

Application of Relative Humidity-Based Weighting Approach in Regional Heavy Precipitation Process of Southwest Vortex

Zhi Zhang

Ocean University of China, Shandong Qingdao
Email: 492334268@qq.com

Received: Nov. 10th, 2017; accepted: Nov. 23rd, 2017; published: Nov. 30th, 2017

Abstract

Basing on the dataset of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) interim reanalysis (ERA-Interim), a regional heavy precipitation event that occurred over the Yangtze River region on 18-20 July 2016 is analyzed with a southwest storm moving eastward. The relative humidity-based weighting approach used to extend the Storm relative helicity (SRH) to moist storm relative helicity (mSRH) is analyzed and demonstrates such an improvement. Following the same approach, there are two new diagnostic parameters moisture weighting helicity divergence (mMHD) and moist Okubo-Weiss parameter (mOW). Results show that MSRH can better indicate the range of heavy precipitation, but the maximum intensity center is relative to the north of precipitation center. Then, along with the development of the southwest vortex, the center of precipitation is well indicated by mMHD, and the center of mSRH and mMHD are relatively consistent with the precipitation center. Then, the largest positive center of mOW is a good indicator to indict the center of southwest vortex; there is a strong negative center of mOW in east of southwest vortex indicating its future 6 hour's moving direction.

Keywords

Southwest Vortex, Moisture Effect, Moist Storm Relative Helicity, Moisture-Based Weighting Moist Helicity Divergence, Mosit Okubo-Weiss Parameter

湿度权重方法在西南涡强降水过程的应用研究

张 智

中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛
Email: 492334268@qq.com

收稿日期: 2017年11月10日; 录用日期: 2017年11月23日; 发布日期: 2017年11月30日

摘要

利用欧洲中心ERA-Interim数据分析研究一次西南涡东移导致长江中下游强降水事件, 首先, 利用湿度权重的方法构造出两个新的动力学诊断量: 湿权重风暴相对螺旋度(mSRH)和湿权重螺旋度散度(mMHD)。mSRH可以更好的指示强降水的范围, 但是最大强度中心相对降水中心偏北。然后随着西南涡东移的发展, mMHD很好指示的降水中心位置, mSRH和mMHD的中心和降水中心相对一致。其次, 将反映热带气旋的生成源地的Okubo-Weiss (OW)参数引入西南涡, 描述其位置和移动方向。经过湿度修饰后的mOW参数, mOW最大正值中心很好的指示西南涡的中心位置, 西南涡位置中心前部存在一个mOW强大的负值区域, 对应着西南涡未来6 h时刻的移动位置。

关键词

西南涡, 湿度作用, 湿权重风暴相对螺旋度, 湿权重螺旋度散度, 湿Okubo-Weiss参数

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

西南涡(Southwest China Vortex, SWV)在 700 hPa 天气图上一般表现为气旋性环流的闭合低压, 且空间尺度约为 300~500 km 左右[1]。在夏季西南涡高频率东移发展产生强降水, 是导致我国夏季暴雨的重要中尺度系统, 大多数西南涡生成一段时间后就在源地消失, 而东移的西南涡常会对其所经区域造成暴雨天气, 造成山体滑坡, 洪水自然灾害, 给我国人民的生命财产安全带来重大损失[2] [3]。因此研究西南涡东移过程中的动力和热力因子作用以及降水产生的主要系统具有重要的意义。

很多学者集中研究螺旋度在边界层和锋区动力性质[4], 使用螺旋度理论对暴雨过程的模拟结果进行诊断分析, 证明了垂直螺旋度与暴雨的相互联系[5]。结果表明与强暴雨区和切变线低涡对应的是一对正负对立的螺旋度带, 垂直结构是一对正负相生相伴的螺旋度柱, 此外还得出了强动能及强梯度区和强螺旋度区基本一致的结论[6] [7] [8] [9]。王颖等[10]利用螺旋度诊断分析一次江淮暴雨天气, 并与水汽螺旋度和螺旋度通量散度的分析结果作对比分析, 指出 SRH 很好的指示了降水落区, 但是对于暴雨落区诊断能力较差。Chen 等[11]引入风暴相对螺旋度(SRH: storm-relative helicity)和湿螺旋度散度(MHD: moisture helicity divergence)在对西南涡暴雨过程的进行诊断, 分析了一次西南涡影响华南地区暴雨的过程, 总结了各诊断量对于分析西南涡移动发展和中尺度对流过程的作用和效果。方从羲和李子良[12]通过 WRF 高分辨率模式结果计算出的相对风暴螺旋度(SRH)和湿螺旋度散度(MHD), 850 hPa 上 MHD 对于西南涡造成的强降水的落区和强度具有较高的预报意义的价值, 相对风暴螺旋度(SRH)可以很好的指示西南涡的移动方向和强对流发生区域。然而, 单一的参数无法很好的预测降水的中心位置, 因为强降水是有利的湿度输送和动力条件的共同作用[12] [13]。为了提高特定动力参数的覆盖范围和降水观测位置的相关性, 本文利用湿度权重的方法[14] [15]构造出两个新的动力学诊断量: 湿风暴相对螺旋度(mSRH)和湿权重螺旋度散度(mMHD), 它们有一个强大预测降水位置的能力, 且它们预测降水中心位置的变化能力相对于 SRH 和 MHD 都有显著的提升。Okubo-Weiss(OW)指数可反映热带气旋的生成地点, 其大值区往往与热带气旋中心位置接近, 因此可作为热带气旋生成地点的一个理想的预报工具[16] [17] [18]。经过湿度修饰

后的 mOW 参数, mOW 最大正值中心很好的对应西南涡的中心位置, 西南涡位置中心前部存在一个 mOW 强大的负值区域, 对应着西南涡未来 6 h 时刻的移动位置。

