

陈炜, 李跃清. 2019. 青藏高原东部重力波过程与西南涡活动的统计关系 [J]. 大气科学, 43(4): 773–782. Chen Wei, Li Yueqing. 2019. Statistical relationship between gravity waves over the eastern Tibetan Plateau and the Southwest vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(4): 773–782. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1810.18130

## 青藏高原东部重力波过程与西南涡活动的统计关系

陈炜<sup>1</sup> 李跃清<sup>2</sup>

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/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072

**摘 要** 本文利用 2012~2015 年西南涡加密观测大气科学实验的剑阁、金川、九龙和名山四站探空资料, 统计分析 6~7 月西南涡活动期间对流层中、高层 (6~12 km) 的重力波过程, 结果表明: 青藏高原东部川西高原南部的九龙站与其余三站不同, 重力波源主要来自对流层上层, 波能传播方向向上, 剑阁、金川和名山三站重力的波源主要来自对流层下层, 波能传播方向向下。重力波过程在不同类型的西南涡活动中有明显差异, 在移出型西南涡活动初期, 重力波水平传播方向主要为东北向, 其上传概率远大于下传概率, 波动的动能和势能较大且变化剧烈; 而对应源地型西南涡, 初期主要呈西北—东南向传播且重力波上传与下传概率相当, 动能和势能较小且变化相对平缓同时本次研究表明, 重力波水平传播方向对西南涡的移动方向也有一定指示作用。按照发生时刻本文将重力波分为日发型重力波和夜发型重力波, 在夜发型西南涡初期, 重力波活动夜发 (北京时间 20:00~08:00) 的概率较大, 这表明重力波的夜发性与西南涡的夜发性可能存在一定关联。

**关键词** 青藏高原东部 重力波 西南涡

**文章编号** 1006-9895(2019)04-0773-10

**中图分类号** P448

**文献标识码** A

**doi:**10.3878/j.issn.1006-9895.1810.18130

## Statistical Relationship between Gravity Waves over the Eastern Tibetan Plateau and the Southwest Vortex

CHEN Wei<sup>1</sup> and LI Yueqing<sup>2</sup>

1 Chengdu University of Information and Technology, Chengdu 610225

2 Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration/Heavy Rain and Drought-Flood Disaster in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

**Abstract** This study statistically analyzes gravity waves activity in the middle and upper troposphere (6–12 km) based on radiosonde data obtained at four stations, i. e., Jiange, Jinchuan, Jiulong, Mingshan, in the Intensive Atmospheric Science Observational Experiment of Southwest China vortex during 2012–2015. The results reveal downward propagation of gravity waves energy at Jiulong station, suggesting that the gravity waves are generated in the upper troposphere at Jiulong station. The opposite is true at other three stations. Corresponding to different types of the

**收稿日期** 2018-02-13; **网络预出版日期** 2019-01-22

**作者简介** 陈炜, 女, 1993 年出生, 硕士研究生, 主要从事高原气象研究。E-mail:15528295771@163.com

**通讯作者** 李跃清, E-mail: yueqingli@163.com

**资助项目** 国家自然科学基金项目 91337215, 公益性行业 (气象) 科研专项经费项目 GYHY201406001, 四川省应用基础研究计划重点项目 2016JY0046

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grant 91337215), Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY201406001), the Key Project of Applied Basic Research Program in Sichuan Province (Grant 2016JY0046)

southwest vortex, gravity waves activities are quite different. At the initial stage of the moving-out type of southwest vortex, gravity waves mainly propagate northeastward with larger probability of upward wave energy transport compared to downward transport. Meanwhile, kinetic and potential energy are large with significant variation. At the initial stage of source southwest vortex, however, gravity waves largely propagate along the northwest-southeast direction, while wave energy can be transported upward or downward with similar probability. Meanwhile, kinetic and potential energy are relatively small with weak variation. It is noted that the horizontal propagation direction of gravity waves are important for the moving direction of southwest vortex. Gravity waves are divided into nocturnal type and daytime type based on their generation time. It is found that more nocturnal-type gravity waves [2000 BT to 0800 BT (Beijing time)] are generated at the initial stage of nocturnal southwest vortex, indicating that there may exist a correlation between the generations of nocturnal gravity waves and southwest vortex.

**Keywords** Eastern Tibetan Plateau, Gravity Waves, Southwest China vortex.

## 1 引言

西南低涡(简称西南涡)是在青藏高原复杂地形与大气环流相互作用下,形成于我国西南地区( $26^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\sim 108^{\circ}\text{E}$ ) 700 hPa 或 850 hPa 等压面上,具有气旋式环流的 $\alpha$ 中尺度闭合低压系统。西南涡是我国最主要的灾害性天气系统之一,在影响我国的降水天气系统中占有相当重要的地位。西南涡全年各月都会出现,以4~9月居多,5~8月移出源地的低涡几率最大。西南涡多出现在三个地区,分别是九龙、巴塘、德欣、康定、昌都一带,四川盆地和小金地区三个源地,由此分别称为九龙涡、盆地涡和小金涡。(卢敬华, 1986; 陈忠明, 1990; 卢敬华, 陈刚毅, 1993; 李跃清和徐祥德, 2016)。

关于西南涡的研究最早起于20世纪40年代左右,经过几十年的努力,针对西南涡的活动特征、形成发展过程和移动机制等已做了大量的研究工作,取得了许多有意义的成果。关于西南涡形成的大尺度环流背景和气候成因,提出了西南涡环境场存在“三支气流”的概念模型(黄福均, 1986)。在地形对低涡影响上,有学者提出西南涡是青藏高原大地形作用的特有产物,由于青藏高原的存在使得低层西风气流无法翻越而分为南北两支绕流,在高原东侧两气流汇合相互作用,并结合高原上东移的低压系统形成了强度不一的西南涡,其源地集中出现在高原东侧四川盆地附近(中国科学院兰州高原大气物理研究所, 1977; 高守亭, 1987; 罗四维, 1992)。李国平(2007)利用热成风适应理论分析了暖性西南涡的形成机制,得到地面感热加热与暖平流的作用对暖性西南涡的生成起着较大作

