doi:10.11676/qxxb2017.084 气象学报

基于 ERA-interim 再分析资料的近 30 年九龙低涡气候特征*

慕 丹[1,2] 李跃清[3,4]
MU Dan[1,2] LI Yueqing[3,4]

1. 成都信息工程大学,成都,610225
2. 重庆市石柱土家族自治县气象局,石柱,409100
3. 中国气象局成都高原气象研究所,成都,610072
4. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,成都,610072
1. *Chengdu University of Informational Technology*, *Chengdu* 610225, *China*
2. *Chongqing Shizhu Tujia Autonomous County Meteorological Service*, *Shizhu* 409100, *China*
3. *Institute of Plateau Meteorology*, *CMA*, *Chengdu* 610072, *China*
4. *Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province*, *Chengdu* 610072, *China*

2017-02-23 收稿,2017-08-07 改回.

慕丹,李跃清. 2018. 基于 ERA-interim 再分析资料的近 30 年九龙低涡气候特征. 气象学报,76(1):15-31
Mu Dan, Li Yueqing. 2018. Climatic characteristics of the Jiulong low vortex in recent 30 years based on the ERA-interim reanalysis data. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(1):15-31

Abstract Based on the ERA-interim reanalysis data, the weather processes that are associated with the Jiulong low vortex (JLV) have been counted and analyzed during the period of 1 January 1986 to 31 December 2015. The result suggests that T_{1-2}JLVs with a lifespan of 1－2 hours and T_{3-4}JLVs with a lifespan of 3－4 hours usually occur at 100°－101.5°E, 27°－28.5°N; T_{5-6}JLVs with a life span of 5－6 hours usually occur at 102°－103.5°E, 29°－30.3°N, $T_{\geqslant 7}$JLVs with a life span of more than 7 hours usually occur at 101.5°－103.5°E,28°－29.5°N, and vortexes with even longer life spans often occur at the southwestern gap of Sichuan Basin. The occurrence frequency of Jiulong low vortex increased during the past 30 years, but decreased in recent years. Annually, the frequency increases first and then gradually decreases with month, i.e., it increases from January to May and decreases from May to December with the maximum in May and the minimum in September. T_{1-2}JLVs occur most frequently in March and least frequently in September, T_{3-4}JLVs occur most frequently in April and least frequently in December, T_{5-6}JLVs and $T_{\geqslant 7}$JLVs occur most frequently in June, T_{5-6}JLVs never occur from January to April, and $T_{\geqslant 7}$ JLVs occur least frequently in December. Summer is not the highest frequency season for Jiulong low vortex occurrence, but it is the easiest time for long life span Jiulong low vortexes to form and move out of the genesis place. The Jiulong low vortexes with life spans more than 24 hours (T_{5-6}JLV、$T_{\geqslant 7}$JLV) occur more frequently in the night than in the daytime, whereas the nighttime occurrence of vortexes with life spans less than 24 hours (T_{1-2}JLV, T_{3-4}JLV) are not obvious. The frequency of Jiulong low vortexes that can move out of their genesis field first increases and then decreases gradually with month, i.e. the frequency increases from January to June and decreases from June to December with the maximum in June. $T_{\geqslant 7}$JLVs

* 资助课题:国家自然科学基金重点项目(91337215)、国家自然科学基金面上项目(41275051)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006053)、四川省应用基础研究计划重点项目(2016JY0046)。

作者简介:慕丹,主要从事高原天气研究。E-mail: 977541609@qq.com
通讯作者:李跃清,主要从事高原天气和气候研究。E-mail: yueqingli@163.com

mainly move forward following the east path at the first several months, and then follow the southeast path and the northeast path after July. T_{5-6}JLVs move forward only following the east and northeast paths. The Jiulong vortexes with the life span of less than 24 hours may move out of the genesis place because they occur near the edge of the statistical area.

Key words Jiulong low vortex, Regional distribution, Multi-scale time variation, Moving characteristics

摘 要 利用 ERA-interim 再分析资料,统计分析了 1986 年 1 月 1 日—2015 年 12 月 31 日不同生命史九龙涡的时空分布特征和活动规律。结果表明:持续 1—2 个时次的九龙涡(T_{1-2}JLV)和 3—4 个时次的九龙涡(T_{3-4}JLV)初生高频中心位于 27°—28.5°N, 100°—101.5°E,持续 5—6 个时次的九龙涡(T_{5-6}JLV)初生高频中心位于 29°—30.5°N,102°—103.5°E,持续时间大于 7 个时次的九龙涡($T_{\geqslant 7}$JLV)初生高频中心位于 28°—29.5°N,101.5°—103.5°E,生命史越长越易生成于四川盆地的西南部;九龙涡生成频数 30 年呈增长趋势,但近几年呈下降趋势;九龙涡生成频数随月份大致呈先增加后减少的变化趋势,1—5 月随月份增加,5—12 月随月份减少,5 月最大,9 月最小,3 月 T_{1-2}JLV 生成最多,9 月最少,4 月 T_{3-4}JLV 生成最多,12 月最少,6 月 T_{5-6}JLV、$T_{\geqslant 7}$JLV 生成最多,1—4 月无 T_{5-6}JLV 生成,12 月 $T_{\geqslant 7}$JLV 生成最少,夏季九龙涡频数虽不是最高,但最易生成长生命史九龙涡,且最易移出源地;生命史低于 24 h 的九龙涡(T_{1-2}JLV、T_{3-4}JLV)夜发性不突出,生命史超过 24 h 的九龙涡(T_{5-6}JLV、$T_{\geqslant 7}$JLV)具有显著的夜发性特征;移出源地的九龙涡频数随月份表现出先增加后减少的变化趋势,1—6 月随月份增加,6—12 月随月份减少,6 月移出源地的频数最多。$T_{\geqslant 7}$JLV 的移动路径以偏东路径为主,6 月后有东南路径和东北路径,T_{5-6}JLV 移出路径只有偏东路径和东北路径,生命史小于 24 h 的九龙涡由于靠近统计区边缘地区也有可能移出源地。

关键词 九龙涡, 区域分布, 多尺度时间变化, 移动特征

中图法分类号 P447

1 引 言

西南低涡(简称西南涡)是出现在中国青藏高原东南侧川西地区 700(或 850) hPa 等压面的一种 α 中尺度气旋系统,并且,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(卢敬华,1986;李国平,2002;李跃清等,2016),其水平尺度约为 3—5 个经距,多为暖性结构,生命史一般低于 36 h(刘红武等,2008)。西南涡是中国重要的降水天气系统,其造成的暴雨天气影响仅次于台风(王作述等,1996),由其引发的降水区域包括川渝及下游地区(长江流域、淮河流域、华北、东北、华南和陕南等地)(陶诗言等,1980;赵思雄等,2007;陈涛等,2011;刘建勇等,2012)。如 1981 年 7 月 11—15 日四川盆地发生的百年不遇的特大暴雨(程麟生等,1988);1996 年两次西南涡北上造成山东地区大范围的强降水天气(张飒等,1998)和 1998 年整个夏季长江上中下游地区的暴雨洪涝灾害(李跃清,2000;陈忠明等,2003)等。

对西南涡的气候统计分析(卢敬华,1986;徐裕华,1991)是一项非常必要和有意义的基础性工作。关于西南涡的气候特征,已有许多富有成效的研究,取得不少有价值的成果。卢敬华(1986)指出,西南涡的源地在 28°—32°N、99°E 至四川盆地,且有两个比较集中的源区,一是在九龙、巴塘、康定、德钦一带(28°—32°N, 99°—102°E),习惯将初生于此地的西南涡称为“九龙低涡”(简称九龙涡);二是在四川盆地,习惯将初生于此地的西南涡称为“盆地低涡”(简称盆地涡);随着第二次青藏高原大气科学试验(简称 TIPEX)的实施,对西南涡的生成源地有了进一步的认识, 陈忠明等(2000)指出,在九龙涡源区,还有一个孤立的低涡初生高频中心,即“小金生成区”,一般将初生于此区的西南涡称作“小金低涡”(简称小金涡)。目前,对于西南涡的月际和季节变化特征的研究结果不尽相同,一些人认为 5 月是西南涡活动最频繁的月份,春季生成最多(卢敬华等,1993;高正旭等,2009);但也有的研究认为西南涡夏季生成最多,峰值在 6 月(马振锋等,1993;陈忠明等,2000);甚至有人认为西南涡冬季生成最多而非夏季(谌贵珣等,2008;Zhong, et al,2014)。关于西南涡的日变化特征,陈忠明等(2000)和谌贵珣等(2008)均认为西南涡夜间生成的概率频数大于白天;Fu 等(2014)指出,一天里西南涡在 18—00 时(世界时,下同)出现最多;李超等(2015)认为盆地涡具有夜发性特点,其中初生于盆地东北部的西南涡比初生于西南部的西南涡夜发性更为明显。关于西南涡的活动特征,卢敬华(1986)根据低涡移动的移速和总距离将西南涡活动分为不移动、少移动和移动类。关于

西南涡的移动路径,普遍认为主要有 3 条:偏东路径、东南路径和东北路径,其中以偏东路径为主(马振锋等,1993;陈忠明等,2000;陈启智等,2007;谌贵珣等,2008)。近两年,又对西南涡进行了深入精细地划分,如就西南涡某一特征统计分析其时空分布和活动规律。Fu 等(2014)对生命史超过 12 h 的西南涡,根据其是否引发降水以及在其生成前 6 h 地面是否有低压中心,将西南涡分为 4 类并分析了其属性和移动规律;Yu 等(2016)统计分析了伴有高原低涡(简称高原涡)的西南涡活动特征及其对降水的影响;李超等(2015)基于西南涡 3 个主要源地,进一步细划了盆地涡涡源,统计分析了初生于四川盆地不同区域西南涡的时空分布特征、活动规律和降水影响以及与其他源地的相互关系。

值得一提的是,李超等(2015)的研究表明:西南涡的九龙、四川盆地、小金 3 个主要涡源并不是孤立的,而是相互联系的。其中,位于上游川西高原南部的九龙涡源,对于下游的盆地涡源有明显影响。并且,从低涡的生成频数、移动及其影响上,九龙涡源都是西南涡 3 个涡源中最重要的。九龙涡的源地维持或东移发展,不仅是西南地区降水的主要触发因子,而且会影响到青藏高原下游中国广大地区的降水(Chen,et al,2015)。图 1 是一次九龙涡影响的长江下游地区降水过程。但是,以前多是将西南涡 3 个涡源放在一起统计分析,还没有对其进行过单个细致深入地分析,且对九龙涡也没有统一的详细定义(卢敬华,1986;徐裕华,1991;陈忠明,2000)。因此,根据表 1 给出的 2012—2014 年西南涡活动情况(中国气象局成都高原气象研究所,2013,2015,2016),针对西南涡生成最多、最集中(卢敬华,1986;