2. 数据和方法

热带测雨任务卫星(TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission)产品主要用于研究 $50^{\circ}N\sim 50^{\circ}S$ 间的降雨情况, 它的数据集根据处理度分为三个级别。本文所用的 TRMM 资料为第三级产品, 本文在 3.1 节分析雨情时采用 3B42 产品是由 TRMM 等资料合成的逐 3 h 合成降雨量数据, 它的分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。ECMWF (The European Center of Medium-range Weather Forecast)的中文全称为欧洲中期数值预报中心。它提供多种数据产品, 本文所用的 ERA-Interim 是一种全球大气再分析资料, 数据由 T255 谱模式获得, 模式的空间分辨率为 80 km, 垂直分层从地表一直到 0.1 hPa。

$$m = \left(\frac{q}{q_s} \right)^k \quad (1)$$

$$\theta^* = \theta \exp \left[\frac{Lq_s}{c_p T} \left(\frac{q}{q_s} \right)^k \right], \quad (2)$$

q 为空气相对湿度, q_s 为饱和空气相对湿度, θ 为位温, k 为经验参数

$$SRH = \int_0^h (V - C) \cdot \omega_h dz, \quad (3)$$

$$mSRH = \int_0^h (V - C) \cdot \omega_h \cdot \left(\frac{q}{q_s} \right)^k dz, \quad (3a)$$

其中 V 是水平风场矢量, $(V - C)$ 即表示相对于风暴系统的环境风矢量, 它与一般风矢量相差一个风暴系统的移速。 ω_h 是水平涡度矢量, 其表达式为 $\omega_h = (\nabla \times V)_h = (\partial w / \partial y - \partial v / \partial z, \partial u / \partial z - \partial w / \partial x)$ 。该变量多用于诊断超级单体雷暴[19] [20], 龙卷[21]等强天气过程, 而在诊断中尺度暴雨和热带气旋[22]中也有一定应用。

为了诊断暴雨落区, 引入了一个关于垂直运动、相对涡度以及水汽通量散度的诊断量湿螺旋度(MHD),

$$MHD = \omega \zeta \nabla \cdot (Vq) \quad (4)$$

$$mMHD = \left(\frac{q}{q_s} \right)^k \omega \zeta \nabla \cdot (Vq) \quad (4a)$$

其中 ω 是 P 坐标系下的垂直运动速度, 也可以用 z 坐标系下的垂直运动速度 w 来代替, 使用时前面添加负号, ζ 是垂直涡度, $\nabla \cdot Vq$ 是水汽通量散度。

本文利用 Okubo-Weiss(以下简称 OW)参数来定量表达气流旋转和变形的相对大小。该参数的计算公式如下:

$$OW = \zeta^2 - (E^2 + F^2) \quad (5a)$$

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (5b)$$

$$E = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (5c)$$

$$F = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (5d)$$

$$mOW = \left(\frac{q}{q_s} \right)^k * [\zeta^2 - (E^2 + F^2)] \quad (6)$$

其中 ζ 为相对涡度矢量的垂直分量, E 为伸缩变形, F 为切变变形。 OW 参数[23]来定量的表达低涡、切变气流中旋转和变形的相对大小, 确定低涡切变线的潜在生成区域和发展状况。当 OW 为负值时, 表示气流由变形主导, 有利于切变线的生成和维持。当 OW 为正值时, 表示气流以旋转为主, 有利于切变线上的气旋性涡度的发生、发展, 正 OW 值越大, 表示气流的旋转性越强。

3. 西南涡过程诊断分析

3.1. 暴雨的环流背景和过程分析

2017年06月09日00时, 西南涡在四川盆地北部发展成熟, 此次降水过程500 hPa环流形势为: 在中高纬度存在‘两槽一脊’型环流: 在乌拉尔山以南至巴尔喀什湖地区出现一个长波槽, 贝加尔湖地区为一个典型的高压脊控制(图1(a))。乌拉尔山以南地区的长波槽不断分裂出短波槽引导冷空气南下, 南侵入四川盆地, 有利于西风槽和西南涡的发展, 易产生暴雨天气。除此之外, 在帕劳东部海面形成一个低压系统移入菲律宾中部群岛并开始发展, 在随着中高层的天气系统强度增加, 暖湿东南气流和干冷的北方气流显著加强, 且在四川省东部辐合, 随着东南和北方气流的辐合, 四川东部出现风切变, 能够使降水显著增加。6月10日0000 UTC(图1(b)), 在中高纬度, 巴尔喀什湖东部槽加深和脊增强, 且鄂霍次克的低压系统稳定静止。这种环流有利于干冷的西南气流从贝加尔湖西部输送到中国北部。以上的天气系统持续加强, 导致降水增加。中高纬度的天气系统东移。同时, 西太副高北伸, 形成典型的低涡切变(图1(d)), 这些分布形成了此次低涡切变型暴雨天气。