用。张政泰等(2016)对一次西南涡引起的强降水进行模拟分析,从边界层热力学特征的角度分析了西南涡发生、发展的成因,结果表明,地面加热对于西南涡的发展维持有重要作用。陈忠明(1989)研究也表明:西南涡活动与周围天气及气候系统有密切关系,中纬度长波脊前的西北气流以及副热带高压西北侧的西南气流对西南涡的移动起着重要作用。李超等(2015)首次分析了西南涡系统生成源地的相互关系,发现其九龙、川渝盆地、小金三个主要生成源地具有一定的内在联系,位于上游川西高原复杂地形区的九龙、小金涡源对下游川渝盆地涡源有明显影响。Cheng et al. (2016)指出在青藏高原东部川西高原陡峭地形与大气环流相互作用下,上游风场扰动对于下游的作用是西南涡生成的重要机制。并且,基于西南涡加密观测等资料,提出了不同于传统垂直耦合的深厚型高原涡、西南涡横向耦合的新机制。

由于西南涡源地集中在青藏高原东部地区,即川西高原与四川盆地相接壤的陡峭地形地带,与地形相关的大气动力作用复杂,这也是西南涡成因复杂的原因之一。但是,关于西南涡的形成演变机制目前还不是非常清楚。此前的研究多从天气学、诊断分析与数值模式等对西南涡进行研究,取得了不少成果。然而,由于西南涡源地主要处于青藏高原东部的川西高原与东侧四川盆地,常规观测站点稀疏,尤其是地形变化剧烈,导致台站代表性不强、观测资料匮乏。而且,该区域也是世界上数值模式表现能力最薄弱的地区,因此,对西南涡的深入认识还有待于在加密观测和精细资料基础上的进一步研究。

同时,人们已认识到:重力波是普遍存在于大

气之中的一种大气波动, 在大气及其演变动力过程中扮演着重要的角色。它的产生、传播和破碎引起的动量的重新分配, 对局地乃至全球的大气环流都有重要影响 (Fritts et al., 1984; McLandress and Ward, 1994; Fritts, 2003)。观测实验已经证实, 绝大多数重力波活跃的区域其波源都与山脉或对流活动有关, 大气中气流流经山脉时受其机械阻挡作用会激发产生重力波即山脉重力波 (Hoffmann et al., 2013; Torre et al., 1996)。因此, 西南涡的形成发展离不开青藏高原特殊地形的作用, 而高原山地地形区域也往往是重力波活跃的区域, 那么青藏高原东侧陡峭地形带高原—盆地地区的重力波活动如何? 生成于该区域的西南涡与高原特殊地形引起的重力波有何联系? 对西南涡的形成与发展是否具有一定影响? 针对这些重要的科学问题, 本文基于青藏高原东部川西高原与四川盆地的加密探空资料, 分析研究该区域重力波过程与西南涡活动的关系, 得到一些有意义的新认识。

## 2 资料与方法

本文使用中国气象局成都高原气象研究所实施的西南涡加密观测大气科学试验 (李跃清等, 2010, 2011, 2012; 李跃清和徐祥德, 2016) 在西南涡主要源地 4 个空间加密站点获得的高分辨率探空资料。站点情况为: 剑阁 (32°N, 105.5°E;

535.5 m)、金川 (31.5°N, 102.1°E; 2170.7 m)、九龙 (29°N, 101.5°E; 2993.7 m)、名山 (30.1°N, 103.1°E; 692.5 m), 位于青藏高原东侧高原东部川西高原与四川盆地过渡带, 其中, 金川、九龙位于青藏高原东部川西高原高海拔地区, 而剑阁、名山位于四川盆地西部低海拔地区, 这种对比分布反映了青藏高原东侧地形的陡峭变化及其大气状态的剧烈变化, 具有特殊的意义 (图 1)。并且, 4 站分别对应西南涡的九龙涡、小金涡和盆地涡三个涡源地, 可较全面反映西南涡的活动。观测资料为 2012~2015 年逐年 6 月 21 日至 7 月 31 日共 41 天, 每日 02:00、08:00、14:00 和 20:00 (北京时, 下同) 共 4 个时次, 包括各层气压、温度、水平风等要素。由于温度、气压和风速等每 2 s 有一次测量, 假设气球上升速度稳定为  $5 \text{ m s}^{-1}$ , 则各要素变化大致对应于 10 m 分辨率。但考虑气球上升过程中受气流扰动及其它原因导致的误差, 故应用线性插值法对观测数据进行 50 m 分辨率的插值处理。并选取 6~12 km 高度, 主要针对青藏高原东部地区对流层中高层, 以避免低层地面扰动对重力波估计的可能影响。

根据单色波的极化或称偏振性质, 使用速矢图方法 (Hodograph method) 识别和估计重力波参数。在电磁波理论中, 通常把光的振动方向与光的传播方向相垂直的这一基本特性称为光的偏振 (或

