

# 西宁两次强降水的雷达VWP特征

谢启玉<sup>1</sup> 周琴<sup>1, 2</sup> 辛秋玲<sup>1</sup> 张令振<sup>1</sup>

(1 青海省西宁市气象台, 西宁 810016; 2 成都信息工程大学, 成都 610225)

**摘要:** 分析了西宁2次不同性质强降水的雷达径向速度和风廓线产品(VWP)特征, 结果表明: 西宁强降水开始前低层西南(SW)风速增大, 中层风场出现“ND”(静止风), 高层偏东风明显。过程最大降水量出现在低层风向明显转变的时段内。混合性强降水在高层强气流向上传递至低层时强降水开始或增大, 强降水偏向高空平均气流的右侧; 对流性强降水主要是低层强气流向上传递, 偏向高空平均气流右侧的幅度较小; 中层ND楔形块是强降水开始的先兆。

**关键词:** 强降水, 雷达VWP, 垂直风切变, 风暴相对螺旋度, 强降水指数

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.05.005

## Characteristics of VWP on Xining Radar during Heavy Rainfall Events

Xie Qiyu<sup>1</sup>, Zhou Qin<sup>1, 2</sup>, Xin Qiuling<sup>1</sup>, Zhang Lingzhen<sup>1</sup>

(1 Xining Meteorological Service of Qinghai Province, Xining 810016

2 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

**Abstract:** The characteristics about VWP during two different properties of heavy rainfall events on Xining radar are analyzed, the results show that the wind speed of SW at the lower level increases, ND appears at the middle level and the E-flow at the high level is obvious before the beginning of heavy precipitation in Xining. The maximum precipitation in the process occurs during the period when the wind direction at the low level changed significantly. The heavy precipitation begins or increases when high-level strong air flow are transmitted downward to the low level and it is biased to the right of the upper airflow during the mixed heavy rainfall event, while the low-level strong airflow mainly transmitted downward and the bias amplitude to the right is smaller during the convective heavy rainfall event, and the appearing of ND wedge block at the middle level is a harbinger of the heavy precipitation.

**Keywords:** heavy precipitation, VWP on the radar, vertical wind shear ( $|\Delta V|$ ), storm relative helicity (SRH), heavy precipitation index

### 0 引言

强降水引发的暴雨洪涝成为主要的气象灾害之一, 对于强降水的研究也开始较早<sup>[1]</sup>。由于多普勒天气雷达的布网、业务化运行和广泛应用于强对流天气监测及短时临近预报, 以雷达为基础对强降水的研究和应用也越来越深入<sup>[2-4]</sup>。雷达径向速度和风廓线产品(VWP)提供了强降水环境风场综合特征, 根据VWP上风场特征来判断冷暖平流<sup>[5-7]</sup>, 认为冷平流维持时强降水也维持, 根据 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风的层次可断定垂直上升、下沉气流。Shao等<sup>[8]</sup>用雷达反演的三维风场发现强降水发生在偏南气流、辐合上升较强的切变线南缘。研究指出<sup>[9-12]</sup>VWP上的边界层急流、低空入流急流对强降水有重要作用, 认为低空偏南急流对强降水的指示意义较好<sup>[13-15]</sup>, 高空急流对强降水的维持同样

有作用<sup>[16-17]</sup>。夏文梅等、徐芬等、方标<sup>[18-20]</sup>将VWP上风场“ND”区域(静止风)出现的时间及高度与强降水的开始和结束相联系, 发现ND在降水之前出现预示着强降水的开始而在降水末期出现则表示强降水的结束。赵瑞金等<sup>[21]</sup>用雷达VWP计算了风向、风速、辐合、辐散的垂直廓线, 认为强降水风场在垂直方向表现为偏东风、偏南风。此外, 付双喜等<sup>[6]</sup>、朱敏华等<sup>[9]</sup>指出VWP上低空强风切变( $|\Delta V|$ )是对流性强降水发展的标志。王丽荣等、徐芬等<sup>[22-23]</sup>用雷达VWP计算了风暴相对螺旋度(SRH), 指出SRH对强降水等强对流天气的开始及维持具有一定的作用。张京英等<sup>[16]</sup>分别用 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 高空风速、 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 低空风速的某小时最低高度来定义高、低空急流指数, 认为这两种指数与降水强度与之间关系密切。