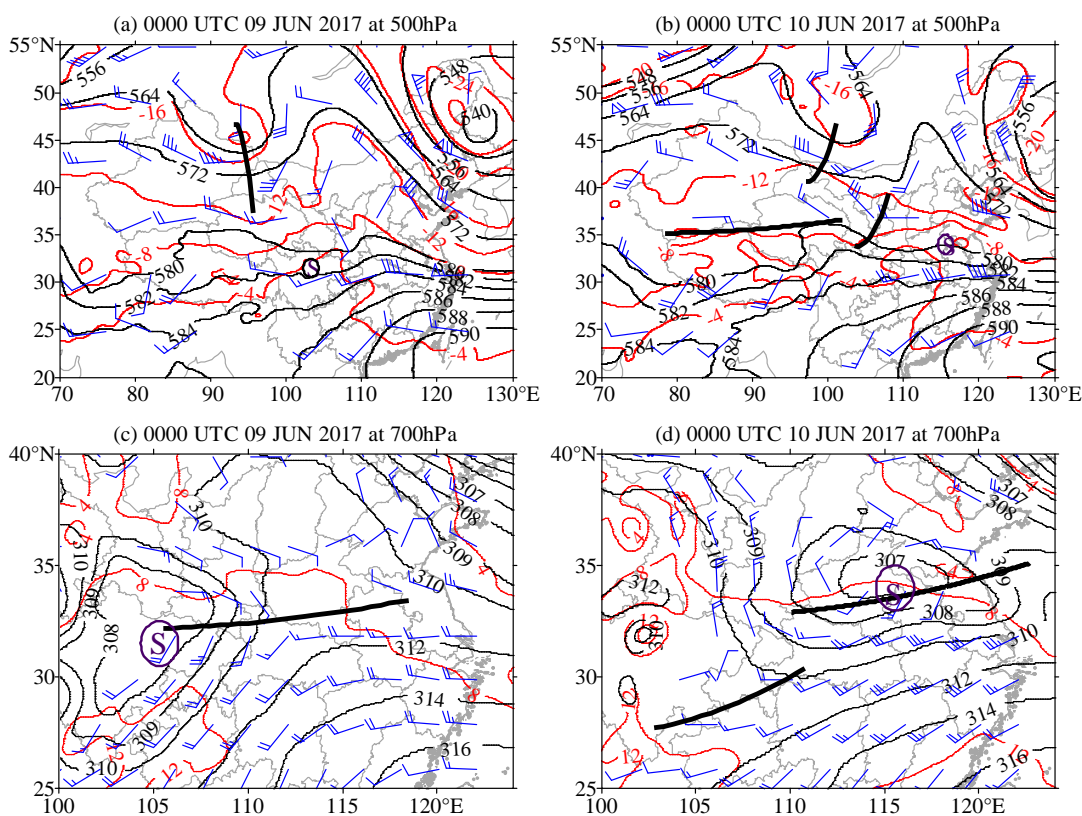


Figure 1. Southwest Vortex weather analysis chart (black line, unit: 10 gpm), temperature (red line, unit: °C) and wind (wind plume, unit: m/s), brown thick lines for slot line or shear line

图 1. 西南涡过程的天气分析图, (黑线, 单位: 10 gpm)、温度场(红线, 单位: °C)和风场(风羽, 单位: m/s), 褐色粗实线为槽线或切变线

3.2. 西南涡东移暴雨雨情分析

受低涡切变系统的影响, 2017年06月08日夜间开始, 四川、重庆等地雨势加强。至2017年06月11日, 此轮降雨继续向东扩展, 影响江淮、江南等地。2017年06月09日此轮降雨最强时段, 重庆、河南等有大暴雨。途径四省, 造成四川东北部、重庆北部和南部、湖北北部、河南东南部局地降水达到大暴雨(100~150毫米)。2017年06月10日西南涡迅速东移, 最强降雨区域转至江苏、安徽一带。贵州北部、重庆东南部的部分地区存在暴雨中心, 其中安徽东部、江苏南部局地有大暴雨, 累积降水达到200mm以上(图2)。产生短时强降水、雷暴大风等强对流天气。需要指出副高的增强及其西侧的切变系统和500 hPa中高层天气系统为降水提供了有利的背景条件。此次暴雨过程与西南涡沿切变线的东移发展和西南风低空急流的发展有明显的关系, 在四川东部, 干冷的北方气流辐合和700 hPa的暖湿的东南气流是降水形成的重要触发机制。

4. 西南涡东移发展的诊断分析

4.1. 动力学诊断量诊断分析

4.1.1. 湿风暴相对螺旋度(mSRH)和湿权重螺旋度散度(mMHD)诊断分析

根据前面研究, 2017年6月09日00时至06月11日00时为西南涡东移并剧烈发展阶段。因而有必要对引起西南涡东移的动力热力条件进行研究。根据图3中可看出: 在西南涡位于重庆大巴山区时, 即将开始东移影响长江中下游地区。(1) 西南涡中心相对涡度一般较强, 则SRH的大值区和最大值中心均位于西南涡东南一侧, 在这一侧700 hPa上存在西南风低空急流, 风垂直切变可提供充足的环境涡度。(2) 09日00时(图3(a)), 西南涡在四川盆地北部与重庆陕西交界处发展成熟, 此时西南涡东南侧有较大的($SRH \geq 200 \text{ m}^2/\text{s}^2$)的区域, 但强度达到强对流的条件($\geq 150 \text{ m}^2/\text{s}^2$)。在湖北南部和安徽与江西交界地区存在两个大值中心分别达到 $180 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 和 $100 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 这两个大值中心对应图3(e)的降水中心。随着西南涡东移发展(图7(b)(c)(d)), SRH大值区范围扩大且中心值达到最大($>280 \text{ m}^2/\text{s}^2$), 而SRH大值中心一直维持在西南涡中心稍微偏南的位置。当 $k=10$ 时, 比较图3(a)、图3(c)和图3(b), 图3(d): 通过加入湿度权重, 风暴相对螺旋度的大值区范围收窄, 图3(c)可以看到有三个明显的中心区域这个图3(e)的三个强降水中心有很好的匹配, 其产生的降水为副高低涡切边降水, 位于西南涡的东南侧, 且此时西南涡由于地形的作用, 在下一阶段发生裂变, 由于复杂的原因, 将在下文详细分析两个天气系统影响的切边线降水过程的原理。图3(c)、图3(d)可以看出风暴螺旋度正值范围明显集中于强涡度中心, mSRH大值中心位于强降