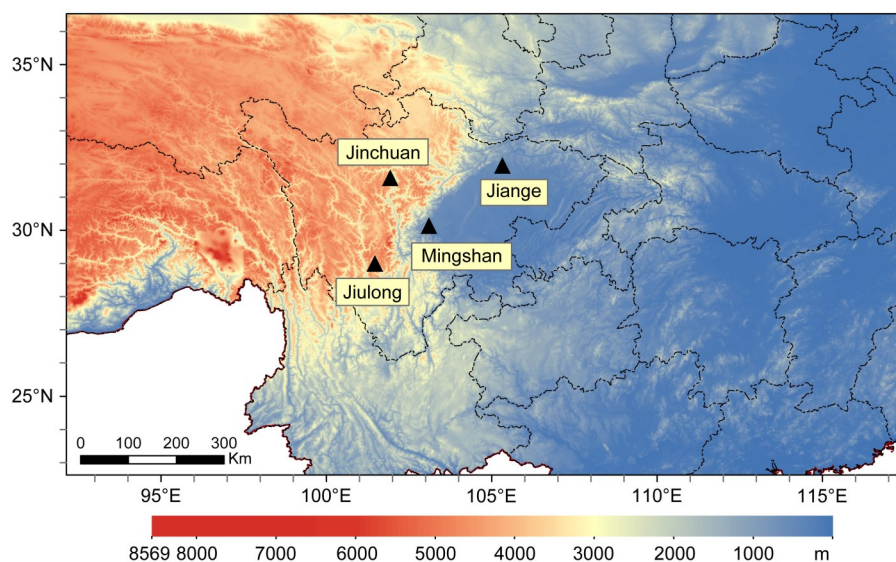


图 1 GPS 加密探空站地理位置与地形高度图 (黑色三角形代表站点位置, 左下角为比例尺标识)

Fig. 1 Locations of GPS radiosonde launch sites and topographic heights (black triangles represent locations of stations Jiange, Jinchuan, Jiulong, and Mingshan, the map scale is given in the lower left corner)



极化)。其中,椭圆极化(Elliptic polarization),即光在沿着传播方向传播的同时还围绕传播方向均匀转动,并且振动的幅度不断地变化,那么振动端点的轨迹在垂直于传播方向平面上的投影是一个椭圆,这种光称为椭圆偏振光。而三维惯性重力波是一种标准的椭圆偏振波,椭圆极化是惯性重力波的一个重要性质,即沿垂直方向由惯性重力波产生的水平扰动风矢端轨迹是一个椭圆。因此,可根据重力波的椭圆极化性质,基于纬向风扰动与经向风扰动风速矢图,从曲线随高度旋转的拟椭圆情况来识别重力波并提取重力波参数。惯性重力波的其他特征参数诸如水平波长、相速度等可根据单色重力波的线性理论计算得到(Fritts and Chou, 1987; Cho, 1995; Scavuzzo et al., 1998; Plougonven et al., 2003)。垂直波长可通过功率谱分析确定(卞建春等, 2004; 覃卫坚等, 2007; 邓少格等, 2012)。

本文还选用了西南涡年鉴数据资料(中国气象局成都高原气象研究所和中国气象学会高原气象学委员会, 2013, 2015, 2016, 2017),其时段与上述探空观测资料时间相对应。根据年鉴的西南涡定义及其生成、移出等特征参数,本文将生成时刻为08:00的西南涡称为夜发型西南涡,为20:00的西南涡称为日发型西南涡,年鉴统计的移出源地的西南涡称为移出型西南涡,源地生消的西南涡称为源地型西南涡。在统计西南涡发生初期的重力波活动

时,选取距离西南涡生成地最近的GPS探空站资料分析重力波活动。为确保资料的可靠性,距离超过2个经纬度以上的不计入统计,考虑西南涡天气系统的移动性,分析的探空资料只选取西南涡发生时刻前后的2个时次,如遇资料无效的情况,可将前后2个时次延长到前后4个时次。

### 3 重力波过程与西南涡活动

#### 3.1 重力波传播方向与移出型和源地型西南涡

本节分别统计了移出型西南涡和源地型西南涡活动初期重力波的传播方向特征,以及西南涡不同移出源地路径与重力波水平传播方向的关系。这里,将西南涡移出路径方向分为8个方位,对应的西南涡活动初期重力波水平传播方向为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ ,其正方向为 $x$ 轴正方向,即 $0^{\circ}$ 对应正东方向E,顺时针方向依次对应8个方位,若传播方向介于两个方位之间时取最接近方位。图2为移出型和源地型西南涡初期重力波的水平传播方向频次,由此可见,重力波的水平传播方向几乎各个方向都有,但移出型以西南方向最少,源地型以北和东北向最少。且移出型与源地型西南涡的重力波水平传播方向存在明显的差异性:移出型其最大频次集中在北和东北方向,而源地型则主要集中于西北和东南方向。而且,经过统计进一步发现,当重力波更多向北和东北传播时,西南涡移出的可能性更大。而当

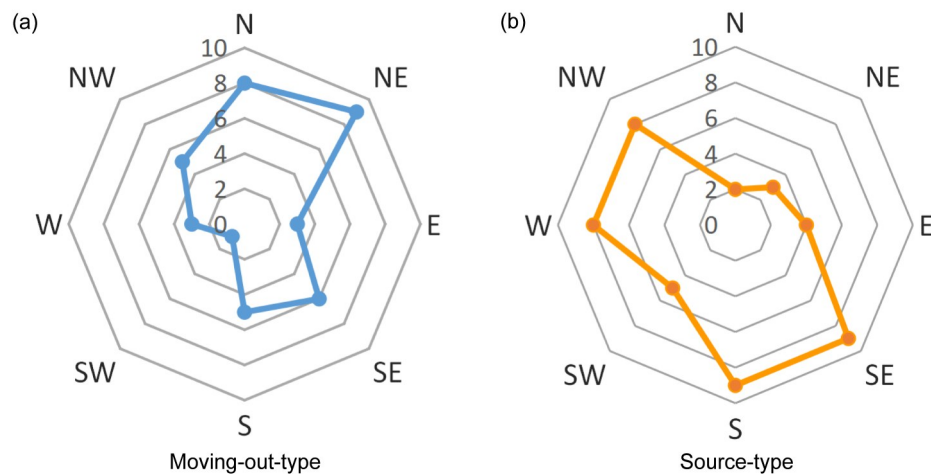


图2 (a) 移出型和 (b) 源地型西南涡初期重力波的水平传播方向频次。八个方位分别为N(北)、NE: 东北, E: 东, SE: 东南, S: 南, SW: 西南, W: 西, NW: 西北

