

# Dynamic Analysis of a Heavy Rainstorm in North Central Area of Ningxia District from July 29 to 30, 2012

Wei Wang<sup>1</sup>, Wenshu Mao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Meteorological Bureau of Fushan District, Yantai Shandong

<sup>2</sup>Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Email: 493375894@qq.com

Received: Aug. 16<sup>th</sup>, 2018; accepted: Aug. 31<sup>st</sup>, 2018; published: Sep. 7<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  reanalysis data are used to conduct a diagnostic analysis of vertical helicity and moist potential vorticity of a heavy rain weather process of Ningxia north-central area. The results showed that: 1) The vertical helicity can reflect the dynamic effect of heavy rain, and the interaction between the low-level positive center and the high-level sub-center enables low-level convergence, high-level divergence, and enhanced high-low layer suction, which is conducive to the release of unstable energy. 2) MPV is able to reflect the dynamic and thermal effects of combining physical, MPV1 shows convective instability storm period, and MPV2 is able to show that baroclinic instability, to provide the necessary impetus storm conditions. By comparison analysis, vertical helicity of large area, MPV1 negative large value area and MPV2 positive area can be substantially coincident with a good correspondence with the heavy rain area.

## Keywords

Storm, Vertical Helicity, Wet Vortex, Diagnostic Analysis

---

# 2012年7月29日~30日宁夏中北部区域暴雨落区的动力诊断分析

王 巍<sup>1</sup>, 毛文书<sup>2</sup>

<sup>1</sup>烟台市福山区气象局, 山东 烟台

<sup>2</sup>成都信息工程大学, 四川 成都

Email: 493375894@qq.com

收稿日期: 2018年8月16日; 录用日期: 2018年8月31日; 发布日期: 2018年9月7日

## 摘要

利用NCEP逐日四次的FNL全球再分析格点资料, 网格距 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , 通过分析垂直螺旋度和湿位涡, 对发生在宁夏中北部地区的一次暴雨天气过程的暴雨落区进行动力诊断分析。结果表明: 1) 垂直螺旋度能够体现暴雨的动力作用, 低层正中心、高层副中心的相互作用, 使低层辐合、高层辐散, 高低层抽吸作用加强, 有利于不稳定能量的释放。2) 湿位涡是能够体现动力、热力作用相结合的物理量, MPV1显示出暴雨时段的对流不稳定状态, MPV2则能表明斜压不稳定, 为暴雨提供了必要的动力条件。通过对比分析发现, 垂直螺旋度的大值区、MPV1负大值区、MPV2的正值区三者能够基本重合, 与暴雨落区有较好的对应关系。

## 关键词

暴雨, 垂直螺旋度, 湿位涡, 诊断分析

Copyright © 2018 by authors 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

暴雨的出现利弊共存, 尤其是宁夏地区生态环境脆弱、降水量少, 做好对暴雨的研究工作, 对于宁夏地区的经济、农业的发展都具有益处。螺旋度和湿位涡的分析对于暴雨的研究工作具有十分重要的意义。

张虹[1]等在对一次西南涡导致的暴雨过程进行分析时得出, 螺旋度的大值区能够很好的对应西南涡的生成、发展的过程; 暴雨落区可以通过垂直螺旋的中心值来反应, 即位于其大梯度区域的东部。杨越奎[2]等在分析一次梅雨锋暴雨时表示, 螺旋度在 500 hPa 上的分布状态更能与暴雨的情况相对应, 水平方向上垂直螺旋度的分布状况能够反映出降水区域。陆慧娟[3]在对螺旋度进行研究时表示, 垂直螺旋度相较于水平螺旋度更能反映出天气系统的发展状况以及暴雨的程度, 水平螺旋度对于预测暴雨则更拥有实际作用。郑灿[4]通过对郑州的一次暴雨天气进行分析时表示, 当高层有负值中心、低层有正值中心这种情况出现在垂直螺旋度的分析图上时, 会促进暴雨的进程, 并且低层的正值中心能够对应暴雨实况。

湿位涡因其在暴雨分析中的独特性, 推动了暴雨研究的进展。留小强[5]等重新对湿位涡进行的论证, 并分析出了大尺度下的 MPV 的守恒性, 在将其放到真实环境下进行检测时, 验证了湿位涡的准确性。高守亭[6]等分析一次发生在长江流域范围内的暴雨过程时, 证明了 700~500 hPa 是湿位涡的主要变化高度, 最大值可大于 1.4 PVU; 并且暴雨落区与湿位涡异常范围大致相同, 强降水对湿位涡异常具有促进作用。井喜[7]等在用湿位涡对高原东部的一次暴雨分析时得出, 雨区上空出现的 MPV 等值线密集区是由于上空深厚的负值区与中低层的正值区在发展的过程中形成的。程海霞[8]等用湿位涡分析了一次山西暴雨得出了结论, 湿正压项能够表示暴雨的强弱程度, 负值区表示强, 正值区表示弱; 湿正压项的零值线附近能够反映出暴雨; 低层暖湿空气与湿斜压项的振幅区域能够很好地对应。