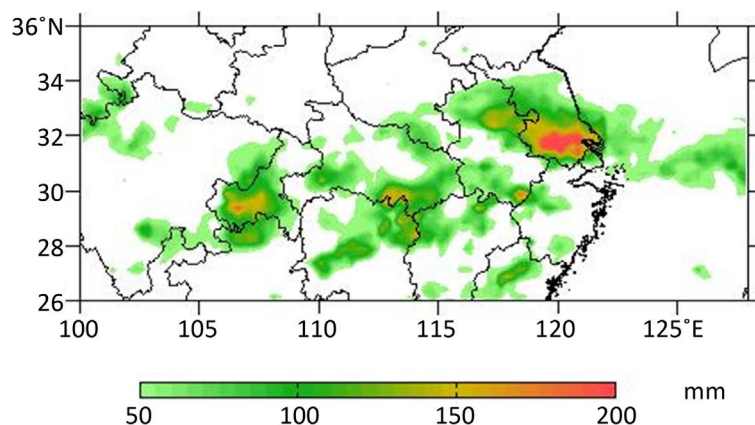


Figure 2. Accumulated precipitation of 0000 UTC on 09 June 2017, 0000 UTC to 11

图2. 2017年6月09日0000 UTC至11日0000 UTC累积降水

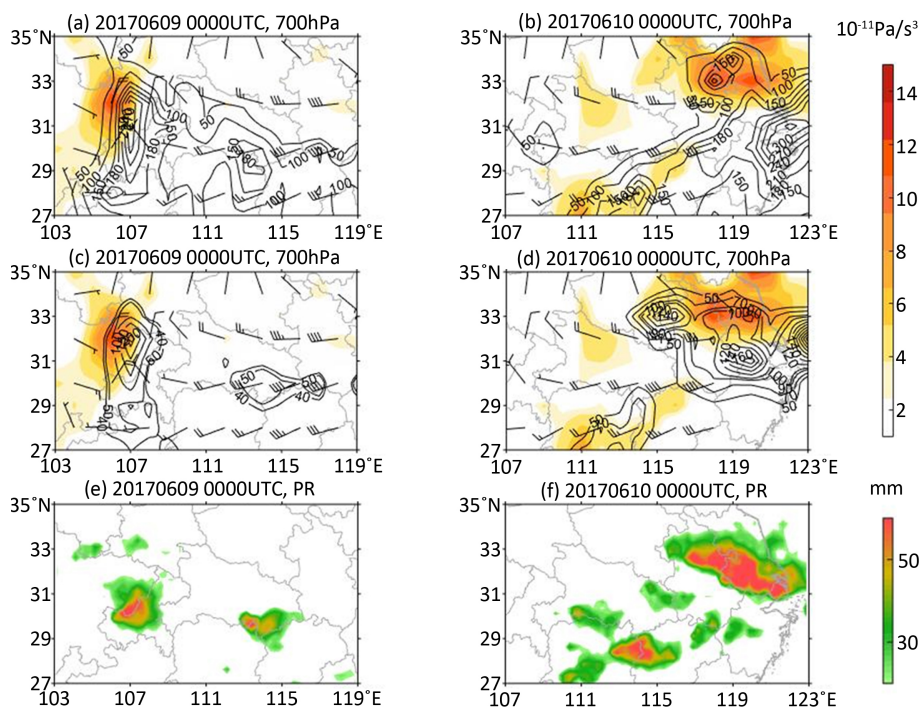


Figure 3. (a), (b) for relative storm helicity (SRH) (contour, unit: m^2/s^2) and 700 hPa relative vorticity (color contour, unit: $1 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) and wind (wind plume, unit: m/s), (c), (d) $k = 10$ the wet weight of storm helicity (mSRH) (contour, unit: m^2/s^2) and 700 hPa relative vorticity (color contour, unit: s^{-1}) and wind (wind plume, unit: m/s) distribution (E), (f) for the precipitation field (color, unit: mm)

图 3. (a)、(b)为相对风暴螺旋度(SRH) (等值线, 单位: m^2/s^2)、700 hPa 相对涡度场(填色等值线, 单位: $1 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$)和风场(风羽, 单位: m/s), (c)、(d)为 $k = 10$ 时的湿权重风暴螺旋度(mSRH) (等值线, 单位: m^2/s^2)、700 hPa 相对涡度场(填色等值线, 单位: s^{-1})和风场(风羽, 单位: m/s)分布图, (e)、(f) 为降水场(涂色, 单位: mm)

水落区主要在四川东北部和重庆交界处, ; 这和图 3(e), 图 3(f)强降水中心吻合。相对于图 3(a), 图 3(b)其强度和预测范围和强降水中心较吻合, 但是对于强水的范围有较大的误差, 故我们可知引入湿度权重可以显著的提高风暴相对螺旋度(SRH)对于降水强度中心的诊断能力。

对于 2017 年 06 月 10 日 00 时至 2017 年 06 月 10 日 06 时的 MHD 分布(图 4(a), 图 4(c)), 在河南东南部, 安徽中北部到江苏南部与浙江交界处存在一个强正值区域。强度中心均达到 $300 \times 10^{-12} \text{Pa}/\text{s}^3$ 。此阶段 MHD 大值区即对应了图 4(e), 图 4(f)中强降水的该中心, 但是在其他无降水区域都存在弱正值区域, 强度中心均达到 $100 \times 10^{-12} \text{Pa}/\text{s}^3$, 预测降水的误差范围较大, MHD 大值区发展的高度越高, 造成的降水量越大。但是其大值区位于比降水落区偏北, 且落区范围误差较大。当 $k = 10$ 时, MHD 分布(图 4(a), 图 4(b)), 850 hPa 上在鄂、豫、皖三省交界处有一正值中心。850 hPa 上很好的对应了降水的落区, 且其最大正值中心很好的和降水中心相吻合, 强度达到 $400 \times 10^{-12} \text{Pa}/\text{s}^3$ 。在 2017 年 06 月 10 日 06 时西南涡东移如海, 在江苏中北部地区存在一个大值中心, 这个雨带的移动很好的匹配。但是降水落区略大, 比 MHD 时降水落区误差显著降低, 说明 m 对于 MHD 的诊断降水的强度和范围能力有显著的提升。

以上分析显示在地形作用弱的情况下, 可以预测整个降水中期的位置。在降水开始前, 尽管它的分布可以覆盖大部分降水区域, 它的分布太大, 导致有误差区域。在图 5(a)后, 误差区域开始减少。特别的是, mMHD 中心很好的降水一直。对于图 5(b), 它的位置很好的降水位置一致, 出了极少的误差区域。然而, mSRH 中心没有很好的对应降水中心, 表明他们强度上的不一致。