Fig. 2 Frequencies of the horizontal propagation directions of gravity waves corresponding to initial stage of (a) moving-out-type and (b) source-type stagnant Southwest China vortices. The eight directions respectively denote N (north), NE: northeast, E: east, SE: southeast, S: south, SW: southwest, W: west, NW: northwest

重力波主要向西北和东南传播时, 西南涡更多是非移动的源地型。一般西南涡常见的有偏东路径, 东南路径, 东北路径三条移动路径, 其中以偏东路径为主要移动路径。如果重力波的传导对西南涡路径有引导作用, 那么西南涡天气系统在基本气流中移动时必然受到向南的科氏力作用, 则实际移动路径更加偏东, 也与实际相符合。

### 3.2 重力波传播方向与西南涡移动路径

在加密观测期内有 20 例移出型西南涡, 除去 1 次缺测, 统计了其余 19 例西南涡活动的重力波水平传播方向与西南涡移动路径的关系 (图 3)。由此可知: 有 16 例西南涡活动的重力波水平传播方向与西南涡移动路径方向具有同向性, 其中, 有 10 例西南涡活动的重力波水平传播方向几乎完全包含西南涡移动路径方向, 包括 3 例西南涡移动路径方向与重力波水平传播方向完全相同。可见, 西南涡的移动方向与其重力波水平传播方向存在密切的对应关系。结合上节得出的结论, 当重力波出现北向和东北向传播时, 对应着移出的西南涡, 而本节又进一步分析发现, 重力波的传播方向与移出型西南涡移动方向存在很好的对应性, 出现同向的概率为 84%, 完全包含西南涡移动方向的概率为 52%, 完全符合西南涡移动方向的概率为 16%。可见, 西南涡的移出与重力波的传播两者具有密切的

对应关系, 并且, 西南涡的移动可能受到重力波传导的影响。

### 3.3 日发型和夜发型西南涡初期重力波的日变化

日发型西南涡和夜发型西南涡的重力波分别按一天四个时段 (02:00~08:00、08:00~14:00、14:00~20:00、20:00~02:00) 统计发生的频数。统计标准是, 根据西南涡年鉴 (中国气象局成都高原气象研究所和中国气象学会高原气象学委员会, 2013, 2015, 2016, 2017) 给出的西南涡发生时刻 (08:00 或 20:00) 将西南涡分为日发型与夜发型两类。对 20:00 时发生的西南涡, 即认为是 08:00~20:00 之间发生的西南涡, 称为日发型西南涡; 对 08:00 发生的西南涡, 即认为是 20:00~08:00 之间发生的西南涡, 称为夜发型西南涡。同样标准统计了日发和夜发重力波过程。图 4a 为日发型西南涡初期的重力波日变化, 由此可见, 重力波日发与夜发分别为 27 例与 30 例, 日发概率为 47%, 夜发概率为 53%, 即日发型西南涡期间, 重力波夜间发生的概率与日间相当, 但略大。图 4b 为夜发型西南涡初期的重力波日变化, 结果表明: 日发重力波共有 14 例, 占总数的 30%, 夜发重力波共 33 例, 占总数的 70%, 夜发重力波更活跃。总体上, 在 104 例被识别到的重力波活动中, 共有 31 例发生在日间, 73 例发生在夜间, 重力波夜发频率达到 70%。

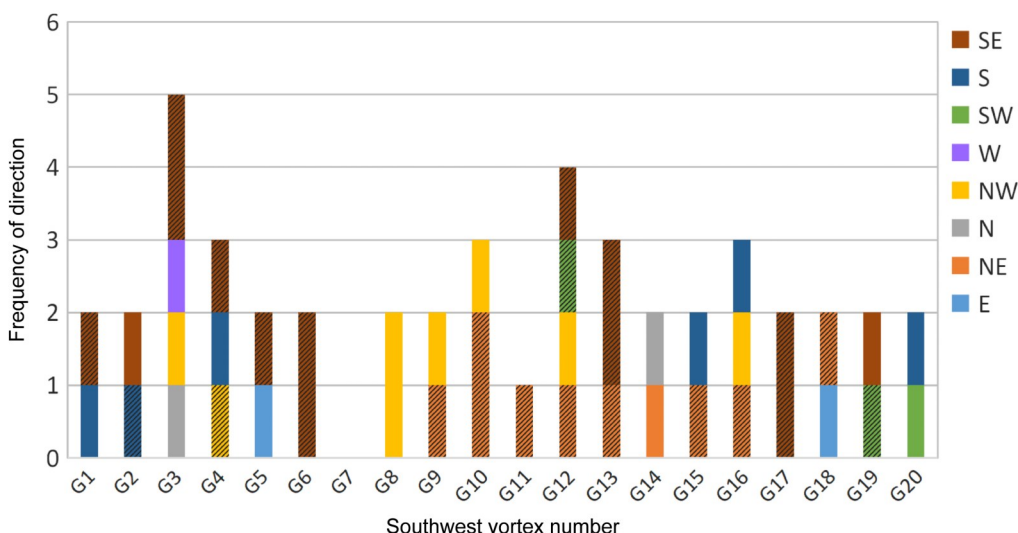


图 3 移出型西南涡活动初期重力波水平传播方向频数图 (颜色分别代表 8 个传播方向, 阴影代表西南涡移动路径方向与重力波传播方向一致)