综上, 雷达VWP的研究主要集中在高、低空急流对强降水的作用, 尤其突出了(超)低空急流对强降水的重要贡献, 此外有些研究分析了VWP垂直方

收稿日期: 2019年11月16日; 修回日期: 2020年9月7日  
第一作者: 谢启玉(1979—), Email: xieqiyu\_aa@sina.com  
资助信息: 青海省西宁市气象局强降水预报创新团队(2019)

向风场（包括ND）及计算的相关量（SRH、风切变等）等的特征，但对于强降水的低、高层风场的相互关联及与高空平均气流关系方面涉及较少，且由于目前西宁雷达产品在强降水应用的研究少，造成强降水短时临近预报水平较低。本文以小时降水量 $\geq 8.0$  mm为标准，选取具有典型代表性的2015年7月1日（下称“1507”过程）混合性强降水和2018年6月30日（下称“1806”过程）对流性强降水，以这两次不同性质强降水天气过程中低、中、高层雷达VWP的风场特征为基础，分析强降水过程中低、高空强气流的相互关联及强降水移向与高空平均气流的关系，探索根据VWP计算的 $|\Delta V|$ 和SRH等相关量的特征，得到表征强降水与VWP及这些相关量关系的强降水指数，为提高强降水短时临近预报能力提供现实依据。

## 1 资料选取与降水实况

### 1.1 资料选取

本文选用西宁地区范围内4个国家级观测站（包括市区和所辖大通、湟源和湟中三县）的降水资料，72个区域站为辅助，使用2015年7月1日16:00—2日08:00和2018年6月30日15:30—20:00每10 min间隔的降水量。

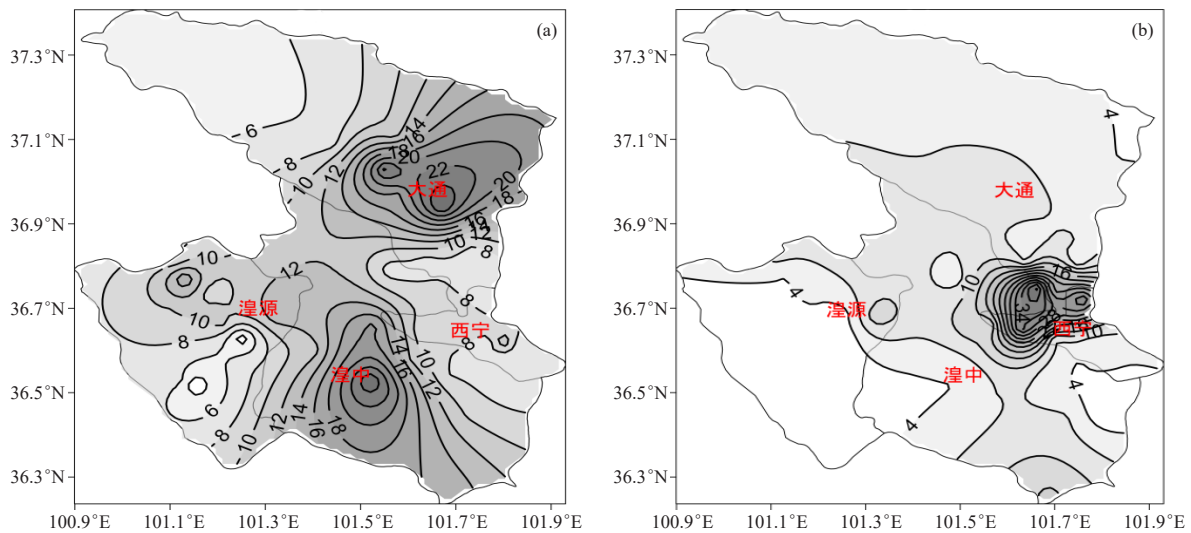


图1 过程累计降水量

(a) “1507” (16:00—02:00), (b) “1806” (15:30—20:00)

Fig. 1 Cumulative precipitation of heavy rainfall events

(a) “1507” process (16:00—02:00), (b) “1806” process (15:30—20:00)