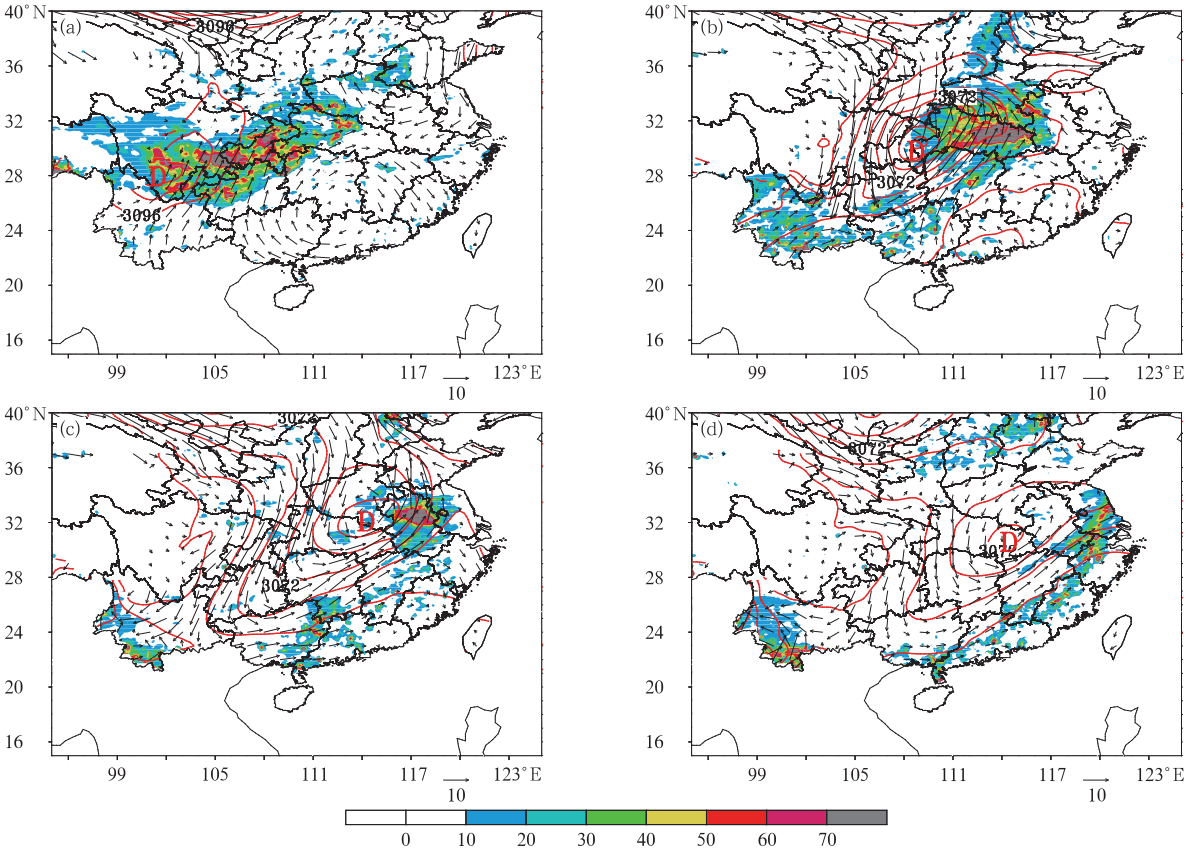


图 1　2015 年 7 月 14—17 日一次九龙涡过程 700 hPa 流场形势(红色等值线:位势高度场,单位:gpm;风场:矢线,单位:m/s)及其 24 h 降水(色阶,单位:mm)分布

(a. 14 日 00 时, b. 15 日 00 时, c. 16 日 00 时, d. 17 日 00 时)

Fig. 1　The circulation pattern (red isolines of geopotential height, unit: gpm; wind field: vector, unit: m/s) and 24 h precipitation distribution (shaded area, unit: mm) of one Jiulong vortex process from 14 to 17 July 2015

(a. 00:00 UTC 14 July, b. 00:00 UTC 15 July, c. 00:00 UTC 16 July, d. 00:00 UTC 17 July)

表 1 西南低涡年鉴 2012—2014 年逐年的低涡频数

Table 1 The occurring frequency summary of the Southwest China Vortex (SCV) in the SCV Yearbook

年份	盆地涡			九龙涡			小金涡		
	移出频数	未移出频数	合计	移出频数	未移出频数	合计	移出频数	未移出频数	合计
2012	7	46	53	17	39	56	5	4	9
2013	13	34	47	17	28	45	9	5	14
2014	10	18	28	18	15	33	8	1	9

徐裕华,1991;陈忠明等,2000),也是下游盆地涡的重要扰动影响源的九龙涡源区(李超等,2015),重点分析初生于此区的西南涡,在调整和补充九龙涡定义的基础上,研究不同生命史九龙涡的时空分布特征和活动规律,为西南涡生成特征、演变机制和重要影响的进一步研究奠定基础。

2 数据与方法

从青藏高原东南缘与四川盆地过渡带的海拔高度与站点分布(图 2)可以看到,该区域地形非常复杂,高度变化剧烈,站点尤其是探空站点稀少,代表性差,且呈“东多西少”极不均匀的分布状态,这是长期影响西南涡研究与预报的一个首要问题,并给初生于川西高原的西南涡监测带来很大困难。为了从源头逐步解决这一基础问题,2010 年开始,中国气象局成都高原气象研究所每年夏季发起了为期 41 d 的西南涡加密观测大气科学试验(李跃清等,2010;2011;2012),在一定程度上弥补了观测资料稀少的缺陷,并取得明显成效(李跃清等,2016)。但是,由于布站年限短,且只针对夏半年的西南涡进行监测,无法满足对西南涡长时间全年候的持续监测。Bao 等(2013)指出,ERA-interim 再分析资料由于同化了大量卫星资料,在缺乏常规观测资料的青藏高原地区相对比较准确。近年来,已有将 ERA-interim 再分析资料应用于西南涡的统计分析,并取得了一些有意义的成果(王金虎等,2015;李超等,2015)。因此,针对探空资料缺乏的川西高原地区,利用再分析资料,结合探空资料订正,对西南涡的长时间持续监测和统计分析应该是一种较好的现实选择。为此,选取的资料为 1986 年 1 月 1 日 00 时至 2015 年 12 月 31 日 18 时、每日 4 个时次、水平分辨率 0.25°×0.25°的 ERA-interim 位势高度场和风场再分析资料。

对比表明:已有的九龙涡定义(卢敬华,1986;徐裕华,1991;陈忠明等,2000;中国气象局成都高原气象研究所,2013,2015,2016)不一致,主要体现在九龙涡初生位置的地理范围。卢敬华(1986)认为九龙涡是指生成于九龙、巴塘、康定、德钦一带(28°—34°N,99°—102°E)的西南涡;徐裕华(1991)将九龙、巴塘、德钦、康定、昌都一带(28°—34° N,97°—102°E)生成的西南涡定义为九龙涡;陈忠明等(2000)将 27°—30°N,100°—103°E 范围内生成的西南涡称作九龙涡;而中国气象局成都高原气象研究所(2013,2015,2016)的《西南低涡年鉴》中,九龙涡是指生成于 99° E 以东至 104° E、26° N 以北至 30.5°N 范围内的低涡。需要指出的是:这些定义存在一个基本问题,就是定义范围内有的地区海拔高度已超过 4000 m,如巴塘等区域(图 2),与西南涡发生于 700 或 850 hPa 的定义相矛盾,急需修改完善。因此,为了避免上述问题,将出现在 26°—32° N、99°—104°E,且 102°E 以西不考虑 30°N 以北地区的范围内,满足西南涡定义的 700 hPa 低涡称为九龙涡。具体条件分别为:(1)上述范围位势高度场有低值中心出现,至少有一条闭合或趋于闭合(不少于 3/4 个圆周)的等值线,风场有不少于 3/4 圆周的气旋性环流;在丽江、西昌、康定一带,风场有气旋性切变,位势高度场至少有一条不少于 1/2 圆周的等值线,且持续时间达到或超过两个时次,也定义为一次九龙涡(黄旭,1993);(2)成熟时期低涡最外层闭合等值线内对应有风场的散度低值中心(中心数值不大于 10^{-5});(3)成熟时期低涡最外层闭合等值线内对应有风场的涡度高值中心(Feng,et al,2016);(4)系统的水平尺度为 200—500 km。此外,西南涡的维持时间及其发展对未来天气和降水有重要影响,其生命史是研究西南涡的一项重要特征指标。同时,由于常规探空资料时间分辨率为每日两次(00、12 时),容易漏测生命史小于 12 h 的低涡,为了便于与常规探空资料结果对比,根据低涡生命史的不同,将九龙涡划分为维持时间 1—2 个时次(简称 T_{1-2}JLV)、3—4 个时次(简称 T_{3-4}JLV)、5—6 个时

次(简称 T_{5-6}JLV)、不少于 7 个时次(简称$T_{\geqslant 7}$JLV)的 4 类低涡,对应的生命史分别为<18、<30、<42和≥42 h。

具体统计方法为:首先,基于 ERA-interim 再分析资料的近 30 年数据,按照上述定义条件对九龙涡进行人工识别,统计九龙涡的中心位置、初生时间、移动情况、水平尺度、生命史等反映低涡活动的基本特征量;其次,参考中国气象局 MICAPS 天气图、连续 7 年(2010—2016 年)西南涡加密观测资料以及中国气象局成都高原气象研究所研编的《西南低涡年鉴》(2012—2014),对基于再分析资料人工识别的九龙涡结果进行进一步验证和适当订正。发现由再分析资料统计的九龙涡频数与用常规气象资料统计的九龙涡频数略有差异,这可能是由于两种资料分辨率不同、观测时段存在差异导致的,但一些生命史较长的低涡,两种资料统计结果基本一致;最后,分析 4 类不同生命史九龙涡的年际变化、季节变化、月际变化、日变化及其空间分布特征,以及活动规律。