Fig. 3 Frequencies of horizontal propagation directions of gravity waves in the initial stage of moving-out vortices (different colors indicate different directions, and the columns indicate the direction of gravity waves propagation is the same as that the moving direction of the southwest China vortex)

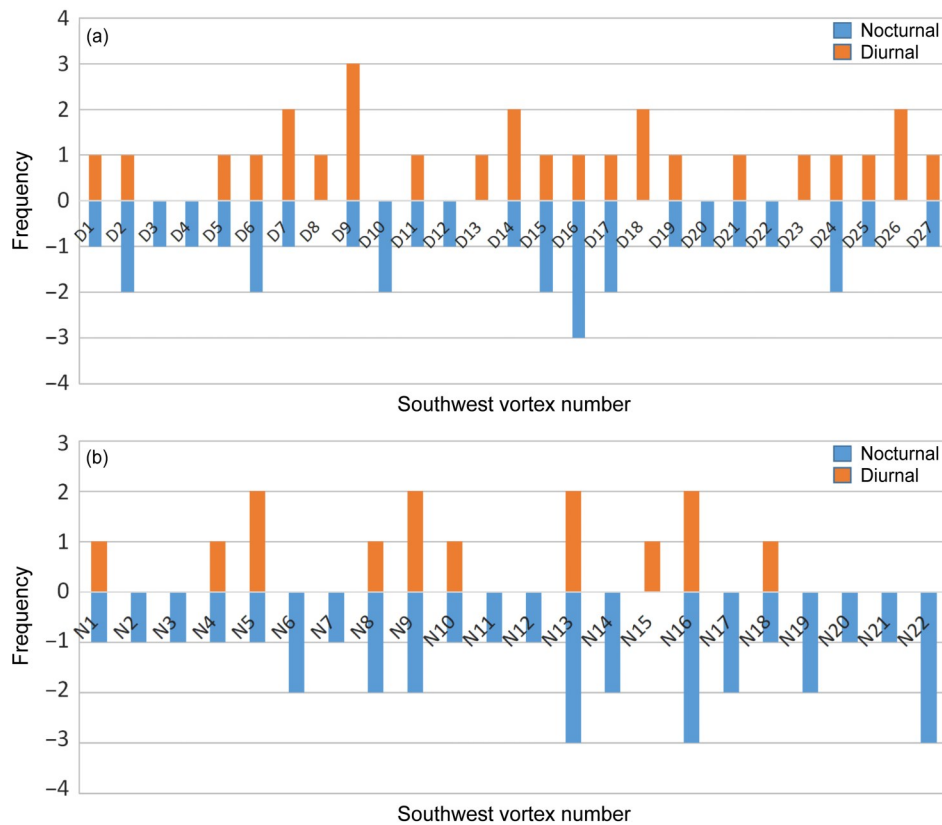


图4 (a) 日发型和 (b) 夜发型西南涡初始时刻的两类重力波频数 (橙色代表日发重力波, 蓝色代表夜发重力波)

Fig. 4 Frequencies of nocturnal happened gravity waves (blue bars) and diurnal happened gravity waves (orange bars) in the initial stages of (a) diurnal and (b) nocturnal Southwest China vortices

可见在西南涡发生初期, 重力波の日变化存在明显的夜发性, 这也与西南涡夜间发生的概率大于白天相对应 (谌贵珣和何光碧, 2008)。而本节结果表明, 在西南涡发生初期, 涡源附近的重力波活动也存在明显的夜发性, 且重力波的夜发性与西南涡的夜发性可能存在一定关联。

### 3.4 重力波垂直传播方向与西南涡活动

根据三维惯性重力波的椭圆极化性质, 可以通过水平风的速度矢图判断重力波的垂直传播方向。在北半球, 水平风矢量随高度顺时针旋转, 重力波向下传播, 能量向上传播; 反之, 风矢量随高度逆时针旋转, 重力波向上传播, 能量向下传播。图 5a 为移出型和源地型西南涡初期, 重力波能量垂直传播频率。可以看到, 源地型西南涡初期重力波能量下传概率为 48%, 上传概率为 52%, 向下与向上传播相当。同时, 其重力波的波源在对流层上层和下层的概率也相当; 移出型西南涡初期重力波能量传播方向则存在明显差异, 能量向上传播的概率高达 64%, 向下传播的概率为 36%, 表明移出型西南涡

初期重力波存在两种特点: 波能上传的概率远远大于下传, 且重力波的波源更多来自对流层上层。移出型西南涡初期重力波波能特征与源地型有明显差别, 其波能上传的概率远远大于下传, 而波动能量上传有助于低层不稳定能量向上输送, 可为激发西南涡发生和加强其发展提供有利条件, 或使得西南涡结构更加深厚、生命史增长, 在合适环流形势下移出源地。

图 5b 为剑阁、金川、九龙和名山四站重力波能量上传统计。如图所示, 剑阁、金川和名山三站的重力波波能上传频率分别为 44%、46% 与 37%, 主要表现为向下传播, 尤其以名山站最为明显, 波源主要来自对流层低层; 不同于前面三站, 九龙站重力波波能向上传播的频率为 53%, 表明其波能传播方向主要是向上传播, 且来自对流层高层的波源更为重要。