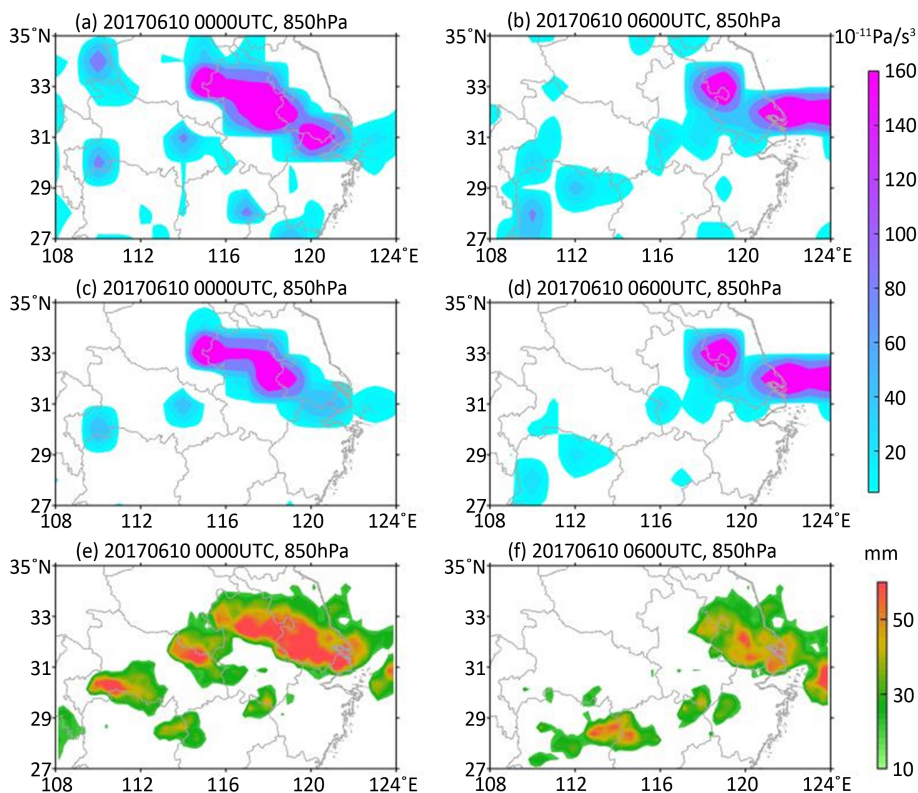


Figure 4. (a), (b) 850 hPa on 2017, 06, 30, 00 UTC wet helicity divergence (MHD). (c) (d) $k = 10$, 850 hPa southwest vortex moving eastward and wet weight of helicity divergence (mMHD) (color, unit $\times 10^{-12} \text{Pa/s}^3$) and cumulative rainfall (isoline map, unit: mm)

图 4. (a), (b) 850 hPa 上 2017 年 06 月 30 日 00 UTC 的湿螺旋度散度(MHD)。(c), (d) 为 $k = 10$ 时, 850 hPa 西南涡东移的湿权重螺旋度散度(mMHD) (涂色, 单位 $\times 10^{-12} \text{Pa/s}^3$)和累积降水(等值线, 单位: mm)分布图

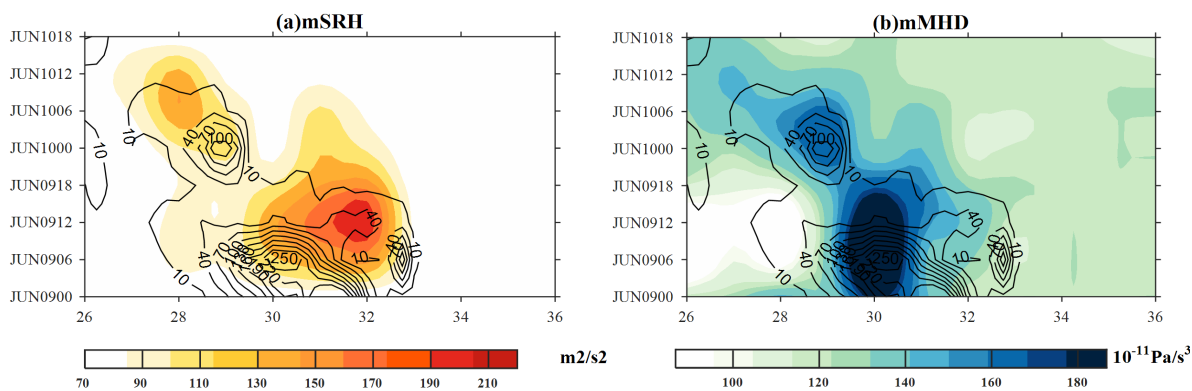


Figure 5. (a) $108^\circ\text{E}\sim 124^\circ\text{E}$ mSRH (zonal mean, colour, unit: m^2/s^2) and cumulative rainfall (contour, unit: mm) the time latitude profile, and (b) mMHD (color, unit: m^2/s^2) and cumulative rainfall (contour, unit: mm) the time latitude profile

图 5. (a) 为 $108^\circ\text{E}\sim 124^\circ\text{E}$ 纬向平均, mSRH (涂色, 单位: m^2/s^2)和累积降水(等值线, 单位: mm)的时间纬度剖面图, (b)为 mMHD (涂色, 单位: m^2/s^2)和累积降水(等值线, 单位: mm)的时间纬度剖面图

4.2. 西南涡东移和切变线的关系

4.2.1. 西南涡、切变线过程的涡度和热带气旋的 Okubo-Weiss(Ow)参数特征

王静等[24]提出西南涡的识别方法(HVW): 西南低涡源地有 700 hPa 高度场有最小闭合等值线, 且环

线中心 2 个经纬度范围内, 平均涡度为正, 在闭合中心 1 个经纬度范围内, 至少三个单站风场为气旋式旋转且中心风速为最小值。由此我们确定低涡中心的经纬度, 低涡中心位势高度为西南低涡强度。图 6 中根据西南涡识别标准确定的西南涡中心位置, 方便下文进行对比研究。

由图 7(a)可以清楚看到, 在西南涡生成阶段, 四川的北部存在一个北方气流进入四川盆地, 并在四川东部与重庆交界处有一个弱的 OW 负值中心, 为 -20×10^{-11} , 这是因为北方气流和来自孟加拉湾的西南气流交汇产生一个弱的切变。随着西南涡的进一步发展成熟东移, 在陕西和湖北交界处存在一个 OW 正值大值区, 代表西南涡东移发展变强, 其中心强度为 20×10^{-11} (图 7(b)), 其涡度中心强度为 $10 \times 10^{-5} s^{-1}$, 说明西南涡移动的气流以旋转为主, 指示西南涡在四川盆地北部发展成熟。西南涡的强度较强, 由于气旋的旋转效应, 在西南涡的前部和后不和来自北方的冷气流形成强的风切变区, 故在四川盆地四周存在负值中心环绕。气旋的风切变形成了一片大的 OW 负值中心区, 负值中心为 -30×10^{-11} , 负值越小代表切边强度越大, 江淮切变线在两个最大负值中心的连线上(图 7(b))。在西南涡移出四川盆地东移至江汉平原的过程中, 对比图 6(a), 图 6(b), 图 6(c)和图 7(a), 图 7(b), 图 7(c)由于巴陵山区的复杂地形的摩擦作用, 其涡度中心强度略微减弱, 西南涡中心位置的 OW 正值区域收缩, 对应了西南涡正涡度大值去的减弱。当西南涡在移至长江中下游地区, 东南暖湿气流为西南涡提供充沛的水汽, 导致西南涡进一步发展。