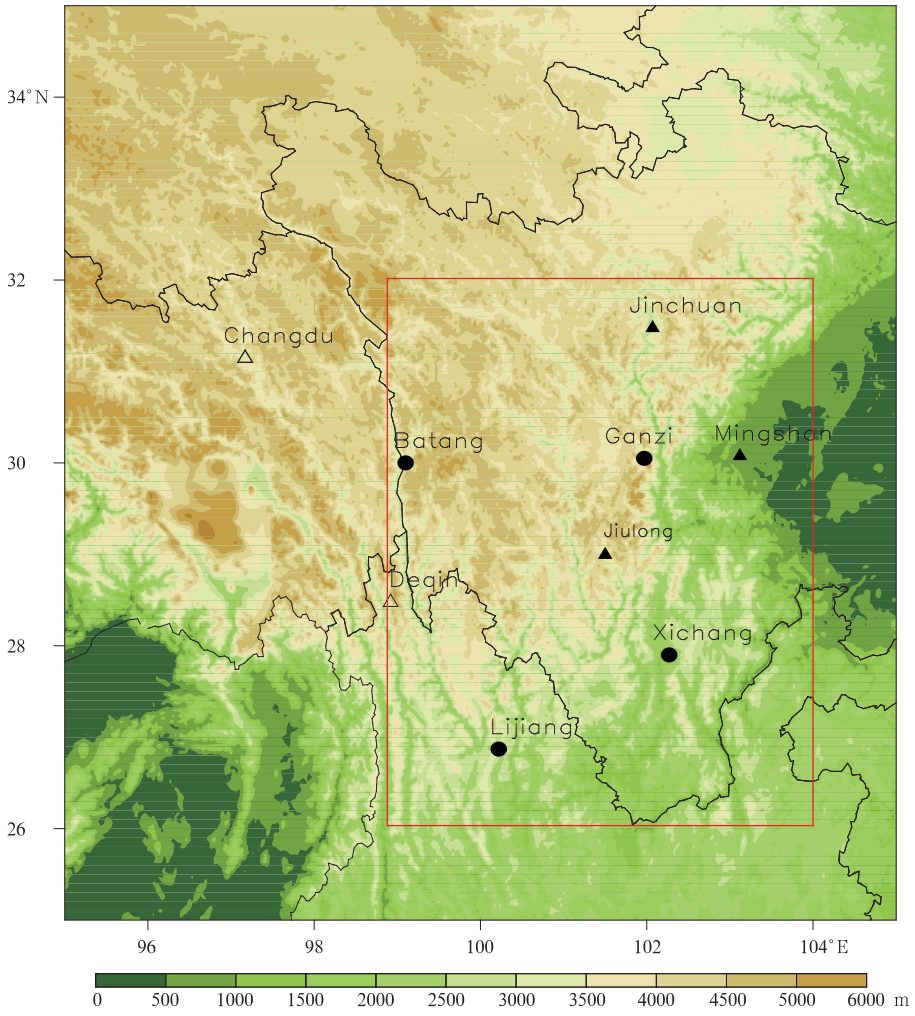


图 2　川西高原周边海拔高度和站点分布

(●为常规探空站,甘孜、巴塘、西昌、丽江;△为海拔高度高于 3000 m 的常规探空站:德钦、昌都;▲为加密探空站:九龙、名山、金川;红框:九龙涡的地理范围)

Fig. 2　Distributions of altitude and weather station around western Sichuan Plateau

(● Conventional sounding stations: Ganzi, Batang, Xichang, Lijiang; △ Conventional sounding stations with more than 3000 m altitude: Deqin, Changdu; ▲ Intensive observation sounding stations of Scientific Experiment of the Southwest China Vortex: Jiulong, Mingshan, Jinchuan; red frame: the geographic area of Jiulong low vortex)

3 九龙涡生成频数的区域分布

根据九龙涡初生时(第1个时次)中心位置(涡旋中心经、纬度),统计得到了1986—2015年30年九龙涡频数的区域分布(图3—6)。图3是T_{1-2}JLV初生时的频数分布特征,可见T_{1-2}JLV初生的高频中心主要集中在(27°—28.5°N,100°—101.5°E),四川盆地西南缺口处有极少数的短生命史九龙涡生成;由图4看到,T_{3-4}JLV初生时的高频中心与T_{1-2}JLV一致,不同的是四川盆地西南缺口处T_{3-4}JLV生成频数更多,且涡源位置更偏东;由图5可以发现T_{5-6}JLV类九龙涡集中在(29°—30.3°N,102°—103.5°E)(四川盆地的西部缺口);而$T_{\geqslant 7}$JLV初生时的高频中心主要集中在(28°—29.5°N,101.5°—103.5°E),在该高频中心的北部(四川盆地西北部)也有少数生命史超过42 h的九龙涡生成(图6)。

由上可知,九龙涡初生时的频数高频中心主要集中在以下3个区域:(1) 27°—28.5°N,100°—101.5°E,在此区域生成的九龙涡生命史不超过30 h;(2) 29°—30.5°N,102°—103.5°E,在此区域内生成的九龙涡生命史不超过42 h;(3) 28°—29.5°N, 101.5°—103.5°E,在此区域内生成的九龙涡生命史至少为36 h。这比前期九龙涡涡源的划分更为精细、准确,且大多数九龙涡生成在第一个区域,但持续时间短,而生命史越长的九龙涡,初生时的位置越偏东,主要位于四川盆地西部、西南部与川西高原的交界处,也就是说,四川盆地与川西高原的交界处更易形成长生命史的九龙涡。

王其伟等(2006)通过理想条件下的数值模拟,发现西南涡形成存在3个比较明显的涡度来源:(1)与四川盆地和青藏高原相衔接处对应的Ⅰ区;(2)与青藏高原东南缘横断山脉相对应的Ⅱ区;(3)与青藏高原背风槽相对应的Ⅲ区。对比不难发现,九龙涡初生频数的3个集中区域与上述3个涡度源有较好对应关系。九龙涡3个集中涡源,可能就是在一定大气环流条件下,特殊地形引起的某一区域涡度源显著集中分布使九龙涡频繁初生于此地导致的。而且,九龙地区大尺度地形走向为西南—东北向,而3个集中涡源区局地地形走向都为东南—西北向。因此,整个地形走向表现出气旋式弯曲,在此复合地形影响下,低纬度气流流过易产生气旋式环流,可见地形动力作用在九龙涡的形成过程中具有重要作用。