需要指出的是: 九龙地区为西南涡最主要的源地, 九龙涡占西南涡总数的一半以上。本节研究发现, 九龙站的波动能量主要向上传播, 也有利于低

层不稳定能量上传激发大气扰动。此外, 九龙地区的重力波波源主要来自对流层上层, 该地区位于青藏高原东侧川西高原一个洼地, 由于高原高大地形的屏障作用, 西风气流分为南北两支从高原两侧绕流, 南支气流在青藏高原东侧绕流时, 由于受科氏力作用产生向南的分量, 当南支气流风速随高度增大, 其方向也逐渐由西南向转为西风, 在高原东侧地区将产生垂直风切变, 而垂直风切变也是重要的重力波激发源之一。当南支气流风速随高度增大, 垂直风切变呈顺时针方向旋转, 而九龙站重力波能量也以向上传播为主, 对应着重力波随高度呈顺时针旋转, 两者相一致。且九龙地区位于青藏高原东侧川西高原的低谷, 地形落差造成的空气机械振荡作用也极易产生重力波。

### 3.5 重力波波动能量与西南涡活动

由分析移出型与源地型西南涡初期重力波的动

能和势能特征 (图6), 针对20例移出型西南涡和29例源地型西南涡, 除去无效统计, 可以看到: 移出型西南涡的动能和势能一般强于、大于源地型西南涡。且移出型变化更剧烈、更频繁, 源地型变化更平缓、更稳定。移出型动能距平均值为 $0.047 \text{ K kg}^{-1}$ , 势能距平均值为 $0.46 \text{ K kg}^{-1}$ ; 源地型动能距平均值为 $-0.44 \text{ K kg}^{-1}$ , 势能距平均值为 $-0.33 \text{ K kg}^{-1}$ 。表明, 移出型西南涡发生初期重力波能表现出明显正距平特点, 能量变幅增大, 波动活跃, 而源地型相反。

结合上节分析, 移出型西南涡初期重力波波能以上传为主, 而当伴随着更大动能的同时, 波动向上输送的能力将增强, 则低层不稳定能量大量向对流层中高层输送, 加强初期扰动有助于西南涡发生发展。而较强的波动势能则对应着波动以及周围环境蕴含更强的能量, 当重力波在具有大量不稳定能

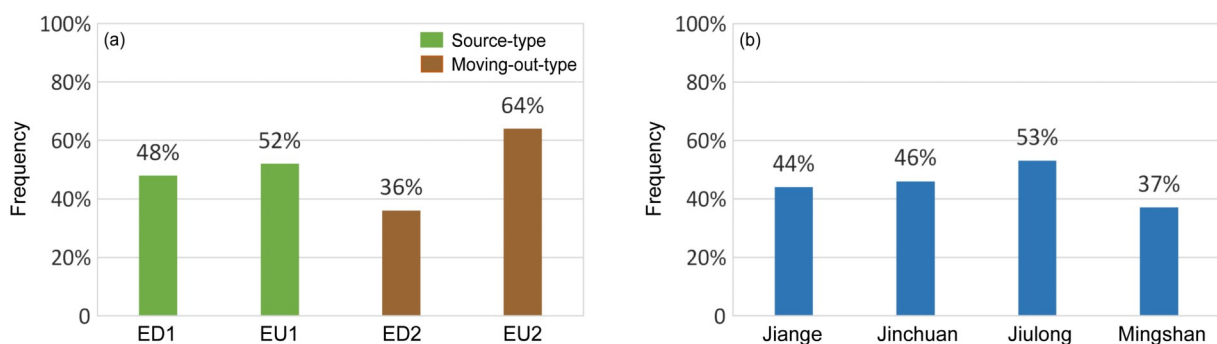


图5 (a) 源地型和移出型西南涡初期重力波能量向上 (EU1、EU2)、向下 (ED1、ED2) 以及 (b) 四站重力波能量向上传播频率

Fig. 5 (a) Frequencies of vertical gravity wave energy propagation directions in the initial stages of source-type and moving-out-type the southwest China vortex (EU1 and EU2 represent frequencies of energy upward transport, ED1 and ED2 denote energy downward transport); (b) frequencies of wave energy upward transport at four stations

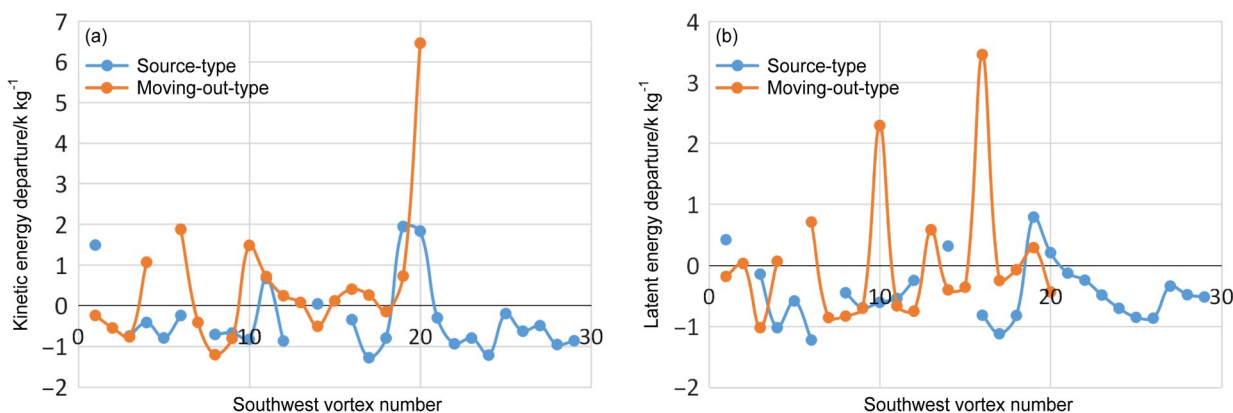


图6 源地型 (蓝色) 和移出型 (橙色) 西南涡初期的重力波 (a) 波动动能 (距平) 和 (b) 波动势能 (距平) 的能量对比

Fig. 6 (a) Kinetic and (b) potential energy departure of gravity waves in the initial stages of source-type (blue lines) and moving-out-type (orange lines) Southwest China vortices