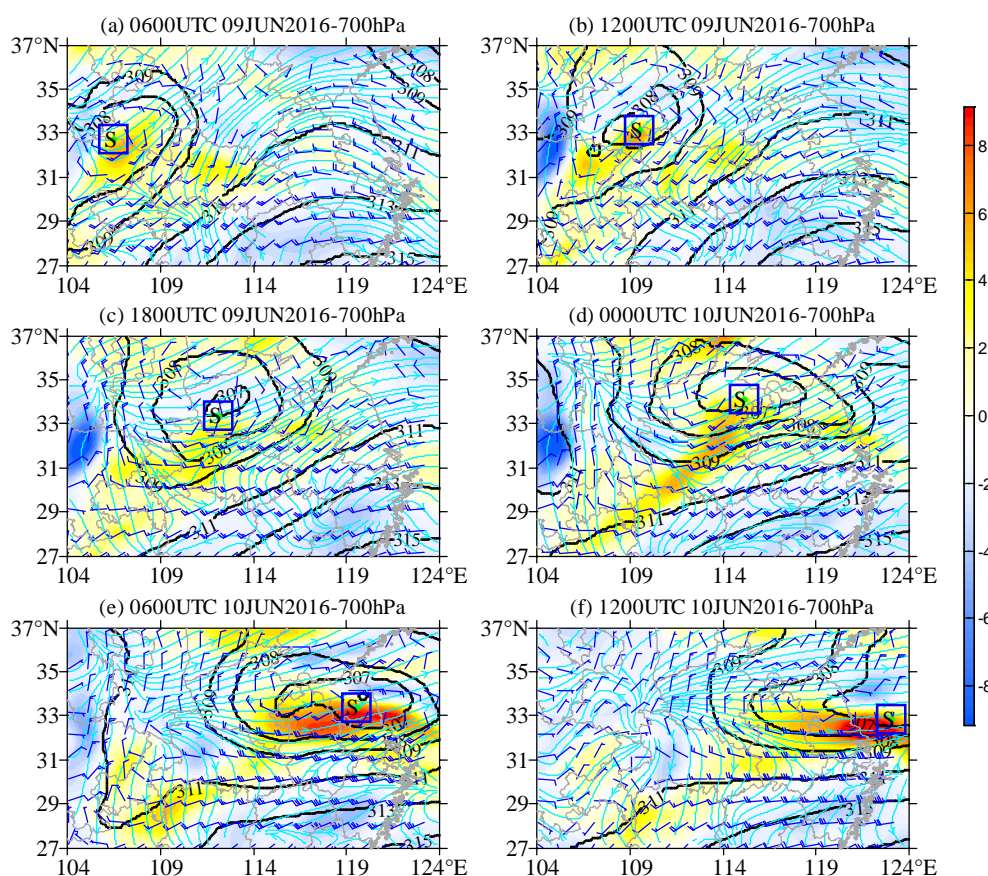


Figure 6. 6 h, the hourly 700 hPa vorticity field (color, unit: $1 \times 10^{-5} s^{-1}$), geopotential height (red contour, unit: 10m, U), V (streamline, streamline field unit: m/s), 700 hPa wind (wind plume, unit: m/s), the square frame is the southwest vortex area S, on behalf of the southwest vortex

图 6. 6 h 逐时 700 hPa 涡度场(涂色, 单位: $1 \times 10^{-5} s^{-1}$), 位势高度场(红色等值线, 单位: 10 m), u, v 流线场(流线, 单位: m/s), 700 hPa 风场(风羽, 单位: m/s), 正方形框为西南涡区域, S 代表西南涡位置

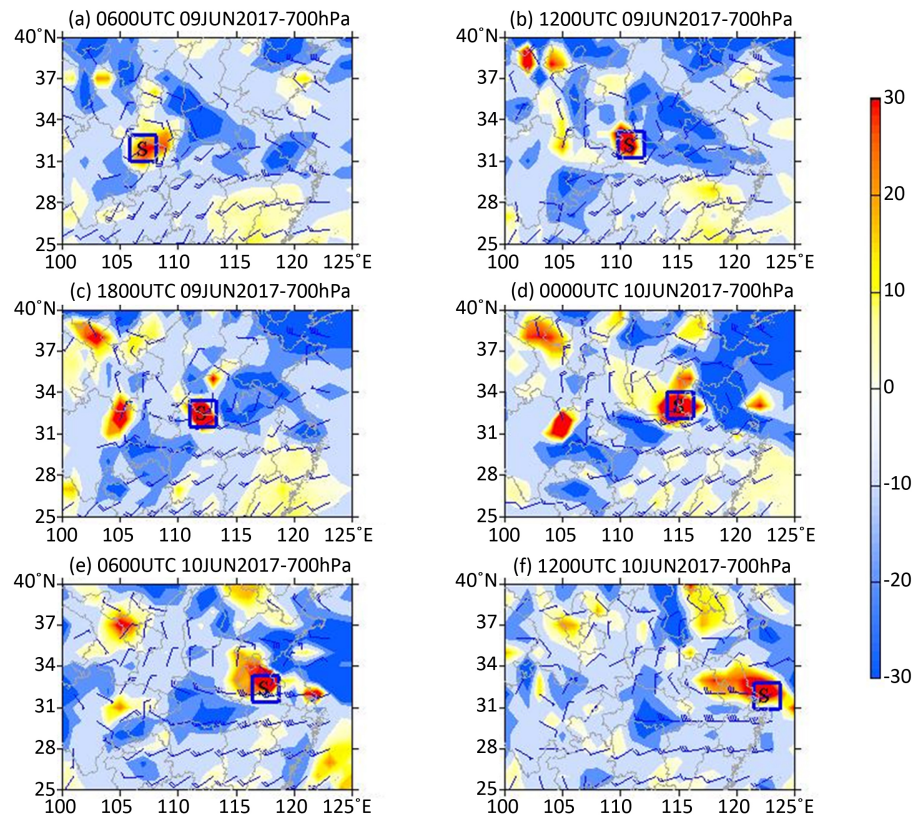


Figure 7. Distribution of ow (unit: m^2/s^2) and wind field (wind plume, unit: m/s) along the low vortex shear zone by 6 h