## 2 强降水的雷达VWP特征

### 2.1 强降水的VWP风场演变特征

选取雷达VWP低层（雷达所能探测的最低高度）、中层（5.5 km高度，为雷达探测高度范围内的中值位置）、高层（9.1 km高度，2例中雷达探测最高层高度的统一位置）风向、风速分析，并作如下规

雷达资料选取西宁CINRAD/CD雷达中垂直风廓线（VWP产品），以两次过程中降水时间段内最接近整点和半点的时刻为准。由于西宁雷达海拔高度为2.4 km左右，所能探测到的最低层为2.7 km或3.0 km，因此，文中低层均以该时刻VWP中风出现的最低层高度为准。

### 1.2 降水实况

“1507”过程累计降水量有5个测站达到大雨标准（图1a），降水中心在大通国家站，降水量为30.5 mm；其中包括湟中和大通两个国家级测站在内的多个区域站出现短时强降水，强降水开始于17:20，最大小时降水量为9.3 mm（图2a），具有混合性强降水性质：降水时间较长，小时雨量较小且分布不均匀。“1806”过程累计降水量有8个测站达到大雨标准（图1b）， $>30.0$  mm的有4个测站，降水中心在湟中县海子沟，降水量达到41.7 mm；其中包括西宁市和湟中两个国家级测站在内的多个区域站出现短时强降水，强降水开始于16:30，最大小时降水量达到31.9 mm（图2b），是典型的对流性强降水性质：降水时间集中、小时雨量大、持续时间较短、局地性强。

定<sup>[14]</sup>：偏南风为正值，其中SW风为黑色，SE则为红色，偏北风则为负值，其中NW风为黑色，NE则为红色，当VWP上风场出现ND时，风速为0。

混合性强降水“1507”过程中，降水前16:00—16:30上低层较强的NW风增强至 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上，中层由风速较小的偏S风转为ND，高层为强劲

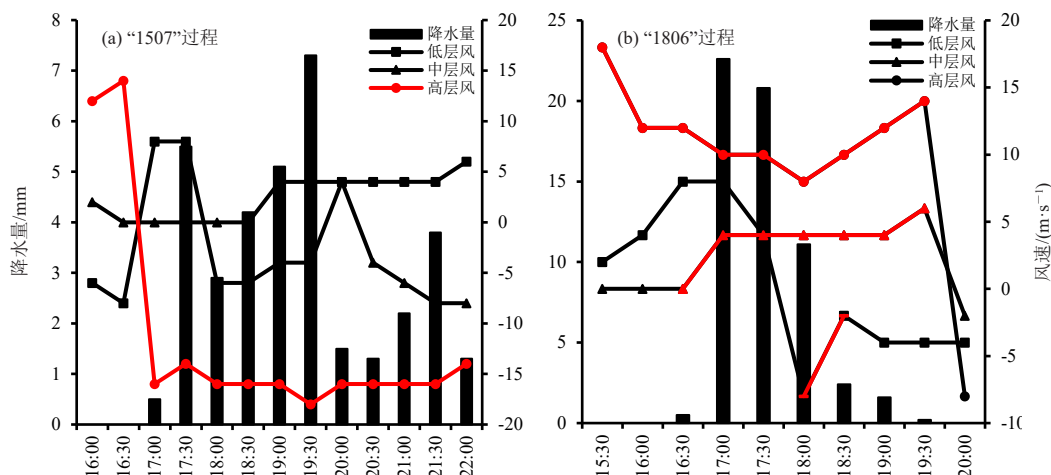


图2 西宁两次过程雷达VWP不同层的风和降水量演变

Fig. 2 Change of wind of VWP at different layers on Xining radar and maximum precipitation