量的大气环境中传播时,重力波的垂直向上传播将产生潜在不稳定能量释放的抬升触发作用,是其中一种重要的天气扰动触发方式。

## 4 结论与讨论

本文利用 2012~2015 年西南涡加密观测大气科学试验剑阁、金川、九龙和名山 4 站的无线电探空资料,分析了 6~7 月西南涡活动期间对流层中高层(6~12 km)的重力波过程和西南涡活动特征,以及两者的关系,得到如下主要结论:

(1) 移出型与源地型西南涡活动初期,重力波的水平传播方向存在明显差异,移出型主要向北和东北方向传播,而源地型主要集中在西北和东南方向。当重力波更多向北和东北传播时,西南涡移出的可能性更大。而当重力波向西北和东南传播时,西南涡更多为源地型。

(2) 移出型西南涡移动方向与重力波水平传播方向存在很好的对应性,方向同向概率为 84%,完全包含西南涡传播方向的概率为 52%,而方向完全对应的概率为 16%。重力波的水平传播方向对于西南涡移出源地和移动路径有一定指示意义。

(3) 西南涡发生初期,在 104 例重力波活动中共有 31 例发生在日间,73 例发生在夜间,重力波夜发频率达到 70%,具有明显的夜发性特征。西南涡夜间发生的概率也大于白天,且低涡源地附近重力波活动也存在明显的夜发性,两者具有密切的关系。

(4) 源地型西南涡初期,重力波能量下传概率为 48%,上传概率为 52%,表明其重力波波源在对流层上层和下层的概率相当;而移出型的重力波能量上传概率高达 64%,下传概率为 36%,表明移出型西南涡初期,重力波波源更多来自对流层上层,波能上传将有利于低层不稳定向上传播,为维持系统发展或直接形成初始扰动。剑阁、金川和名山波能主要表现为向下传播,波源主要来自对流层低层;九龙站异于其他三站,重力波波能主要表现为向上传播,表明来自对流层高层的波源更为重要。

(5) 移出型西南涡发生初期,重力波动能与势能表现出明显的正距平、剧烈变化特点,而源地型则为负距平、平缓变化。重力波波能和势能呈现正距平,对应着更强的重力波波动能量和更强的大气不稳定能量,移动型比源地型具有更大、更活跃的

能量波动变化特征。

本文分析揭示了青藏高原东侧重力波过程与西南涡活动及其两者的关联,结果显示重力波的水平传播方向与西南涡的移出及移动路径有一定的相关性,重力波也存在与西南涡相似的夜发性特征等新事实。但是,这只是初步的认识,还不清楚其物理过程与具体机制。尤其是移出型西南涡及九龙站其重力波能量更多为上传,波源更多来自对流层上层,但重力波能量的上传对西南涡发生发展的作用如何?青藏高原东侧重力波活动明显的地域差异,4 站中的九龙站不同于其他 3 站,重力波能主要向上传播,波源也更多位于对流层中上层,此特点与西南涡最主要的九龙涡高频生成源地的内在关系等,都是非常有意义的科学问题。另外,川西高原地区西南涡源地地形复杂,观测站点有限,受时空分辨率影响,仅夏季 6~7 月的资料难以分析重力波过程的季节变化,需要今后更深入的分析研究。

## 参考文献 (References)

- 卞建春, 陈洪滨, 吕达仁. 2004. 用垂直高分辨率探空资料分析北京上空下平流层重力波的统计特性 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 34(8): 748-756. Bian Jianchun, Chen Hongbin, Lü Daren. 2005. Statistics of gravity waves in the lower stratosphere over Beijing based on high vertical resolution radiosonde [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 48(9): 1548-1558. doi:10.1360/03yd0512
- 陈忠明. 1989. 环境场作用与西南低涡移动的初步分析 [J]. 高原气象, 8(4): 301-312. Chen Zhongming. 1989. The preliminary study of effect of environment flow fields on movement of southwest vortex [J]. Plateau Meteor (in Chinese), 8(4): 301-312.
- 陈忠明. 1990. 西南低涡发生发展的一种动力机制 [J]. 四川气象, (4): 1-9. Chen Zhongming. 1990. A dynamic mechanism for the formation and development of the southwest vortex [J]. Journal of Sichuan Meteorology (in Chinese), (4): 1-9.
- Cheng X L, Li Y Q, Xu L. 2016. An analysis of an extreme rainstorm caused by the interaction of the Tibetan Plateau vortex and the Southwest China vortex from an intensive observation [J]. Meteor. Atmos. Phys., 128(3): 373-399. doi:10.1007/s00703-015-0420-2
- Cho J Y N. 1995. Inertio-gravity wave parameter estimation from cross-spectral analysis [J]. J. Geophys. Res., 100(D9): 18727-18737, doi: 10.1029/95JD01752.
- De la Torre A, Téitelbaum H, Vial F. 1996. Stratospheric and tropospheric wave measurements near the Andes mountains [J]. J. Atmos. Terr. Phys., 58(5): 521-530. doi: 10.1016 / 0021-9169(95) 00086-0
- 邓少格, 杨闻, 钟中, 等. 2012. 一种利用温度廓线与风廓线提取大气重力波参数的方法简介 [J]. 干旱气象, 30(4): 630-634. Deng Shaoge, Yang Wen, Zhong Zhong, et al. 2012. Brief introduction of a