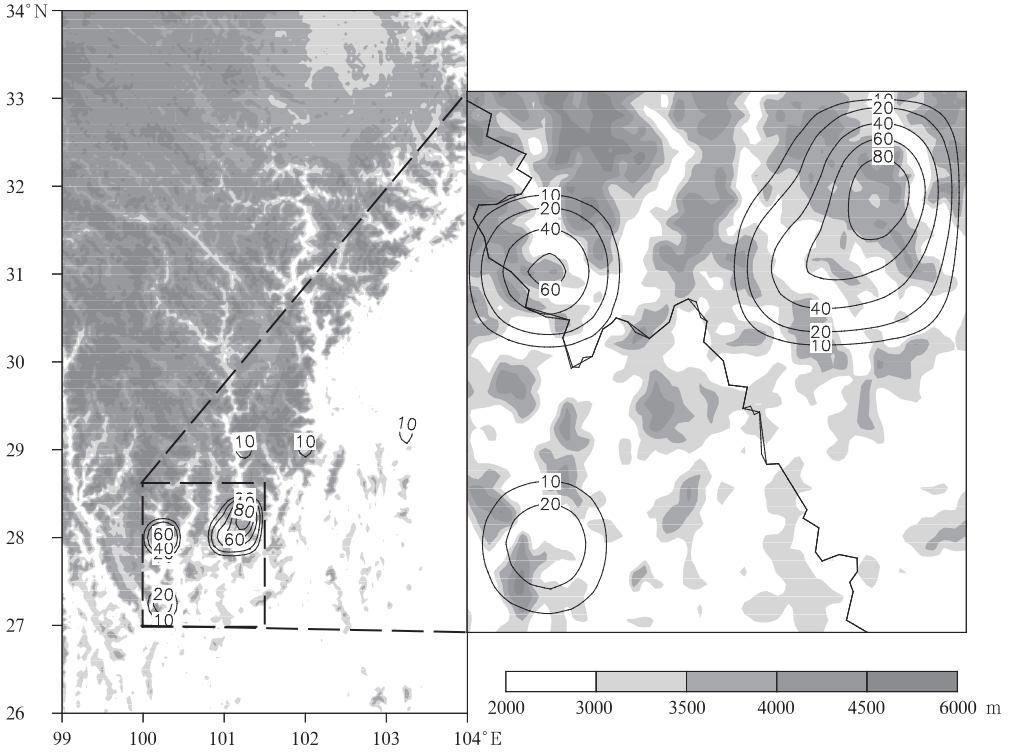


图3 持续1—2个时次九龙涡(T_{1-2}JLV)生成频数的区域分布

Fig. 3 Geographic distribution of T_{1-2}JLV occurrence frequency

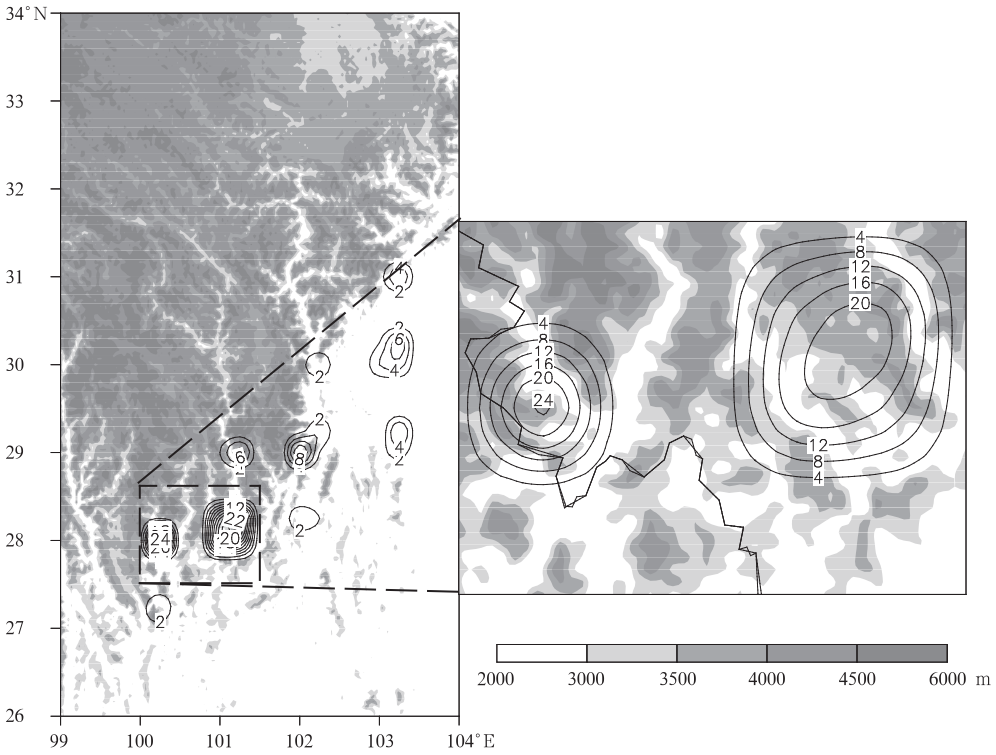


图 4　持续 3—4 个时次九龙涡(T_{3-4}JLV)生成频数的区域分布

Fig. 4　Geographic distribution of T_{3-4}JLV occurrence frequency

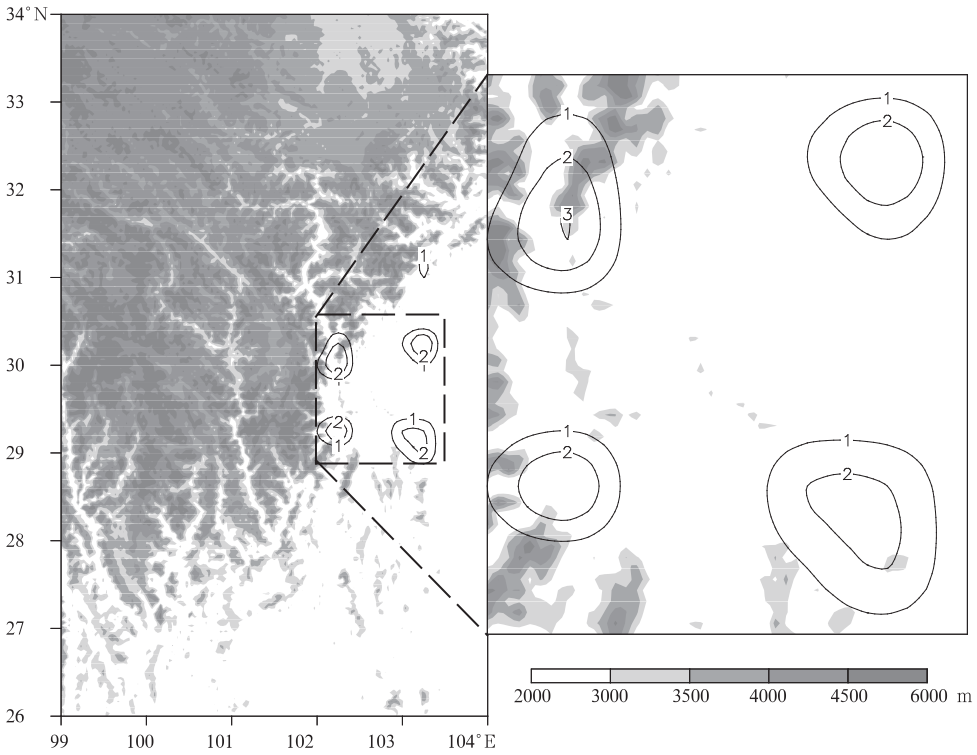


图 5　持续 5—6 个时次九龙涡(T_{5-6}JLV)生成频数的区域分布

Fig. 5　Geographic distribution of T_{5-6}JLV occurrence frequency

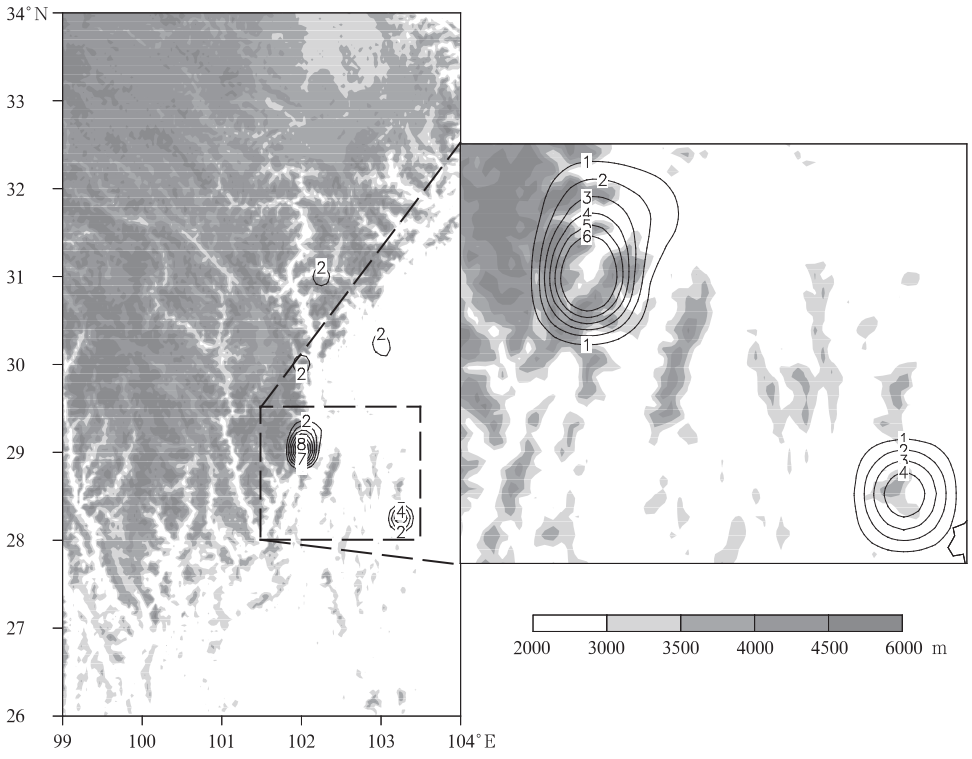


图 6 持续不少于 7 个时次九龙涡($T_{\geqslant 7}$JLV)生成频数的区域分布

Fig. 6 Geographic distribution of $T_{\geqslant 7}$JLV occurrence frequency

Wang 等(2014)通过理想数值试验再次得到,影响涡度源强度的主要有地面摩擦、大气的伸展、倾斜和绕山而过的西南急流,而持续时间 5 个时次以上的九龙涡(T_{5-6}JLV、$T_{\geqslant 7}$JLV)初生在川西高原(贡嘎山、大凉山、邛崃山)与四川盆地的交界处,这可能是由于这些地区的上述影响因素更突出,形成的涡度源强度更深厚,更有利于九龙涡的进一步维持和发展。当然,九龙涡的维持和发展,除与地形动力强迫有关外,还与凝结潜热释放的非绝热强迫、地面感热(Feng,et al, 2016)、区域环流等不同系统有密切的关系。

4 九龙涡的多尺度时间变化

4.1 九龙涡年际变化特征

根据上述九龙涡定义,1986—2015 年共出现九龙涡 753 个,平均每年 24.1 个,比陈忠明等(2000)和陈启智等(2007)基于天气图得到的年均 30.1 和 30.7 个略低。虽然这种差异与所选资料的类型和时长有关,但此处对九龙涡的定义更加合理、严格。其中,T_{1-2}JLV 共 484 个,占全部九龙涡的 64%;T_{3-4}JLV 共 190 个,占 25%;T_{5-6}JLV 共 30 个,占 4%,$T_{\geqslant 7}$JLV 共 49 个,占 7%。由此可见,生命史超过 24 h 的九龙涡仅占全部九龙涡的 11%,绝大多数九龙涡生成后在 24 h 内消亡。由图 7 可知,2009 年出现九龙涡最多,共生成 48 个,1993 年生成最少,仅 12 个,两者相差 3 倍;气候倾向率每 10 年增加 1 个,标准差 8.4 个,具有较强的年际变化特征;近 10 年九龙涡呈明显的减少趋势;对九龙涡个数标准化处理(叶瑶等,2016),$I_{JLV}>1$ 的九龙涡高发年有 2008—2012 年,$I_{JLV}<-1$ 的九龙涡低发年有 1987、1993、1998、2000 年。

九龙涡这种明显的年际变化,是与低纬度低层气流的年际变化及其与复合地形的作用相联系的。九龙涡多发年,低涡生成区低层流场西南风异常强,气旋性切变增大,低纬度季风加强,偏南风旺盛且辐合异常,使得角动量输送增加;九龙涡少发年,生成区低层北风异常强,低纬度季风减弱,偏南风减弱且为辐散异常,角动量输送减弱(叶瑶等,2016)。

图 8 给出了 4 类九龙涡频数的 30 年年际变化特征。2009 年 T_{1-2}JLV 生成最多,共 33 个,1993 年生成最少,仅 7 个,此类九龙涡 30 年呈增多趋势,10 年阶段性趋势与九龙涡总频数差别不大(图 8a);

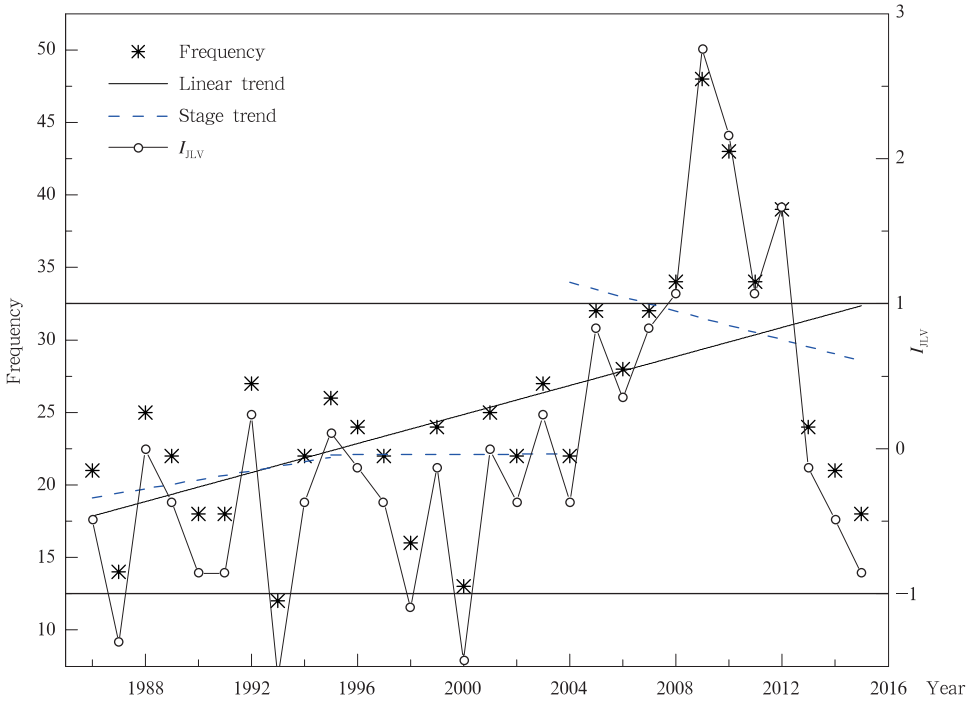


图 7　1986—2015 年九龙涡频数和标准化序列(I_{JLV})年际变化

Fig. 7　Interannual variability of occurrence frequency and normalized time series (I_{JLV}) of Jiulong low vortex from 1986 to 2015