的SE风，风速达到 $12\sim 14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；临近强降水开始的17:00左右低层转为 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 较强的WSW风，中层依然维持“ND”，高层则转为NE风且风速继续增大到 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；强降水于17:20开始，而实际上17:25低层SW风更明显；17:30低、中、高层则分别持续17:00的风向，但风速略有变化，此时出现第一次降水峰值，30 min降水量达到5.5 mm；18:00—19:30随着强降水的持续，VWP风场发生了变化，低层转为NW风，风速略减小，中层由ND转为SW风，风速较小，高层则持续为NE风，风速保持在 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，19:00—19:30出现第二次降水峰值，降水量达到7.3 mm；20:00之后，低层又转为SW风，风速逐渐略增大，中层转为NW风，风速也略增大，高层则一直维持NE，但风速逐渐减小，强降水也逐渐减小。可见，混合性强降水临近强降水开始至强降水维持时段内低层为SW风且风速增大，中层则会出现ND，高层为NE或SE风，且各层风速会增大；低层SW风的水汽输送为强降水的出现和维持提供了所需的暖湿气流，高层偏E风也为水汽、能量等在强降水区的汇合提供了有利的条件；当强降水接近结束时，低、中层转为NW风，高层则风向变化不明显、风速减小。整个过程的最大降水量出现在低层风向明显转变的时段内。

对流性强降水“1806”过程，降水前的15:30—16:30，VWP上低层风场为SW风，风速由 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大至 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，中层出现ND并维持，高层一直为SE风，风速达到 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；17:00出现最强降水，30 min降水量达到22.6 mm；强降水接近结束的18:30之后，低层转为NW风，风速减小为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，中层ND转为SE风，风速为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，高层则SE风持续不变，风速略增大至 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。可见，对流性强降水

临近降水开始至维持时段内低层也为SW风，中层也会出现ND，高层则为偏E风，低—中—高层的风速增大更明显，即风场垂直变化更明显。整个过程的最大降水量也出现在低层风向明显转变的时段内。

综上，西宁强降水开始前VWP上低层出现SW风并增大，强度虽然达不到急流标准，但这种气流对大气能量和水汽输送尤为重要，且对流性强降水低层风场更明显，与层结不稳定密切相关；中层风场出现ND；与很多研究<sup>[5,9,14]</sup>不同的是高层偏E气流明显，特别是稳定性强降水的高层偏E风强度更强且持续时间更长，为水汽、能量等在强降水区的汇合提供了有利的条件。过程最大降水量出现在低层风向明显转变的时段内。

## 2.2 强降水与高、低空强气流位置的变化

这里定义VWP上低层（ $<5.5\text{ km}$ ） $\geq 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为强气流（未达到标准或未出现以0表示，下同），高层（ $\geq 5.5\text{ km}$ ） $\geq 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为强气流，中层为ND出现的高度，来确定低、中、高层强气流出现的最低高度，以分析强气流下传或上传与强降水的关系。

两次过程的混合性强降水，在高层强气流向上传递至低层时强降水开始或增大，对流性强降水主要是低层强气流的上传，中层ND楔形块是强降水开始的先兆。

## 2.3 强降水移向与高空平均气流

雷达VWP可以作为探空资料的补充<sup>[5,21]</sup>，因此将VWP上高空风场资料应用于强降水的高空平均气流（风暴承载层平均风）<sup>[24]</sup>计算之中。在VWP上选取对应高度的风场进行计算并分析风切变矢量随高度的变化，以确定强降水单体移向与高空平均气流之间的关

