低涡的统计研究 [M]// 陶诗言, 陈联寿, 徐祥德, 等. 第二次青藏高原大气科学实验理论研究进展. 北京: 气象出版社, 268-378. Chen Zhongming, Min Wenbin. 2000. The statistics and research on Southwest Vortex [M]//Tao Shiyang, Chen Lianshou, Xu Xiangde, et al., Eds. The Progress of Theory Research on the Second Qinghai-Tibet Plateau Atmospheric Experiment (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 268-378.
- 傅慎明. 2009. 引发强降水的西南低涡结构特征及其发生发展机理研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Fu Shenming. 2009. Study on the structure characteristics and formation mechanism of southwest vortex with heavy rainfall [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- Fu S M, Zhang J P, Sun J H, et al. 2014. A fourteen-year climatology of the southwest vortex in summer [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 7 (6): 510-514.
- Jin Xia, Wu Tongwen, Li Laurent. 2013. The quasi-stationary feature of nocturnal precipitation in the Sichuan Basin and the role of the Tibetan Plateau [J]. Clim. Dyn., 41 (3-4): 977-994.
- 李国平. 2007. 青藏高原动力气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 23pp. Li Guoping. 2007. The Qinghai-Tibet Plateau Dynamic Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 23pp.
- 卢敬华. 1986. 西南低涡概论 [M]. 北京: 气象出版社, 58pp. Lu Jinghua. 1986. The Introduction of Southwest Vortex (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 58pp.
- 卢敬华, 陈刚毅. 1993. 西南低涡的一些基本事实及初步分析 [J]. 成都气象学院学报, (4): 7-15. Lu Jinghua, Chen Gangyi. 1993. Some basic

- facts about the Southwest China vortex and their preliminary analysis [J]. *Journal of Chengdu Institute of Meteorology* (in Chinese), (4): 7–15.
- 李跃清, 赵兴炳, 邓波. 2010. 2010 年夏季西南涡加密观测科学试验 [J]. *高原山地气象研究*, 30 (4): 80–84. Li Yueqing, Zhao Xingbing, Deng Bo. 2010. Intensive observation scientific experiment of the Southwest Vortex in the summer of 2010 [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 30 (4): 80–84.
- 李跃清, 赵兴炳, 张利红, 等. 2011. 2011 年夏季西南涡加密观测科学试验 [J]. *高原山地气象研究*, 31 (4): 7–11. Li Yueqing, Zhao Xingbing, Zhang Lihong, et al. 2011. Intensive observation scientific experiment of the Southwest Vortex in the summer of 2011 [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 31 (4): 7–11.
- 李跃清, 赵兴炳, 张利红, 等. 2012. 2012 年夏季西南涡加密观测科学试验 [J]. *高原山地气象研究*, 32 (4): 1–8. Li Yueqing, Zhao Xingbing, Zhang Lihong, et al. 2012. The intensive observation scientific experiment of Southwest China vortex in the summer of 2012 [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 32 (4): 1–8.
- 马振峰, 汪之义. 1993. 西南低涡活动的若干统计分析 [J]. *四川气象*, 13 (2): 11–15, 25. Ma Zhenfeng, Wang Zhiyi. 1993. Some statistics and analysis of Southwest Vortex [J]. *Journal of Sichuan Meteorology* (in Chinese), 13 (2): 11–15, 25.
- 潘旸, 李建, 宇如聪. 2011. 东移西南低涡空间结构的气候学特征 [J]. *气候与环境研究*, 16 (1): 60–70. Pan Yang, Li Jian, Yu Rucong. 2011. Climatic characteristics of the spatial structure of the eastward-moving Southwest Vortex [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 16 (1): 60–70.
- 王作述, 汪迎辉, 梁益国. 1996. 一次西南低涡暴雨的数值试验研究 [C]// *暴雨科学、业务实验和天气动力学理论的研究*. 北京: 气象出版社, 257–267. Wang Zuoshu, Wang Yinghui, Liang Yiguo. 1996. The numeric experiment research on a Southwest Vortex rainstorm [C]// *The Research on Rainstorm Science, Professional Experiment and the Theory Research on Weather Dynamics* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 257–267.
- 徐裕华. 1991. 西南气候 [M]. 北京: 气象出版社, 56–60. Xu Yuhua. 1991. *Climate of Southwest China* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 56–60.
- 云南大学物理系气象专业. 1975. 西南低涡形成及其涡源问题 [J]. *气象*, (4): 11–13. Meteorology Majors in Physics Department of Yunnan University. 1975. The question of formation and cradle about Southwest Vortex [J]. *Meteorology Monthly* (in Chinese), (4): 11–13.
- 谌贵珣, 何光碧. 2008. 2000~2007 年西南低涡活动的观测事实分析 [J]. *高原山地气象研究*, 28 (4): 59–65. Shen Guixun, He Guangbi. 2008. The observed facts analysis of Southwest Vortex from 2000–2007 [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 28 (4): 59–65.
- Zhong R, Zhong L H, Hua L J, et al. 2014. A climatology of the Southwest Vortex during 1979–2008 [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 7 (6): 577–583.