图 7. 沿低涡切变区域逐 6 h 的 ow (单位: m^2/s^2)、和风场(风羽, 单位: m/s)分布图

通过对比图 7(a), 图 7(b), 图 7(c)和图 8(a)、图 8(b)、图 8(c)看出: 引入湿度作用后, 在西南涡中心位置, mOW 存在一最大正值中心, 强度不断增大, 说明西南涡中心的旋转效应不断的加强, 其前部存在一个最大负值中心, 与切变线降水区域相对应, 西南涡前部的最小 mOW 负值区域。由于西南涡东移产生的强降水位于低涡中心或者低涡前部, 因此引入湿度作用后, 改进的 mOW 参数正值中心可以很好的指示西南涡下一个阶段的移动方向, 负值区可以很好对应切变线降水区域(表 1)。到当西南涡东移入海阶段, 随着西南涡东移存在复杂的地形和环流系统, OW 值有多个负中心, 分别指示着切变性低涡气旋, 中心强度均小于 300, 并且呈东北-西南方向带状分布, 说明在这个区域以变形为主, 是西南涡切变线的生成区域; 通过对比图 7(d)、图 7(e)、图 7(f)和图 8(d)、图 8(e)、图 8(f), 我们可以得出: 在切变线强降水阶段, 切变线上的 OW 值为最大值负中心的连线, 但是也存在强的正值中心, 且正值中心很好的和低涡气旋对应, 说明西南涡随着切变线东移。OW 负值的大小也可以很好地指示西南涡的发展状况。

5. 讨论和总结

(1) 当地形的作用比较强时, 这两个湿度参数不能很准确预测强降水的中心和位置。对于 mMHD, mMHD 大值中心相对与降水中心偏北。随着东移发展, 湿权重螺旋度散度(mMHD)能较好的预测降水的范围位置, 它预测降水位置的能力显著提高。特别的是, mMHD 很好的对应降水峰值的位置, 准确的预测降水中心。随着西南涡沿切变线东移, mMHD 可以很好预测降水的中心, 以及覆盖大部分的强降水的范围, mMHD 相对于 MHD 消除了大部分诊断误差范围, 提高了 mMHD 的预测的准确率。

(2) 西南涡的移向和相对风暴螺旋度(SRH)大值区有很好对应关系, SRH 大值区对西南涡暴雨过程强

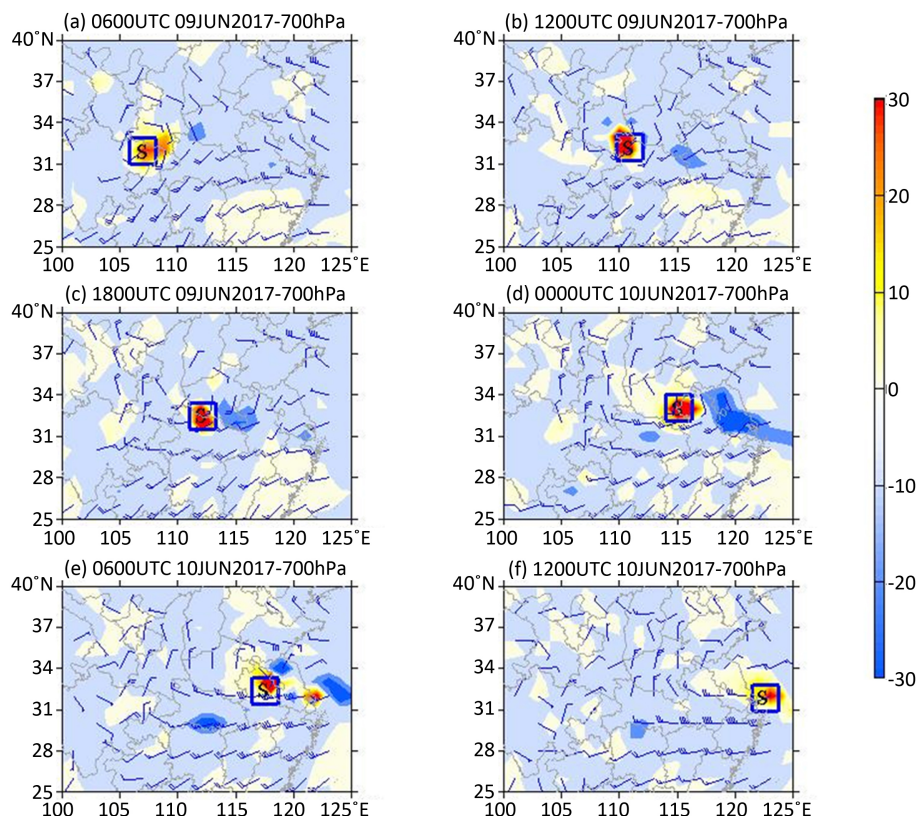


Figure 8. $k = 20$, mOW (unit: m^2/s^2), and wind field (wind plume, unit: m/s) distribution along the low vortex shear zone by 6 h. S stands for Southwest Vortex position

图 8. $k = 20$ 时沿低涡切变区域逐 6 h 的 mOW (单位: m^2/s^2)、和风场(风羽, 单位: m/s) 分布图。S 代表西南涡位置

Table 1. Prediction of southwest vortex center by mOW parameter

表 1. mOW 参数对于西南涡路径中心的预测

时间	西南涡实测中心位置		mOW 中心诊断位置		mOW 未来 6 h 预报位置	
06 月 09 日 06 时	31.9	107.0	31.9	107.2		
06 月 09 日 12 时	32.2	110.8	32	111.2	32.8	112
06 月 09 日 18 时	33.5	112.1	32.5	112.1	32.5	113
06 月 10 日 00 时	33.1	115.1	32.9	114.4	32.5	116
06 月 10 日 06 时	32.3	118.5	32.7	118.3	33	118
06 月 10 日 12 时	31.9	122.1	32.1	122.3	32.5	124

对流的落区有较好的指示作用。SRH 大值区为西南涡发展提供涡旋动力, 有利于西南涡向该区域移动。通过对比 mSRH 我们可知, mSRH 对于强降水中心的诊断的性能大为提高, 大值范围收窄, 相比于 SRH 可以更清晰的看出大值区的走向, 指示西南涡的移动路径。

(3) OW 参数用于定量的表达低涡、切变线中的旋转和变形的大小, OW 正值区代表低涡气旋的旋转效应大小, OW 数值越大, 代表气旋的旋转效应越强, 有利于对流的发展, 反之, OW 负值区很好的指示切变线的生成区域, 不利于对流的发生发展。湿度权重 mOW 参数兼有热力学和动力学特性, 很成功