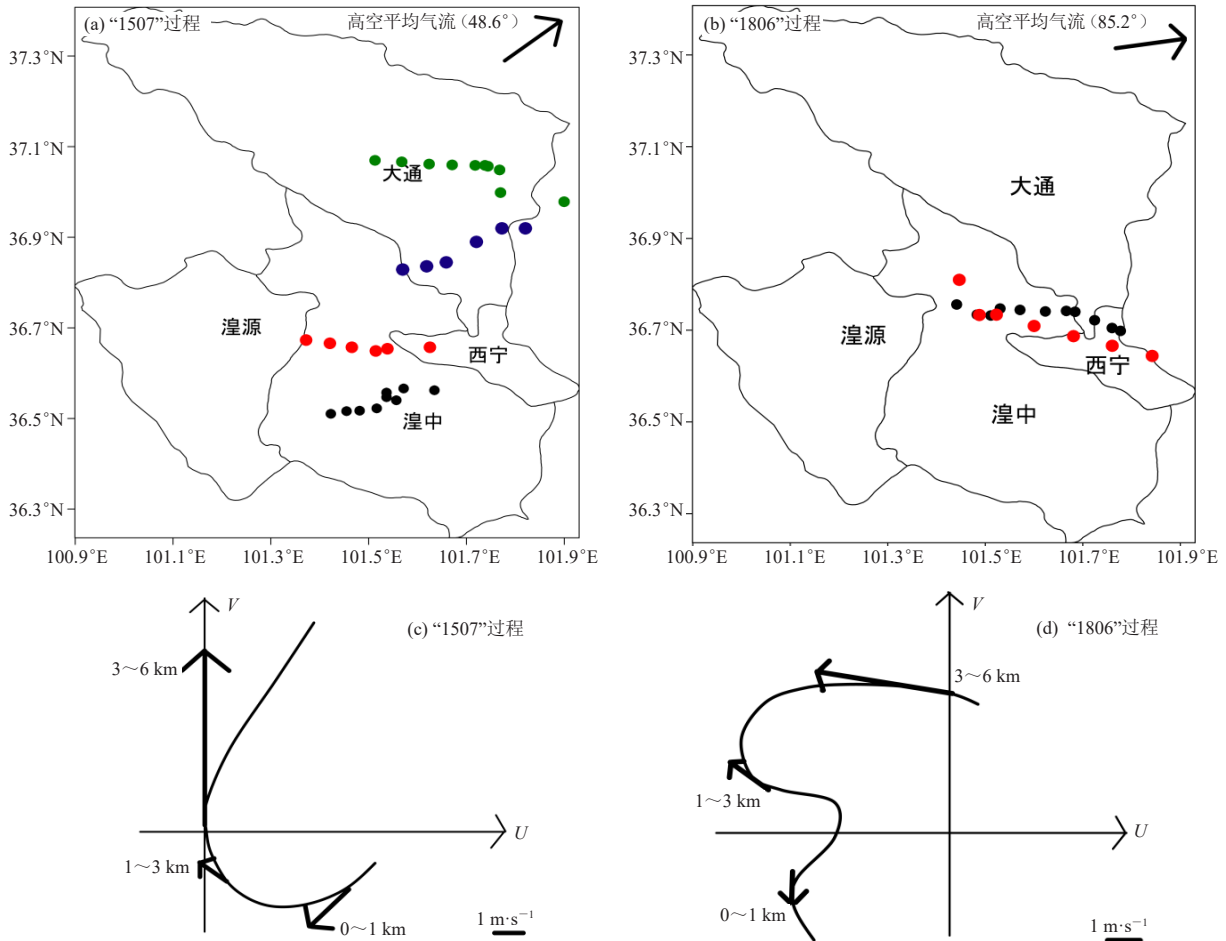


图3 西宁雷达强降水单体 (●表示) 移动路径 (a~b, 不同单体用不同颜色表示) 及垂直风切变矢 (c~d)  
(a, c) “1507”过程, (b, d) “1806”过程

Fig.3 Moving path (a~b, different monomers indicated by different colors) of strong precipitation monomer (indicated by ●) and vertical wind shear vector (c~d) on Xining Radar  
(a,c) “1507” process, (b,d) “1806” process

系 (图3)。高空平均气流的计算方法参考文献<sup>[25]</sup>。

混合性强降水移向明显偏向高空引导气流的右侧, 而对流性强降水的移向受垂直风切较复杂的变化而偏向高空引导气流右侧的幅度较小。

## 2.4 强降水的垂直风切变

参考文献<sup>[26]</sup>计算垂直风切变 $|\Delta V|$ , 将西宁雷达所能探测到的最低高度设为0 km, 分别取与最低高度相差1.0 km、3.0 km、6.0 km处的数值。因此, 0~1.0 km  $|\Delta V|$ 反映了低层风切变, 0~3.0 km反映了中层风切变, 0~6.0 km则反映了高层风切变。西宁两次强降水过程开始或增大前 $|\Delta V|$ 明显增大, 混合性强降水低、高层 $|\Delta V|$ 增大是关键, 对流性强降水则是低层 $|\Delta V|$ 增大起主导作用。