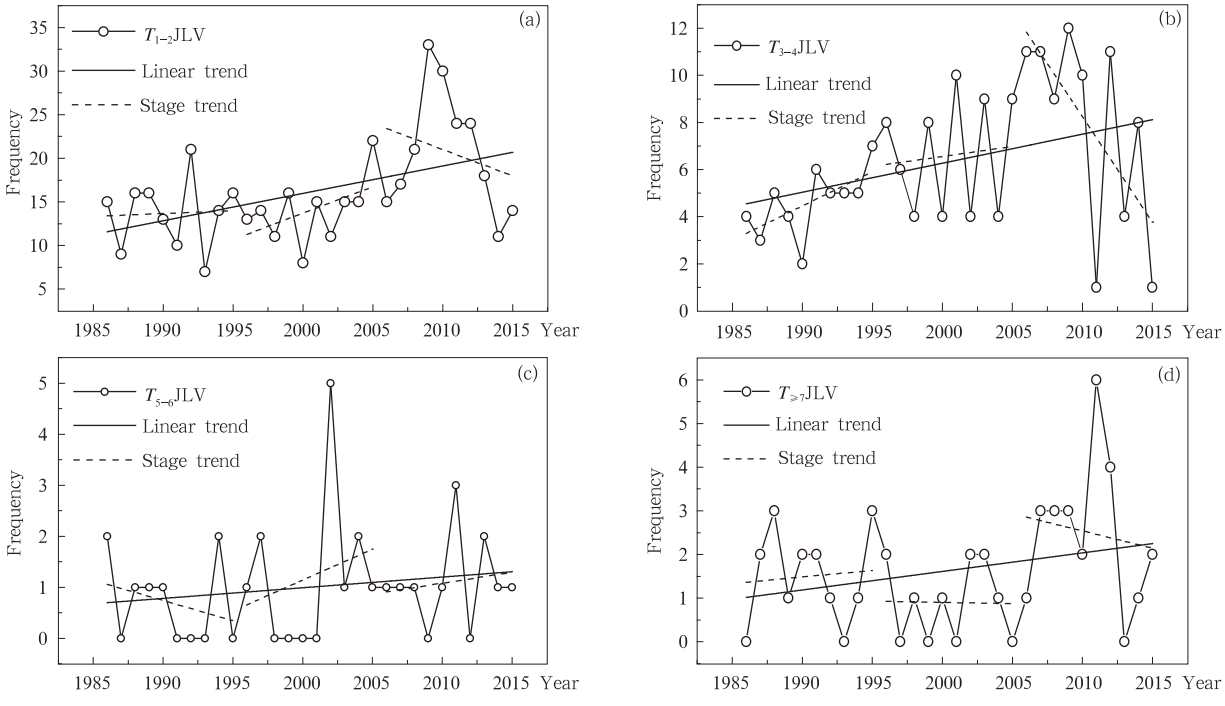


图 8　1986—2015 年 4 类九龙涡的年际变化特征

(a. T_{1-2}JLV, b. T_{3-4}JLV, c. T_{5-6}JLV, d. $T_{\geqslant 7}$JLV)

Fig. 8　Interannual variability of occurrence frequency for the four types of Jiulong low vortex from 1986 to 2015

(a. T_{1-2}JLV, b. T_{3-4}JLV, c. T_{5-6}JLV, d. $T_{\geqslant 7}$JLV)

2009 年 T_{3-4}JLV 出现最多,共 12 个,2011 和 2015 年出现最少,均为 1 个(图 8b);2002 年 T_{5-6}JLV 出现最多,共 5 个,30 年有 11 年无 T_{5-6}JLV 生成,第 1 个 10 年阶段 T_{5-6}JLV 呈降低趋势,第 2 个 10 年阶段呈增加趋势,与前面几类低涡对应的 10 年阶段趋势相反(图 8c);2011 年 $T_{\geqslant 7}$JLV 生成最多,共 6 个,30 年有 7 年没有 $T_{\geqslant 7}$JLV 生成(图 8d)。对比图 7 与 8 得到:4 类九龙涡,仅 T_{1-2}JLV 年际变化特征与九龙涡总频数一致,再次说明九龙涡以短生命史(不超过 18 h)为主,这可能是由于九龙地区特殊的地理环境,导致大多数九龙涡由单纯的动力作用触发产生,故持续时间较短(濮梅娟等,1989)。

4.2 九龙涡月际变化特征

从 1986—2015 年共 30 年九龙涡总频数的月际变化及趋势(图 9)可以看出,九龙涡频数随月份变化呈先增加后减少的趋势,12—5 月主要为增加,5—12 月主要为减少,5 月生成频数最多,共有 111 个,10 月生成最少,仅 26 个。九龙涡的这种月际变化与卢敬华等(1993)所得结果一致。5 月为冬季风向夏季风过渡时期,正是西南涡出现频率最高的时段,10 月为夏季风向冬季风过渡时期,不利于低涡的生成,故出现频数为一年中最低值。但与陈忠明等(2000)、陈启智等(2007)统计的西南涡月际变化有差异,由于早期研究(卢敬华等,1993)九龙涡所占比例为 86.3%,而后期研究(陈忠明等,2000;陈启智等,2007)包括了小金涡与盆地涡,九龙涡所占比例为 40%—50%;九龙涡春季生成最多,夏季、冬季次之,秋季最少,这与九龙涡夏季生成最多,秋季次之,冬春季最少的已有结果(陈忠明等,2000)差异较大。造成这种差异的原因可能是两者所选资料类型、时长以及对九龙涡定义不同所导致的。不过,西南涡的季节变化特征是与大气环流形势的季节变化以及青藏高原地形的作用有关。

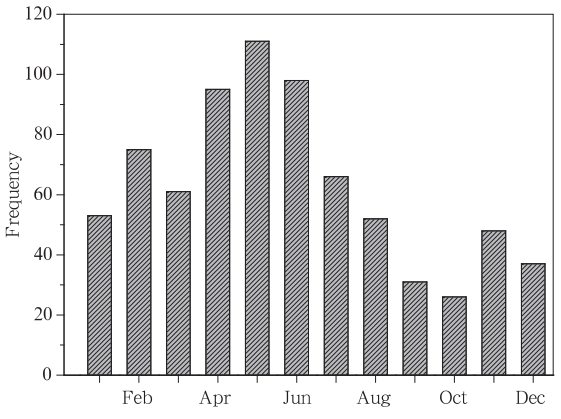


图 9 1986—2015 年九龙涡的月际变化特征

Fig. 9 Annual variation of occurrence frequency of Jiulong low vortex from 1986 to 2015

并且,3 月九龙涡 T_{1-2}JLV 生成频数最多,共 74 个,9 月最少,共 12 个(图 10a);4 月 T_{3-4}JLV 生成频数最多,共 34 个,12 月最少,共 4 个(图 10b);而 6 月 T_{5-6}JLV、$T_{\geqslant 7}$JLV 生成频数最多,共 25 个(图 10c、d),但 10—12 月、2 月没有生成。这说明 6 月大气环流条件最有利于长生命史九龙涡的维持和发展。

另外,生命史小于 24 h 的九龙涡(T_{1-2}JLV、T_{3-4}JLV)生成频数随月份呈减少趋势,生命史大于 24 h 的九龙涡(T_{5-6}JLV、$T_{\geqslant 7}$JLV)生成频数随月份呈增加趋势(图 10)。结合图 9、10 可以看到,与以往的研究结果(马振锋等,1993;陈忠明等,2000)有所不同的是,夏季九龙涡生成频数不是最多,但其维持时间更长且更易移出,春季九龙涡生成频数最多,但其维持时间不长。这可能与春季中低纬度大气环流不断活跃但不够稳定,夏季中低纬度大气环流发展且稳定有密切的关系。

4.3 九龙涡日变化特征

分析计算了 4 类九龙涡在一天的 18—00 时、00—06 时、06—12 时、12—18 时 4 个时段的发生频数。其统计标准是:九龙涡首次在 12—18 时或 18—00 时出现,定义为夜间生成的九龙涡,否则为日间生成的九龙涡。此外,九龙涡夜间发生概率为九龙涡夜间生成频数除以九龙涡生成总频数。由此得到,九龙涡在 18—00 时生成频数为 121 个,00—06 时生成频数为 37 个,06—12 时生成频数为 271 个,12—18 时生成频数为 324 个,夜间发生概率为 59%。虽然夜间发生最多,但夜发性并不是很突出,且午后开始增多,白天后半天发生第二多,为 36%,夜间前半夜发生最多,为 43%。九龙涡主要生成于 06—18 时,其中,春、冬季主要生成于 06—12 时,而夏、秋季主要生成于 12—18 时(图 11)。这可能与九龙地区地面感热加热的日变化密切相关(李国平

等,1991;赵平等,1991),而且,夏、秋季白天地面热源强,地面加热作用持续时间长,可影响到入夜后的大气运动,但春、冬季白天地面热源弱,地面加热作用持续时间短,主要影响到下午和傍晚的大气运动。

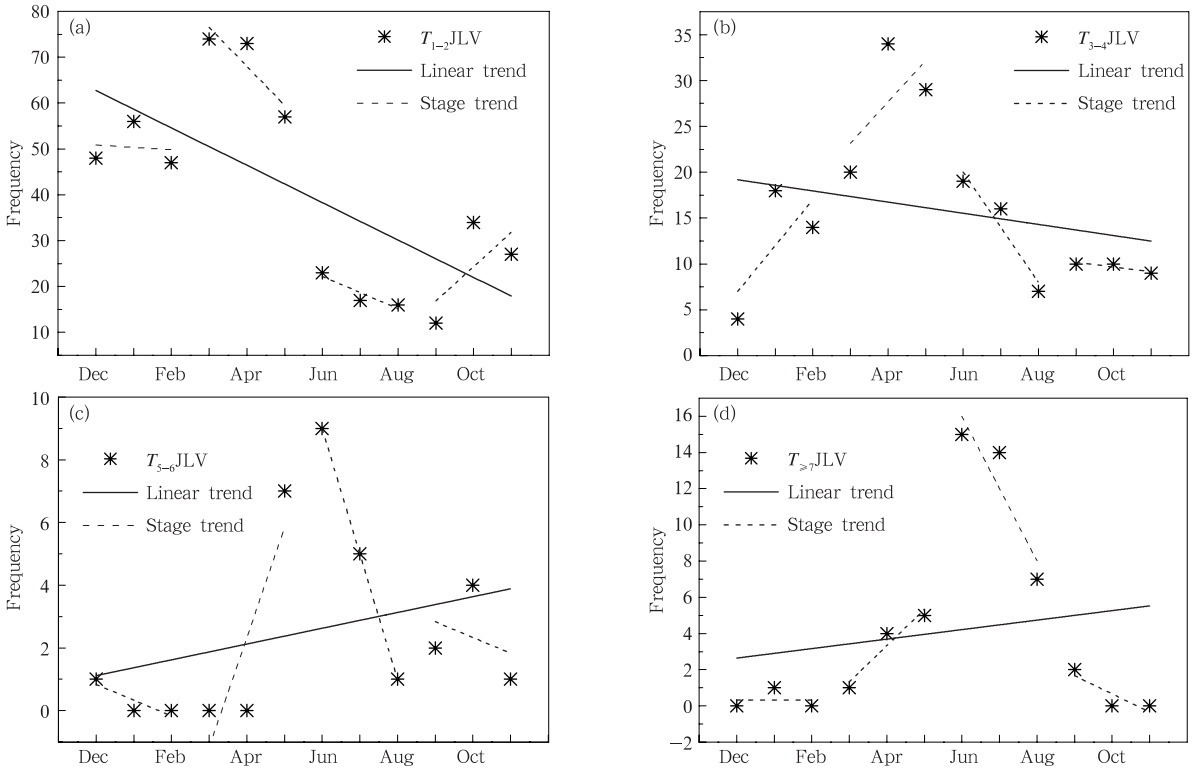


图 10　1986—2015 年 4 类九龙涡的月际变化特征

(a. T_{1-2}JLV, b. T_{3-4}JLV, c. T_{5-6}JLV, d. $T_{\geqslant 7}$JLV)

Fig. 10　Annual variation of occurrence frequency for the four types of Jiulong low vortex from 1986 to 2015

(a. T_{1-2}JLV, b. T_{3-4}JLV, c. T_{5-6}JLV, d. $T_{\geqslant 7}$JLV)