本文数据来自于 NCEP 提供的逐日四次的 FNL 全球再分析资料, 网格距为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , 选取时段为北京时间 2012 年 7 月 29 日 08 时~31 日 02 时, 用 Grads 进行绘图, 得到暴雨对应时间、地点的螺旋度和湿位涡的图形, 以此来对暴雨落区进行诊断。

## 2. 天气概况

2012年7月29日夜間, 宁夏地区受青藏高原东移南下的冷空气和西太平洋高压带来的暖空气的影响, 多地产生大暴雨。

宁夏中北部出现中雨到大雨, 石嘴山市、贺兰山脉以东、银川等地都监测到了暴雨或者大暴雨, 银川市作为暴雨中心(图 1(a)), 14 h 降水量超过了 100 mm 根据 29 日 18 时到 30 日 08 时自动站雨量的数据显示, 有 54 个站点的降水量数值超过了 50 mm, 其中 13 个站点超过 100 mm, 贺兰站为 106.2 mm, 银川站降水为 116.5 mm, 滚钟口检测到了 166.2 mm 的最大降水量, 这是银川地区 2012 年的首场暴雨, 并且单日最大降雨量突破该地区有气象记录以来的最大值。通过对 29 日 22 时~30 日 08 时的银川站逐小时降水量图(图 1(b))的分析, 银川站的暴雨强度最强的时间段在 29 日夜間, 30 日凌晨降水趋势减缓。暴雨使银川市出现内涝, 周边地区发生山洪, 部分城区电力供应受到影响, 乡镇房屋倒塌, 部分景区游客被困, 为宁夏带来巨大的经济损失, 并且危害到了人民的生命财产安全。

## 3. 研究方法

### 3.1. 垂直螺旋度的提出及计算

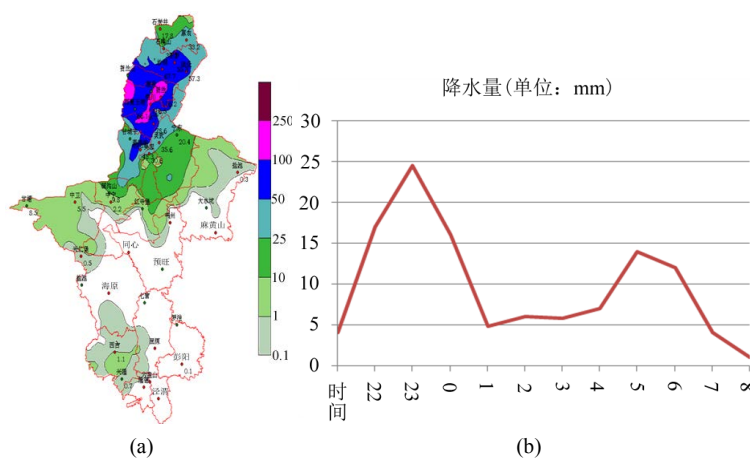
螺旋度是用来描述物体旋转特性的, 最开始由 Betch 提出, 但并不是用于气象上的研究, 大约从 1980 年之后, 开始有人将螺旋度用于气象的研究工作上, Lilly [9]最早用其来进行研究, 开辟了气象研究的新方向。

大气中很多物质的流动都具有螺旋性, 而螺旋度又是表示流体一边旋转一边沿旋转方向运动的动力性质的物理量, 因此气象研究者对于大气所具有的螺旋性积极展开的多项研究, 显露出了螺旋度与大气运动的某些独特的现象在动力学、运动学性质之间的内在联系[10]。

螺旋度与垂直风切变有关, 而垂直风切变是强对流天气发生的条件之一。垂直螺旋度可分为积分螺旋度、局地螺旋度, 本文内容是通过对局地螺旋度的分析, 来进行诊断的。

前人曾推导出螺旋度的表达式为:

$$H = \iiint_{\tau} \vec{V} \cdot \nabla \Lambda \vec{V} d\tau \quad (1)$$



**Figure 1.** (a) Ningxia precipitation map at 18:00 on July 29 to 8:00 on 30 (unit: mm); (b) YinChuan Railway Station hourly rainfall at 22:00 on July 29 to 8:00 on 30 (unit: mm)