## 2.5 强降水的风暴相对螺旋度

参考文献<sup>[22-23]</sup>计算风暴相对螺旋度SRH, 取VWP上所有探测资料值的层数, 并根据2.3节中强降水移

向偏向高空平均气流的方位度数来增加平均风向的度数。同样以 $<5.5$  km为低层,  $\geq 5.5$  km为高层, 中间计算的厚度要求 $\geq 3.0$  km。

西宁两次强降水在SRH低、高层均转为正值后开始, 当低层SRH正值持续时降水持续, 只有低层SRH转为负值后, 降水才会减弱结束, 且SRH正值的明显增大提前于强降水的增大。不同的是高层SRH, 混合性强降水在第一次降水峰值后一直为负, 对流性强降水则在降水明显减弱后立即转为负, 这一方面反映了混合性强降水中风暴层厚度较薄, 风暴提供的能量较弱, 对流性强降水的风暴组织性更强, 另一方面也与对流性强降水的降水时间较短而强度大致使能量集中释放有关。

## 3 强降水指数

如前, 西宁强降水与VWP上低、高层风场及依据VWP计算的 $|\Delta V|$ 与SRH有密切的关系。为了更清楚地

表征强降水与VWP及依其计算的各相关量的关系,在参考文献<sup>[6]</sup>的基础上,依据以上分析结果,定义西宁强降水指数(VR)如下:

低层:  $|\Delta V|$ 取0~1.0 km,

$$VR_{低} = SW_{风速} / 4 + (|\Delta V| + SRH) / 2, \quad (1)$$

式(1)除以4表示低层 $\geq 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的SW风。由于西宁强降水开始前或持续时,低层出现SW风并增大,过程中SW风的平均风速为 $5.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,但在VWP上读取的风速以 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为单位,为了实际应用的方便,低层选取 $\geq 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的SW风。

高层:  $|\Delta V|$ 取0~6.0 km,

$$VR_{高} = E_{风速} / 12 + (|\Delta V| + SRH) / 2, \quad (2)$$

式(2)除以12表示高层 $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的E风。同样,由于强降水出现时高层多为E风,所有偏E风的平均风速为 $13.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,也为了方便而选高层 $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的E风。

两个公式后段除以2是为了控制数值。

VR指数:

$$VR = VR_{低} + VR_{高} \quad (3)$$

VR指数可以定量地表示低层SW气流、高层偏E气流及低、高层 $|\Delta V|$ 和SRH与强降水的关系。

## 4 结论与讨论

通过分析西宁混合性强降水和对流性强降水2次不同性质强降水天气过程中雷达VWP风场特征、强降水中高、低空气流相互关联及与高空平均气流的关系,来确立依VWP计算的 $|\Delta V|$ 和SRH等相关量与强降水关系,并建立了强降水指数,主要结论如下:

1) 西宁强降水开始前低层SW风速增大,中层风场出现ND,高层偏E气流明显,特别是稳定性强降水的高层偏E风强度更强且持续时间更长。过程最大降水量出现在低层风向明显转变的时段内。

2) 混合性强降水在高层强气流向向下传递至低层时,强降水开始或增大,强降水偏向高空气流的右侧;对流性强降水主要是低层强气流向向下传递,偏向高空引导气流右侧的幅度较小;两者中层ND楔形块是强降水开始的先兆。

3) 西宁强降水开始或增大前垂直风切变 $|\Delta V|$ 明显增大,混合性强降水低、高层 $|\Delta V|$ 增大是关键,对流性强降水则是低层 $|\Delta V|$ 增大起主导作用。

4) 西宁强降水在风暴相对螺旋度SRH低、高层均转为正值后开始,低层SRH正值持续时降水持续,只有低层SRH转为负值后,降水才会减弱结束,且SRH正值的明显增大较强降水的增大有提前量。不同