- method to extract atmospheric gravity wave parameters using temperature and wind profile [J]. *Journal of Arid Meteorology* (in Chinese), 30(4): 630–634.
- Fritts D C. 1984. Gravity wave saturation in the middle atmosphere: A review of theory and observations [J]. *Rev. Geophys.*, 22(3): 275–308. doi:10.1029/RG022i003p00275
- Fritts D C, Chou H G. 1987. An investigation of the vertical wavenumber and frequency spectra of gravity wave motions in the lower stratosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 44(24): 3610–3624. doi: 10.1175/1520-0469(1987)044<3610:AIOTVW>2.0.CO;2
- Fritts D C, Alexander M J. 2003. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere [J]. *Rev. Geophys.*, 41(1):1–68. doi:10.1029/2001RG000106
- 高守亭. 1987. 流场配置及地形对西南低涡形成的动力作用 [J]. *大气科学*, 11(3): 263–271. Gao Shouting. 1987. The dynamic action of the disposition of the fluid fields and the topography on the formation of the south-west vortex [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 11(3): 263–271. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1987.03.05
- Hoffmann L, Xue X, Alexander M J. 2013. A global view of stratospheric gravity wave hotspots located with Atmospheric Infrared Sounder observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 118(2): 416–434. doi:10.1029/2012JD018658
- 黄福均. 1986. 西南低涡的合成分析 [J]. *大气科学*, 10(4): 402–408. Huang Fujun. 1986. A composite analysis of the southwest vortex [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 10(4): 402–408, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1986.04.07.
- 李国平. 2007. 青藏高原动力气象学 [M]. 第2版. 北京: 气象出版社, 23–26. Li Guoping. 2007. *Dynamic Meteorology of the Tibetan Plateau* (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 23–26.
- 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 Southwest China vortex in the summer of 2012 [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 30(4): 80–84. doi: 10.3969/j.issn.1674-2184.2010.04.014
- 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 Southwest China vortex in the summer of 2012 [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 31(4): 7–11. doi: 10.3969/j.issn.1674-2184.2011.04.002
- 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. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2012.04.001
- 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
- 李跃清, 徐祥德. 2016. 西南涡研究和观测试验回顾及进展 [J]. *气象科技进展*, 6(3): 134–140. Li Yueqing, Xu Xiangde. 2016. A review of the research and observing experiment on Southwest China vortex [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 6(3): 134–140. doi: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.018
- 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.
- 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 to 2007 [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 28(4): 59–65. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2008.04.010
- 罗四维. 1992. 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, 1–52. Luo Siwei. 1992. *Study on Some Kinds of Weather Systems over and Around the Qinghai-Xizang Plateau* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–52.
- McLandress C, Ward W E. 1994. Tidal/gravity wave interactions and their influence on the large scale dynamics of the middle atmosphere: Model results [J]. *J. Geophys. Res.*, 99(D4): 8139–8156. doi:10.1029/94JD00486
- Plougonven, R, H. Teitelbaum, V. Zeitlin. 2003. Inertia gravity wave generation by the tropospheric midlatitude jet as given by the Fronts and Atlantic Storm-Track Experiment radio soundings. [J]. *J. Geophys. Res.*, 108(D21), 4686. doi:10.1029/2003JD003535
- 覃卫坚, 寿绍文, 李启泰, 等. 2007. 影响惯性重力波活动规律的动力学因子研究 [J]. *高原气象*, 26(3): 519–524. Qin Weijian, Shou Shaowen, Li Qitai, et al. 2007. Research on the dynamics factors influencing development of inertial gravity waves [J]. *Plateau Meteor* (in Chinese), 26(3): 519–524. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2007.03.012
- Scavuzzo C M, Lamfri M A, Teitelbaum H, et al. 1998. A study of the low frequency inertio- gravity waves observed during the Pyrénées Experiment [J]. *J. Geophys. Res.*, 103(D2): 1747–1758. doi:10.1029/97JD02308
- 张政泰, 林明宇, 亓鹏, 等. 2016. 西南涡发生发展机制中热力强迫作用的数值试验 [J]. *干旱气象*, 34(3): 533–539. Zhang Zhengtai, Lin Mingyu, Qi Peng, et al. 2016. Numerical simulation about thermal forcing effect on southwest vortex's developing mechanism

- [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 34(3): 533–539. doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-03-0533
- 中国科学院兰州高原大气物理研究所. 1977. 青藏高原东侧动力性低涡形成机制的分析 [J]. 气象科技, (S1): 54–65. Lanzhou Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. 1977. Analysis of the formation mechanism of the eastern Tibetan Plateau vortex dynamics [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), (S1): 54–65.
- 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. 2013. 西南低涡年鉴 (2012) [M]. 北京: 科学出版社, 1–352. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu, and Plateau Meteorology Committee of Chinese Meteorological Society. 2013. Southwest China Vortex Yearbook 2012 (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–352.
- 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. 2015. 西南低涡年鉴 (2013) [M]. 北京: 科学出版社, 1–352. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu, and Plateau Meteorology Committee of Chinese Meteorological Society. 2015. Southwest China Vortex Yearbook 2013 (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–352.
- 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. 2016. 西南低涡年鉴 (2014) [M]. 北京: 科学出版社, 1–352. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu, and Plateau Meteorology Committee of Chinese Meteorological Society. 2016. Southwest China Vortex Yearbook 2014 (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–352.
- 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. 2017. 西南低涡年鉴 (2015) [M]. 北京: 科学出版社, 1–352. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu, and Plateau Meteorology Committee of Chinese Meteorological Society. 2017. Southwest China Vortex Yearbook 2015 (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–352.