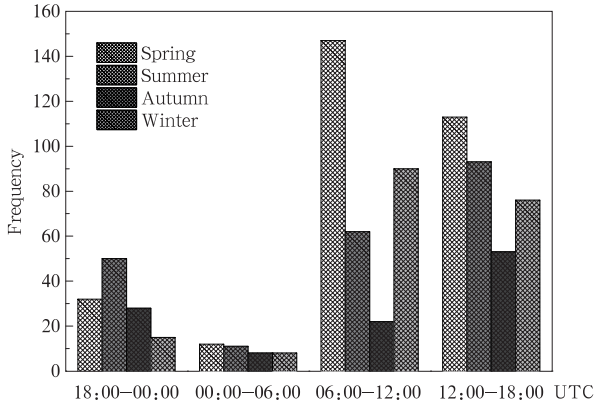


图 11　各个季节九龙涡的日变化特征

Fig. 11　Diurnal variation of occurrence frequency of Jiulong low vortex at the four seasons

图 12 表明,生命史小于 24 h 的九龙涡(T_{1-2}JLV、T_{3-4}JLV)在 06—12 时生成频数最高,此类九龙涡主要出现在前半夜,其次在午后,后半夜明显减少,夜发性不很突出;生命史大于 24 h 的九龙涡(T_{5-6}JLV、$T_{\geqslant 7}$JLV)在 12—00 时生成频数最高,夜发概率均超过了 80%,主要从前半夜一直维持到后半夜,日间明显减少,夜发性十分显著。由于移动性的九龙涡生命长,所以,生命史大于 24 h 的九龙涡夜发性应该与四川盆地夜雨的发生相关,尤其是盆地后半夜的夜雨现象,值得深入研究。

5　九龙涡移动特征

关于九龙涡的移动特征,统计标准是:九龙涡的涡旋中心移出统计区(26°—34°N,99°—104°E)定

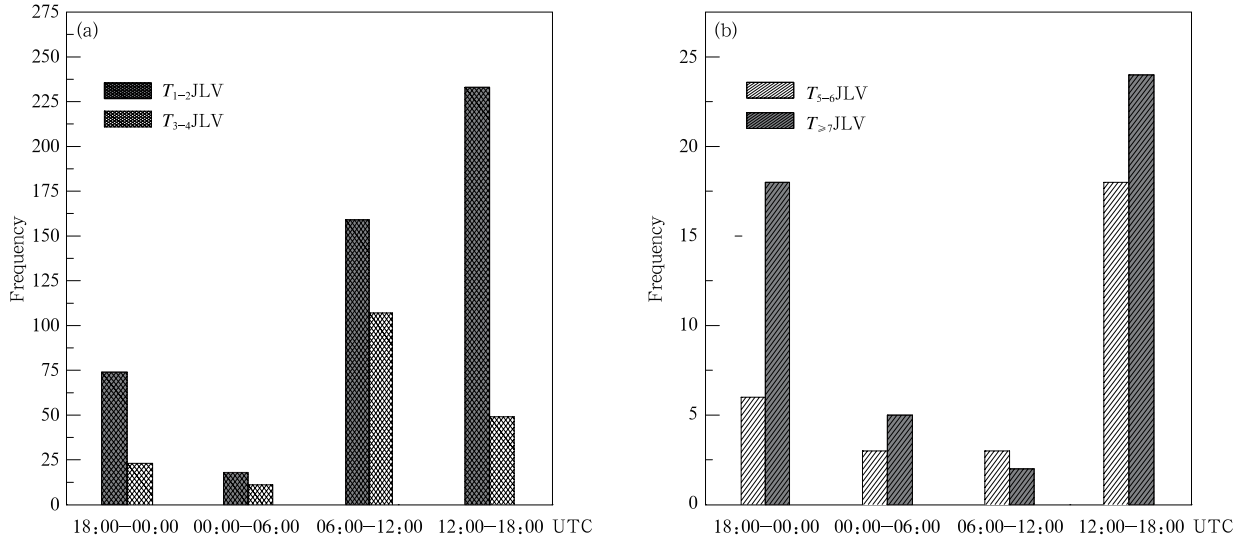


图 12 4 类九龙涡的日变化特征

(a. T_{1-2}JLV 和 T_{3-4}JLV, b. T_{5-6}JLV 和 $T_{\geqslant 7}$JLV)

Fig. 12 Diurnal variation of occurrence frequency for the four types of Jiulong low vortex

(a. T_{1-2}JLV and T_{3-4}JLV, b. T_{5-6}JLV and $T_{\geqslant 7}$JLV)

为移出源地。分析得出 30 年 753 次九龙涡过程,有 176 次低涡移出了统计区,占全部九龙涡频数的 23.4%。从九龙涡移动的月际变化特征(图 13)可以看到,能够移出源地的九龙涡频数随月份表现出先增加后减少的变化趋势,1—6 月为增加,6—12 月为减少,6 月移出源地频数最多,1、2、11、12 月最少;九龙涡 1—5 和 10—12 月以源地生消为主,移出源地很少,但 6—9 月虽然生成的九龙涡频数较少,但绝大多数都能移出源地,移出频数占全年全部移出频数的 54%,表明 6—9 月大气环流形势更有利于九龙涡的发展移动,这应该与青藏高原东南部夏半年中低纬度特定的偏南夏季风环流影响密切有关,而冬半年大气环流不利于其移出发展。

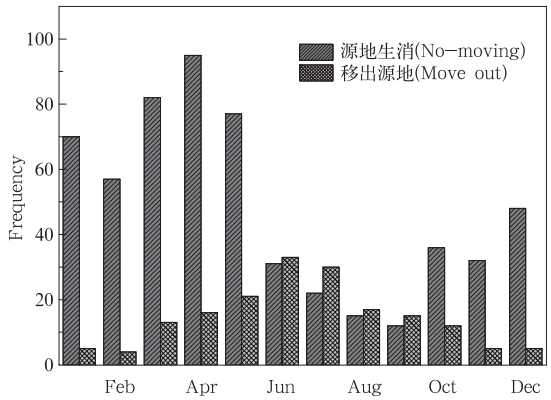


图 13 九龙涡移动的月际变化特征

Fig. 13 Annual variation of movement of Jiulong low vortex

进一步分析不同生命史的九龙涡移动特征。统计得出 30 年有 49 个 $T_{\geqslant 7}$JLV 九龙涡,且全部移出统计区;T_{5-6}JLV 有 30 个,其中 27 个移出统计区。故不再分析这两类长生命史九龙涡移出频数的月际和年际变化,只统计两类九龙涡移出后不同路径的频数分布(图 14—15)。但是,30 年有 190 个 T_{3-4}JLV 生成,其中 61 个移出统计区,占此类九龙涡频数的 32.1%,图 16 进一步给出了此类九龙涡移出源地频数的年际、月际变化特征和移出后不同路径的频数分布。

关于西南涡的移动方向,根据其路径一般分为 3 种:东北、偏东和东南向(陈忠明等,2000)。由图 14所示,$T_{\geqslant 7}$JLV移出统计区后3种移向均有可能发生,但以偏东路径为主;7 月前,$T_{\geqslant 7}$JLV 的移向以偏东为主,其次为东北,东南很少,7 月后,此类九龙涡的东南移向增多,与偏东相当,东北较少;6 月前,九龙涡移向只有偏东和东北路径,而 6—8 月 3 种路径均有发生,但主要是偏东和东北路径,8 月后只有偏东和东南路径。30 年大多数 $T_{\geqslant 7}$JLV 移向为偏东和东北路径,分别占全部 $T_{\geqslant 7}$JLV 移出频数的 61%、26.5%,东南路径仅有 6 次,占全部 $T_{\geqslant 7}$JLV 移出频数的12%。实际上,当低涡东南象限出现西

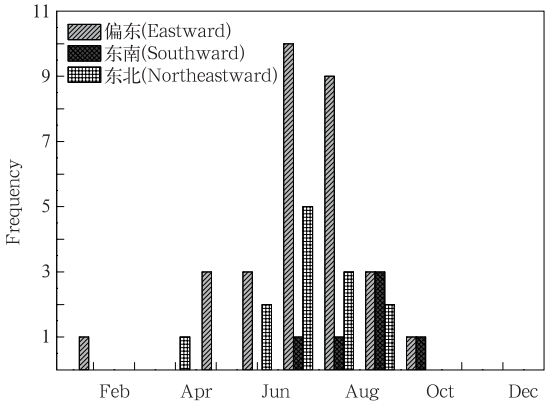


图 14　持续不少于 7 个时次移出九龙涡($T_{\geqslant 7}$JLV)不同路径出现频次的月际分布

Fig. 14　Annual variation of occurrence frequency for the different moving paths of Jiulong low vortex with the lifespan equal or greater than 7 hours ($T_{\geqslant 7}$JLV)

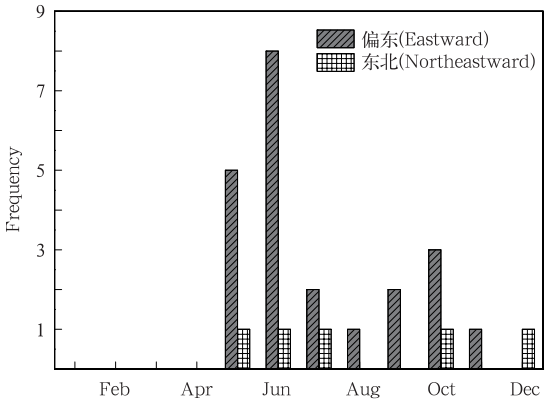


图 15　持续 5—6 个时次移出九龙涡(T_{5-6}JLV)不同路径出现频次的月际分布

Fig. 15　Annual variation of occurrence frequency for the different moving paths of Jiulong low vortex with the lifespan of 5 or 6 hours (T_{5-6}JLV)