的指示西南涡在切变线上的移动, 在西南涡中心位置前部的 mOW 最小负值中心引导西南涡的移动, 对未来 6 h 西南涡的移动有很好的指示作用。

综上当地形的作用比较强时, 这两个湿度参数不能很准确预测强降水的中心和位置。这说明二者对复杂地形下的降水诊断能力很差。需要指出地形扮演了大气边界层的角色。青藏高原及其周围地区观测数据的缺乏是一个大的问题, 这可能是另一个原因。如果从这些方面得到改进, 这两个湿度动力学参数诊断复杂地形的能力将得到显著的提高。

参考文献 (References)

- [1] 高守亭. 流场配置及地形对西南低涡形成的动力作用[J]. 大气科学, 1987, 11(3): 263-271.
- [2] 卢敬华. 西南低涡概论[M]. 北京: 气象出版社, 1986: 270 p.
- [3] Kuo, Y.H., Cheng, L.S. and Bao, J.W. (1988) Numerical Simulation of the 1981 Sichuan Flood. Part I: Evolution of a Mesoscale Southwest Vortex. *Monthly Weather Review*, **116**, 2481-2504. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116<2481:NSOTSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<2481:NSOTSF>2.0.CO;2)
- [4] 陈启智, 黄奕武, 王其伟, 谈哲敏. 1990-2004 年西南低涡活动的统计研究[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(6), 633-642.
- [5] 伍荣生. 大气动力学. 第 1 版[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 96-101.
- [6] Tang, Z.M. and Wu, R.S. (1994) Helicity Dynamics of Atmospheric Flow. *Advance in Atmospheric Sciences*, **11**, 175-188.
- [7] 杨越奎, 刘玉玲, 万振栓, 等. 91. 7 梅雨锋暴雨的螺旋度分析[J]. 气象学报, 1994, 52(3): 379-384.
- [8] 吴宝俊, 许晨海, 刘延英. 螺旋度在分析一次三峡大暴雨中的应用[J]. 应用气象报, 1996, 7(1): 108-112.
- [9] 侯瑞钦, 程麟生, 冯伍虎. 98. 7 特大暴雨低涡的螺旋度和动能诊断分析[J]. 高原气象, 2003, 22(2): 202-208.
- [10] 王颖, 寿绍文, 周军. 水汽螺旋度及其在一次江淮暴雨分析中的应用[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(1): 101-106.
- [11] Chen, Y.R., Li, Y.Q. and Zhao, T.L. (2015) Cause Analysis on Eastward Movement of Southwest China Vortex and Its Induced Heavy Rainfall in South China. *Advanced Materials*, **1**, 1-22. <https://doi.org/10.1155/2015/481735>
- [12] 方从羲, 李子良. 一次西南涡致洪暴雨天气过程诊断分析和数值模拟试验[J/OL]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(5): 14-21. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1414.p.20160421.0949.007.html>
- [13] Ran, L.K., Li, N. and Gao, S.T. (2013) PV-Based Diagnostic Quantities of Heavy Precipitation: Solenoidal Vorticity and Potential Solenoidal Vorticity. *Journal of Geophysical Research*, **118**, 5710-5723. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50294>
- [14] Gao, S.T., Wang, X.R. and Zhou, Y.S. (2004) Generation of Generalized Moist Potential Vorticity in a Frictionless and Moist Adiabatic Flow. *Geophysical Research Letters*, **31**, L12113.
- [15] Qian, W.H., Du, J., Shan, X.L. and Jiang, N. (2015) Incorporating the Effects of Moisture into a Dynamical Parameter: Moist Vorticity and Moist Divergence. *Weather and Forecasting*, **30**, 1411-1428. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-14-00154.1>
- [16] Djebou, D.C.S., Singh, V.P. and Frauenfeld, O.W. (2014) Analysis of Watershed Topography Effects on Summer Precipitation Variability in the Southwestern United States. *Journal of Hydrology*, **511**, 838-849. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.045>
- [17] Montgomery, M.T., Davis, C., Dunkerton, T., Wang, Z., Velden, C., Torn, R., Majumdar, S.J., Zhang, F., Smith, R.K., Bosart, L., Bell, M.M., Haase, J.S., Heymsfield, A., Jensen, J., Campos, T. and Boothe, M.A. (2012) The Pre-Depression Investigation of Cloud Systems in the Tropics (PREDICT) Experiment. Scientific Basis, New Analysis Tools and Some First Results, B. *American Meteorological Society*, **93**, 153-172. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00046.1>
- [18] 管靓, 周顺武, 葛旭阳, 王梅红. “育婴袋”假说在西北太平洋台风生成地点的应用研究[J/OL]. 热带气象学报, 2016, 32(4): 494-502. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1326.p.20160921.0926.007.html>
- [19] Davies-Jones, R. (1984) Streamwise Vorticity: The Origin of Updraft Rotation in Supercell Storms. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **41**, 2991-3006. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1984\)041<2991:SVTOOU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1984)041<2991:SVTOOU>2.0.CO;2)
- [20] Thompson, R.L., Mead, C.M. and Roger, E. (2007) Effective Storm-Relative Helicity and Bulk Shear in Supercell Thunderstorm Environments. *Weather and Forecasting*, **22**, 102-115. <https://doi.org/10.1175/WAF969.1>

-
- [21] Markowski, P.M., Straka, J.M., Rasmussen, E.N., *et al.* (1998) Variability of Storm-Relative Helicity during Vortex. *Monthly Weather Review*, **126**, 2959-2971. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<2959:VOSRHD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<2959:VOSRHD>2.0.CO;2)
- [22] 李耀辉, 寿绍文. 旋转风螺旋度及其在暴雨演变过程中的作用[J]. 南京气象学院学报, 1999, 22(1): 95-102.
- [23] Dunkerton, T.J., Montgomery, M.T. and Wang, Z. (2009) Tropical Cyclogenesis in a Tropical Wave Critical Layer: Easterly Waves, *Atmos. Chemical Physics*, **9**, 5587-5646. <https://doi.org/10.5194/acp-9-5587-2009>
- [24] 王静. GRAPES 西南低涡集合预报评估及 ETKF 初值扰动方法改进[D]: [硕士学位论文]. 中国气象科学研究院, 2017.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-5711, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: ccl@hanspub.org