的是高层SRH,混合性强降水在第一次降水峰值后一直为负,对流性强降水则在降水明显减弱后立即转为负。

5) 定义的强降水指数较好地提前反映了西宁强降水强度随时间的变化特征,且对流性强降水的使用性更好,可能与对流性强降水的风暴组织性更强使SRH变化更明显有关。

以上结论是从西宁2次强降水过程中得出的,还需大量的个例进行检验。

## 参考文献

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] 周海光. 强热带风暴碧利斯(0604)引发的特大暴雨中尺度结构多普勒雷达资料分析. 大气科学, 2008, 32(6): 1289-1308.
- [3] 李华宏, 曹杰, 杞明辉, 等. 雷达风廓线反演在云南强降水预报中的应用. 高原气象, 2012, 31(6): 1739-1745.
- [4] 庄薇, 刘黎平, 王改利, 等. 青藏高原复杂地形区雷达估测降水方法研究. 高原气象, 2012, 32(5): 1224-1235.
- [5] 王丽荣, 汤达章, 张艳刚. 春季强降水过程的多普勒天气雷达图像特征剖析. 气象科技, 2006, 34(1): 88-92.
- [6] 付双喜, 张鸿发, 楚荣忠. 河西走廊中部一次强降水过程的多普勒雷达资料分析. 干旱区研究, 2009, 26(5): 656-663.
- [7] 张崇莉, 李淑华, 赖云华, 等. 滇西北高原局地暴雨雷达回波特征. 气象科技, 2010, 38(2): 197-200.
- [8] Shao A M, Qiu C J, Liu L P. Kinematic Structure of a heavy rain event from dual-Doppler radar observations. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(4): 609-616.
- [9] 朱敏华, 姜有山, 周红根. 两次暴雨过程的多普勒天气雷达资料对比分析. 气象科学, 2005, 25(1): 71-78.
- [10] 彭双姿, 姚蓉, 刘从省, 等. “2010-05”湘中突发性强降水过程雷达回波特征分析. 暴雨灾害, 2010, 29(4): 363-369.
- [11] 彭九慧, 易永力, 吴显春, 等. 河北省承德市短时强降水的多普勒雷达特征分析. 干旱气象, 2010, 28(2): 184-197.
- [12] Ha J H, Kim H W, Lee D K. Observation and numerical simulation with radar and surface data assimilation for heavy rainfall over central Korea. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28(3): 573-590.
- [13] 傅朝, 杨晓军, 周晓军, 等. 2013年6月19—20日甘肃陇东南暖区暴雨多普勒雷达特征分析. 气象, 2015, 41(9): 1095-1103.
- [14] 刁秀广, 侯淑梅. 4次大暴雨过程雷达径向速度和超低空西南急流特征分析. 海洋气象学报, 2017, 37(3): 46-53.
- [15] Dai J, He N, Chen S, et al. Change of low-level jet in a heavy rainstorm process of Xiangtan in July 2016. Meteorological and Environmental Research, 2019, 10(2): 10-14.
- [16] 张京英, 漆梁波, 王庆华. 用风廓线产品分析一次暴雨与高低空急流的关系. 气象, 2005, 31(12): 41-45.
- [17] 王福侠, 俞小鼎, 王宗敏, 等. 河北暴雨的多普勒天气雷达径向速度特征. 气象, 2014, 40(2): 206-215.
- [18] 夏文梅, 陈楠, 程婷, 等. 降水过程中多普勒天气雷达风廓线产品特征. 气象, 2008, 34(10): 20-27.
- [19] 徐芬, 王博妮, 夏文梅, 等. 长江中下游地区一次春季暴雨过程的多普勒雷达速度特征分析与研究. 高原气象, 2014, 33(2): 548-556.
- [20] 方标. 2015年春末梵净山东侧特大暴雨雷达径向速度特征. 干旱气象, 2016, 34(6): 1064-1070.
- [21] 赵瑞金, 史锐, 董保华, 等. 应用多普勒天气雷达资料分析强对流天气的垂直廓线特征. 气象科学, 2008, 28(增刊): 64-70.
- [22] 王丽荣, 胡志群, 匡顺四. 应用雷达产品计算风暴相对螺旋度. 气象, 2006, 32(4): 45-51.
- [23] 徐芬, 夏文梅, 胡志群, 等. 多普勒天气雷达风场产品在螺旋度计算中的应用. 气象科学, 2007, 27(5): 495-501.
- [24] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社, 2006.
- [25] 曾书儿. 风速风向的矢量平均方法. 气象, 1983, (6): 21-22.
- [26] 胡明宝. 风廓线雷达探测与应用. 北京: 气象出版社, 2015.