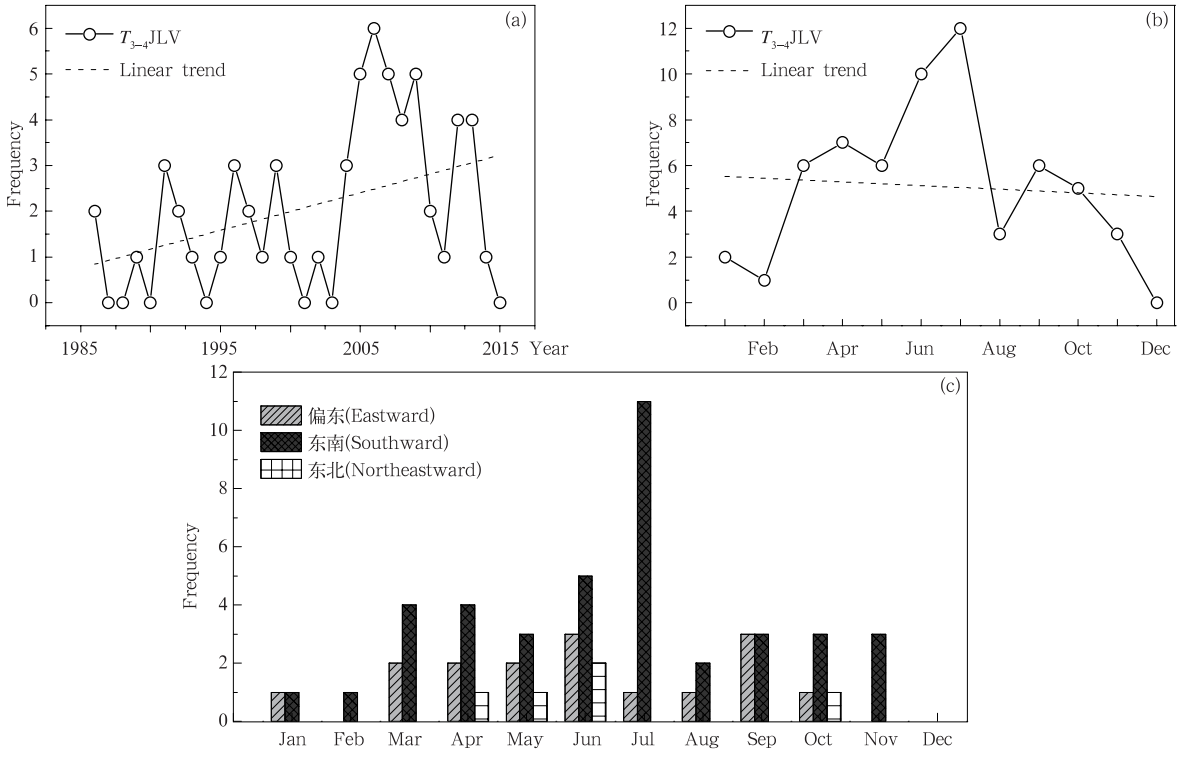


图 16　持续 3—4 个时次移出九龙涡(T_{3-4}JLV)频数的年际变化(a)、月际变化(b)及不同路径出现频次的月际分布(c)

Fig. 16　Interannual (a) and annual (b) variability of occurring frequency and annual variability of occurrence frequency with different moving paths (c) for Jiulong low vortex with the lifespan of 3 or 4 hours (T_{3-4}JLV) from 1986 to 2015

南大风时,低涡向东北方向移动较快,此类九龙涡生成高频中心位于四川盆地西南缺口处(图 6),由于受青藏高原东南部地形影响,盛行西南风,这可能是此类九龙涡偏东、东北移向的一个原因。

T_{5-6}JLV 九龙涡移向只有偏东和东北路径(图 15),其中偏东路径 22 个,占全部移出 T_{5-6}JLV 的 81.5%,而东北路径 5 个,占全部移出 T_{5-6}JLV 的 18.5%;6 月偏东路径 8 个,为最大值,8 月、11 月最少,各 1 个;5、6、7、10、12 月各有 1 次东北路径。因此,T_{5-6}JLV 以偏东路径为主,这可能也是由于青藏高原东南部地形相关的西南风及其强弱的影响。

由图 16a 可知,T_{3-4}JLV 九龙涡移出源地频数随年份呈增加趋势,2006 年移出最多,共有 6 次移出统计区,这与 T_{3-4}JLV 生成频数最大值对应的 2009 年不一致;30 年有些年份此类九龙涡没有移出过统计区,如 1987、1988、1990、1994 年等。图 16b 表明,T_{3-4}JLV 移出源地频数随月份大致呈先增加后减少的变化趋势,1—7 月为增加,7 月达最大值,7—12 月为减少,12 月达最小值。说明夏季 7 月大气环流场最利于此类九龙涡移出源地,这与 T_{3-4}JLV 生成频数最大值对应的 4 月也不一致。从图 16c 可得到,T_{3-4}JLV 移出源地的移向以偏东和东北路径为主,东南路径只有 5 次,4、5、10 月各 1 次,6 月 2 次;此类九龙涡全年只有 12 月没有低涡移出源地;1—11 月都有 T_{3-4}JLV 以偏东路径移出,2 月和 11 月没有东北路径;值得注意的是,T_{3-4}JLV 九龙涡能够移出源地,部分原因是由于其生成于源地的边缘地带。

另外,统计还发现,九龙涡的移动路径并不是一定朝某一固定方向一直移动,其移动过程中往往存在着折返、转向、停滞等特征。虽然以上根据低涡的整体移动趋势来判断其移向,但由于低涡的移动受到诸如环境场引导气流(高空急流、500 hPa 气流)、低涡自身的非对称结构、低涡东部降水潜热的反馈作用等多种因素影响(何光碧,2012),具有复杂性,还需进一步加强诊断分析,结合数值模拟探讨九龙涡的移动发展机制。

6 结论和讨论

利用 1986—2015 年 ERA-interim 再分析资料,统计研究了 1986—2015 年 4 类九龙涡的气候特征,比较了九龙涡定义订正前、后气候特征的差异性,得出以下主要结论:

(1) 九龙涡涡源生成频数存在 3 个集中区域:一是(27°—28.5°N,100°—101.5°E),该区易生成短生命史的 T_{1-2}JLV、T_{3-4}JLV;二是(29°—30.3°N,102°—103.5°E),T_{5-6}JLV 集中生成于此地;三是(28°—29.5° N,101.5°—103.5° E),长生命史 $T_{\geqslant 7}$JLV 集中生成于此地,并且,这 3 个高频中心与 3 个涡度源有较好对应关系。生命史大于 24 h 的九龙涡主要生成于四川盆地西部、西南部与川西高原的交界处,其生命史越长越易生成于四川盆地与川西高原的西南交界处。

(2) 30 年 753 个九龙涡的年际变化呈增加趋势,但近 10 年有减少趋势。其中,九龙涡 1993 年生成频数最多,有 48 个,2003 年最少,仅 12 个,高发年为 2008—2012 年,低发年分别为 1987、1993、1998 和 2000 年。持续时间 1—2 个时次的 T_{1-2}JLV、3—4 个时次的 T_{3-4}JLV 与九龙涡整体年际变化一致,而等于大于 7 个时次的 $T_{\geqslant 7}$JLV 也呈增加的年际变化,但较平缓,5—6 个时次的 T_{5-6}JLV 年际变化趋势不明显。4 类九龙涡 10 年阶段变化仅 T_{1-2}JLV 与总频数阶段变化趋势一致,这是因为九龙地区以地形动力触发的短生命史(小于 24 h)低涡为主。

(3) 九龙涡生成频数月际变化呈先增加后减少的趋势,12—5 月随月份增加,5—12 月随月份减少,5 月最多,9 月最少。九龙涡春季生成最多,夏季、冬季次之,秋季最少,夏季九龙涡生成频数虽不是最高,但生命史最长,且最易移出低涡源地。生命史小于 24 h 的九龙涡(T_{1-2}JLV、T_{3-4}JLV)生成频数随月份呈减少趋势,而生命史大于 24 h 的九龙涡(T_{5-6}JLV、$T_{\geqslant 7}$JLV)生成频数随月份呈增加趋势,6 月 $T_{\geqslant 7}$JLV 最多,12 月最少。

(4) 九龙涡具有明显的日变化特征,主要生成于 12—18 时,其次为白天后半日 06—12 时,18—00 时较少,00—06 时生成最少,这可能与九龙地区地面感热加热的日变化密切相关。生命史小于24 h 的九龙涡夜发概率相对不突出,主要生成在午后到前半夜,后半夜明显减少,生命史大于 24 h 的

T_{5-6}JLV、$T_{\geqslant 7}$JLV 夜发概率均超过 80%,从前半夜一直维持到后半夜,日间明显减少,夜发性十分显著,这种夜发性应该与四川盆地夜雨,尤其是盆地后半夜的夜雨现象有关。

(5) 30 年 753 次九龙涡过程有 176 次移出源地,占全部频数的 23.4%;移出源地的九龙涡频数随月份表现出先增加后减少的变化趋势,1—6 月随月份增加,6—12 月随月份减少,夏季移出的九龙涡频数最多。虽然 6—9 月生成九龙涡频数较少,但移出频数占全部移出频数的 54%,表明 6—9 月大气环流形势更有利于九龙涡的发展移动;30 年 $T_{\geqslant 7}$JLV 有 49 个,全部移出源地,T_{5-6}JLV 有 30 个,其中 27 个移出源地,长生命史的九龙涡少动维持的很少,大多数都移出了源地。

(6) 九龙涡移向主要有偏东、东北和东南路径;九龙涡 $T_{\geqslant 7}$JLV 移向以偏东路径为主,6 月前移向只有偏东和东北路径,8 月后只有偏东和东南路径,6—8 月 3 种路径均有发生,但主要是偏东和东北路径;30 年 $T_{\geqslant 7}$ JLV 东南路径仅有 6 次,占全部 $T_{\geqslant 7}$JLV 移出频数的 12%,由于 $T_{\geqslant 7}$JLV 生成高频中心位于四川盆地西南缺口处,受青藏高原东南部地形影响,盛行西南风,这可能是其少有东南移向的一个原因;T_{5-6}JLV 移向只有偏东和东北路径,其中偏东路径 22 个,占全部移出的 81.5%,T_{5-6}JLV 以偏东路径为主,可能也是由于青藏高原东南部地形相关的西南风及其强弱的影响;T_{3-4}JLV 移出频数 2006 年最多,与发生频数最大年 2009 年不一致,随月份大致呈先增加后减少的变化趋势,1—7 月随月份增加,7 月为最大值,7—12 月随月份减少,T_{3-4}JLV 以偏东和东北路径为主,东南路径只有 5 次。值得注意的是,初生于统计区边缘地区是生命史小于24 h 九龙涡能够移出源地的原因之一。

文中基于天气学和统计方法,深入系统地分析了九龙涡活动的主要气候变化,揭示了一些九龙涡的细致分布和时空特征。但是,这只是初步的分析研究,一些发现的事实和问题值得进一步思考和研究。如数据资料问题,由于川西高原探空台站少,西南涡加密观测试验时间短,选用的再分析资料,在地形复杂区会给天气统计结果带来误差,尤其是中小尺度系统,随着西南涡加密观测试验等的持续,可对统计结果验证完善;又如关于九龙涡的定义,参考四川盆地西南涡的定义,由于川西高原下垫面极其复杂,相对于地形简单的四川盆地,其生成于两地的西南涡定义会有所不同,需进一步考虑;再如文中只是从统计学角度,分析了不同类型九龙涡的气候特征和活动规律,但对于其形成原因、物理机制及其相互关系,还有待于继续研究。

参考文献

陈涛,张芳华,端义宏. 2011. 广西“6.12”特大暴雨中西南涡与中尺度对流系统发展的相互关系研究. 气象学报,69(3):472-485. Chen T, Zhang F H, Duan Y H. 2011. A study of relationship between a southwest vortex and the mesoscale convective systems during the severe "6.12" rainstorm event in Guangxi province. Acta Meteorologica Sinica, 69(3): 472-485 (in Chinese)

陈启智,黄奕武,王其伟等. 2007. 1990—2004 年西南低涡活动的统计研究. 南京大学学报(自然科学),43(6):633-642. Chen Q Z, Huang Y W, Wang Q W, et al. 2007. The statistical study of the Southwest Vortexes during 1990－2004. J Nanjing University (Natural Sci), 43(6): 633-642 (in Chinese)

陈忠明,闵文彬. 2004. 西南低涡活动的统计研究//青藏高原气象学研究文集. 北京:气象出版社,162-170. Chen Z M, Min W B. 2004. The statistical research on the Southwest vortex activities// Proceedings of Study of Tibetan Plateau Meteorology. Beijing: China Meteorological Press, 162-170 (in Chinese)

陈忠明,徐茂良,闵文彬等. 2003. 1998 年夏季西南低涡活动与长江上游暴雨. 高原气象,22(2):162-167. Chen Z M, Xu M L, Min W B, et al. 2003. Relationship between abnormal activities of Southwest vortex and heavy rain the upper reach of Yangtze River during summer of 1998. Plateau Meteor, 22(2): 162-167 (in Chinese)

程麟生,郭英华. 1988. “81 7”四川暴雨期西南涡生成和发展的涡源诊断. 大气科学,12(1):18-26. Chen L S, Guo Y H. 1988. The diagnosis of vorticity sources for the origin and development of the SW vortex during Sichuan heavy raillfall of 11－15 July 1981. Sci Atmos Sinica, 12(1): 18-26 (in Chinese)

高正旭,王晓玲,李维京. 2009. 西南低涡的统计特征及其对湖北降水的影响. 暴雨灾害,28(4):16-26. Gao Z X, Wang X L, Li W J. 2009. The statistic characteristics of Southwest China Vortex and its effect on precipitation of Hubei province. Torrential Rain Disaster, 28(4): 16-26 (in Chinese)

何光碧. 2012. 西南低涡研究综述. 气象,2(2):155-163. He G B. 2012. Review of the Southwest Vortex research. Meteor Mon, 2(2): 155-163 (in Chinese)

黄旭. 1993. 九龙低涡的初生与发展. 高原山地气象研究,(3):11-

19. Huang X. 1993. The development and primary of Jiu Long vortex. Plateau Mountain Meteor Res, (3): 11-19 (in Chinese)

刘建勇，谈哲敏，张熠. 2012. 梅雨期3类不同形成机制的暴雨. 气象学报，70(3)：452-466. Liu J Y, Tan Z M, Zhang Y. 2012. Study of the three types of torrential rains of different formation mechanism during the meiyu period. Acta Meteorologica Sinica, 70(3) 452-466 (in Chinese)

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. 大气科学，39(6)：1191-1203. Li C, Li Y Q, Jiang X W. 2015. Statistical characteristics of the inter-monthly variation of the Sichuan Basin Vortex and the distribution of daily precipitation. Chinese J Atmos Sci, 39(6): 1191-1203 (in Chinese)

李国平，万军，卢敬华. 1991. 暖性西南低涡生成的一种可能机制. 应用气象学报，2(1)：91-99. Li G P, Wan J, Lu J H. 1991. A potential mechanism of the warm vortex genesis in southwest China. Quart J Appl Meteorol, 2(1): 91-99 (in Chinese)

李国平. 2002. 青藏高原动力气象学. 北京：气象出版社，23. Li G P. 2002. The Qinghai-Tibet Plateau Dynamic Meteorology. Beijing: China Meteorology Press, 23 (in Chinese)

李跃清. 2000. 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，24(5)：641-648. Li Y Q. 2000. The PBL wind field at the eastern edge of the Tibetan Plateau and its relations with heavy rain-flood of the Changjiang River in 1998. Chinese J Atmos Sci, 24(5): 641-648 (in Chinese)

李跃清，赵兴炳，邓波. 2010. 2010年夏季西南涡加密观测科学试验. 高原山地气象研究，30(4)：80-84. Li Y Q, Zhao X B, Deng B. 2010. Intensive observation scientific experiment of the Southwest Vortex in the summer of 2010. Plateau Mountain Meteor Res, 30(4): 80-84 (in Chinese)

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. 高原山地气象研究，31(4)：7-11. Li Y Q, Zhao X B, Zhang H L, et al. 2011. Intensive observation scientific experiment of the Southwest Vortex in the summer of 2011. Plateau Mountain Meteor Res, 31(4): 7-11 (in Chinese)

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. 高原山地气象研究，32(4)：1-8. Li Y Q, Zhao X B, Zhang H L. 2012. The intensive observation scientific experiment of southwest China vortex in the summer of 2012. Plateau Mountain Meteor Res, 32(4): 1-8 (in Chinese)

李跃清，徐祥德. 2016. 西南涡研究和观测试验回顾及进展. 气象科技进展，6(3)：134-140. Li Y Q, Xu X D. 2016. A review of the research and observing experiment on Southwest China Vortex. Adv Meteor Sci Technol, 6(3): 134-140 (in Chinese)

刘红武，李国平. 2008. 近三十年西南低涡研究的回顾与展望. 高原山地气象研究，28(2)：68-73. Liu H W, Li G P. 2008. The review and prospect of research on the Southwest Vortex in recent 30 years. Plateau Mountain Meteor Res, 28(2): 68-73 (in Chinese)

卢敬华. 1986. 西南低涡概论. 北京：气象出版社，63-64. Lu J H. 1986. The Introduction of Southwest Vortex. Beijing: China Meteorological Press, 63-64 (in Chinese)

卢敬华，陈刚毅. 1993. 西南低涡的一些基本事实及初步分析. 成都气象学院学报，(4)：7-15. Lu J H, Chen G Y. 1993. Some basic facts about The Southwest China Vortex and their preliminary analysis. J Chengdu Institute Meteor, (4): 7-15 (in Chinese)

马振锋，汪之义. 1993. 西南低涡活动的若干统计分析. 高原山地气象研究，(2)：11-15. Ma Z F, Wang Z Y. 1993. Some statistical analysis of Southwest Vortex activities. Plateau Mountain Meteor Res, (2): 11-15 (in Chinese)

陶诗言等. 1980. 中国之暴雨. 北京：科学出版社，225pp. Tao S Y, et al. 1980. Heavy Rainfalls in China. Beijing: Science Press, 225pp (in Chinese)

王金虎，李栋梁，王颖. 2015. 西南低涡活动特征的再分析. 气象科学，35(2)：133-139. Wang J H, Li D L, Wang Y. 2015. Characteristics reanalysis on Southwest vortex. Meteor Sci Technol, 35(2): 133-139 (in Chinese)

王其伟，谈哲敏. 2006. 地形对西南低涡涡源形成的动力影响作用. 中国科技论文在线. Wang Q W, Tan Z M. 2006. The influence of mountains on the vorticity sources of the southwest vortex (in Chinese)

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//暴雨科学、业务试验和天气动力学理论的研究. 北京：气象出版社，235-267. Wang Z S, Wang Y H, Liang Y G. 1996. The Numeric Experiment Research on a Southwest Vortex Rainstorm. Beijing: China Meteorological Press, 257-267 (in Chinese)

徐裕华. 1991. 西南气候. 北京：气象出版社，56-60. Xu Y H. 1991. Climate of Southwest China. Beijing: China Meteorological Press, 56-60 (in Chinese)

叶瑶，李国平. 2016. 近61年夏半年西南低涡的统计特征与异常发生的流型分析. 高原气象，35(4)：946-954. Ye Y, Li G P. 2016. Statistics characteristics and the abnormal development of flow pattern of the southwest vortex in recent 61 summer half years. Plateau Meteor, 35(4): 946-954 (in Chinese)

张飒，刘志红，张少林等. 1998. 造成山东不同天气的两个西南低涡异同分析. 气象，24(1)：20-24. Zhang S, Liu Z H, Zhang S L, et al. 1998. Comparative analysis of two Southwest Low cortices causing different weather in Shandong. Meteor Mon, 24(1): 20-24 (in Chinese)

赵平，孙淑清. 1991. 一次西南低涡形成过程的数值试验和诊断(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，15(6)：46-52. Zhao P, Sun S Q. 1991. Numerical simulation and diagnosis of the formation of the SW Vortex Part I: An analysis of numerical simulation of the effects

of topography and latent heat on the SW Vortex. Chinese J Atmos Sci, 15(6): 46-52 (in Chinese)

赵思雄，傅慎明. 2007. 2004 年 9 月川渝大暴雨期间西南低涡结构及其环境场的分析. 大气科学，31(6)：1059-1075. Zhao S X, Fu S M. 2007. An analysis on the Southwest Vortex and its environment fields during heavy rainfall in eastern Sichuan province and Chongqing in September 2004. Chinese J Atmos Sci, 31(6): 1059-1075 (in Chinese)

中国气象局成都高原气象研究所. 2013. 2012 西南低涡年鉴. 北京：科学出版社. Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu. 2013. The SCV Yearbook in 2012. Beijing: Science Press (in Chinese)

中国气象局成都高原气象研究所. 2015. 2013 西南低涡年鉴. 北京：科学出版社. Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu. 2015. The SCV Yearbook in 2013. Beijing: Science Press (in Chinese)

中国气象局成都高原气象研究所. 2016. 2014 西南低涡年鉴. 北京：科学出版社. Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu. 2016. The SCV Yearbook in 2014. Beijing: Science Press, Beijing (in Chinese)

谌贵珣，何光碧. 2008. 2000—2007 年西南低涡活动的观测事实分析. 高原山地气象研究，28(4)：59-65. Shen G X, He G B. 2008. The observed facts analysis of Southwest Vortex form 2000 to 2007. Plateau Mountain Meteor Res, 28(4): 59-65 (in Chinese)

濮梅娟，刘富明，沈如金. 1989. 一次夏季西南低涡形成机理的数值试验. 高原气象，8(4)：321-330. Pu M J, Liu F M, Shen R J. 1989. Numerical experiment on the formation mechanism of a southwest vortex in summer. Plateau Meteor, 8(4): 321-330 (in Chinese)

Bao X H, Zhang F Q. 2013. Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau. J Climate, 26(1): 206-214

Chen Y R, Li Y Q, Zhao T L. 2015. Cause analysis on eastward movement of Southwest China Vortex and its induced heavy rainfall in South China. Adv Meteor, 2015: 481735

Feng X Y, Liu C H, Fan G Z, et al. 2016. Climatology and structures of Southwest Vortices in the NCEP climate forecast system reanalysis. J Climate, 29(21): 7675-7701

Fu S M, Zhang J P, Sun J H, et al. 2014. A fourteen-year climatology of the southwest vortex in summer. Atmos Oceanic Sci Lett, 7(6): 510-514

Wang Q W, Tan Z M. 2014. Multi-scale topographic control of southwest vortex formation in Tibetan Plateau region in an idealized simulation. J Geophys Res, 119(20): 11543-11561

Yu S H, Gao W L, Xiao D X, et al. 2016. Observational facts regarding the joint activities of the Southwest vortex and Plateau vortex after its departure from the Tibetan Plateau. Adv Atmos Sci, 33(1): 34-46

Zhong R, Zhong L H, Hua L J, et al. 2014. A climatology of the southwest vortex during 1979－2008. Atmos Oceanic Sci Lett, 7(6): 577-583