**图 1.** (a) 7 月 29 日 18 时~30 日 08 时宁夏全区降水量分布图(单位: mm); (b) 7 月 29 日 22 时~30 日 08 时的银川站逐小时降水量(单位: mm)

即为对风速( $\vec{V}$ )和相对涡度( $\nabla\Lambda\vec{V}$ )的点乘求出体积分, 其中,  $\nabla\Lambda\vec{V} = (\xi\vec{i} + \eta\vec{j} + \zeta\vec{k})$ , 也可以称作涡度矢, 可以用来衡量旋转的状况,  $\zeta$ 即为相对涡度在垂直方向上的量。

之后, Woodalld 提出了局地螺旋度, 表达式为:

$$h = \vec{V} \cdot \nabla\Lambda\vec{V} = (u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}) \cdot (\xi\vec{i} + \eta\vec{j} + \zeta\vec{k}) \quad (2)$$

其中,  $\xi \equiv \left(\frac{\partial\omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}\right)$ ,  $\eta \equiv \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial\omega}{\partial x}\right)$ ,  $\zeta \equiv \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)$ ,  $\vec{i}$ 、 $\vec{j}$ 、 $\vec{k}$  分别表示在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  的方向上。

在  $p$  坐标系下, 上式可写为:

$$h = \vec{V} \cdot \nabla\Lambda\vec{V} = \left(\frac{\partial\omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}\right)u + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial\omega}{\partial x}\right)v + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)\omega \quad (3)$$

则垂直方向上的螺旋度方程可表示为

$$h_p = -\omega\zeta = -\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)\omega \quad (4)$$

单位为  $10^{-8}$  hPa/s,  $\omega$  表示垂直速度,  $\zeta$  表示涡度。对垂直螺旋度进行分析, 当垂直速度小于零、涡度大于零, 即在上升运动区、正涡度区, 垂直螺旋度为正( $h_p > 0$ ), 空气对流运动强, 有坏天气出现; 反之, 当在下沉运动区、负涡度区时, 垂直螺旋度值为负, 对应好天气; 在计算过程中为了只了解垂直上升运动的影响, 当  $\omega = 0$  时,  $h_p = 0$ 。可以从公式中看出, 这个方程是垂直速度与垂直涡度的结合, 垂直速度和垂直涡度都是与暴雨的产生密切相关的量, 两者结合更能够很好的反映出在暴雨发生前后大气的运动状况, 因此使用垂直螺旋度来对暴雨过程进行诊断会有明显的效果。

### 3.2. 湿位涡的提出及计算

20 世纪 40 年代, 罗斯贝[11]定义了一个新的物理名词, 开辟了暴雨研究的新的方向——位涡。1942 埃特[12]在等熵面上定义了涡度, 也称为位势涡度, 公式为:

$$P_E = \alpha\vec{\zeta}_a \cdot \nabla\theta \quad (5)$$

$\alpha$  表示比容,  $\vec{\zeta}_a$  表示三维的绝对涡度。这个方程能够将动力、热力作用反映出来, 但是位势涡度的公式中没有对水汽影响的计算, 难以满足对准确诊断暴雨过程的需求。

但是在真实的大气状况下, 暴雨发生时存在水汽的凝结潜热, 需要将其考虑方程中, 才能更加客观地反映出暴雨的状况。基于这个原因, 1979 年 Bennetts、Hoskins [13]在包辛尼斯克近似过程的条件下, 将水汽的凝结潜热过程加入位势涡度的公式中, 推导出湿位涡的公式, 弥补了位涡的缺点。以  $p$  坐标系为基准进行推导, 以下为湿位涡守恒的方程:

$$\text{MPV} = -g(\zeta_p + f)\frac{\partial\theta_{se}}{\partial p} + g\left(\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial\theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial\theta_{se}}{\partial y}\right) = \text{const} \quad (6)$$

$$\text{MPV1} = -g(\zeta_p + f)\frac{\partial\theta_{se}}{\partial p} \quad (7)$$

$$\text{MPV2} = g\left(\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial\theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial\theta_{se}}{\partial y}\right) \quad (8)$$

上式是考虑了湿绝热、无摩擦的大气环境, 其中,  $(\zeta_p + f)$ 为惯性稳定度,  $f$ 代表科氏参数,  $\zeta_p$ 是相对涡度,  $\theta_{se}$ 为假相当位温, MPV1 表示湿正压项, MPV2 表示湿斜压项, 湿位涡(MPV)的单位为

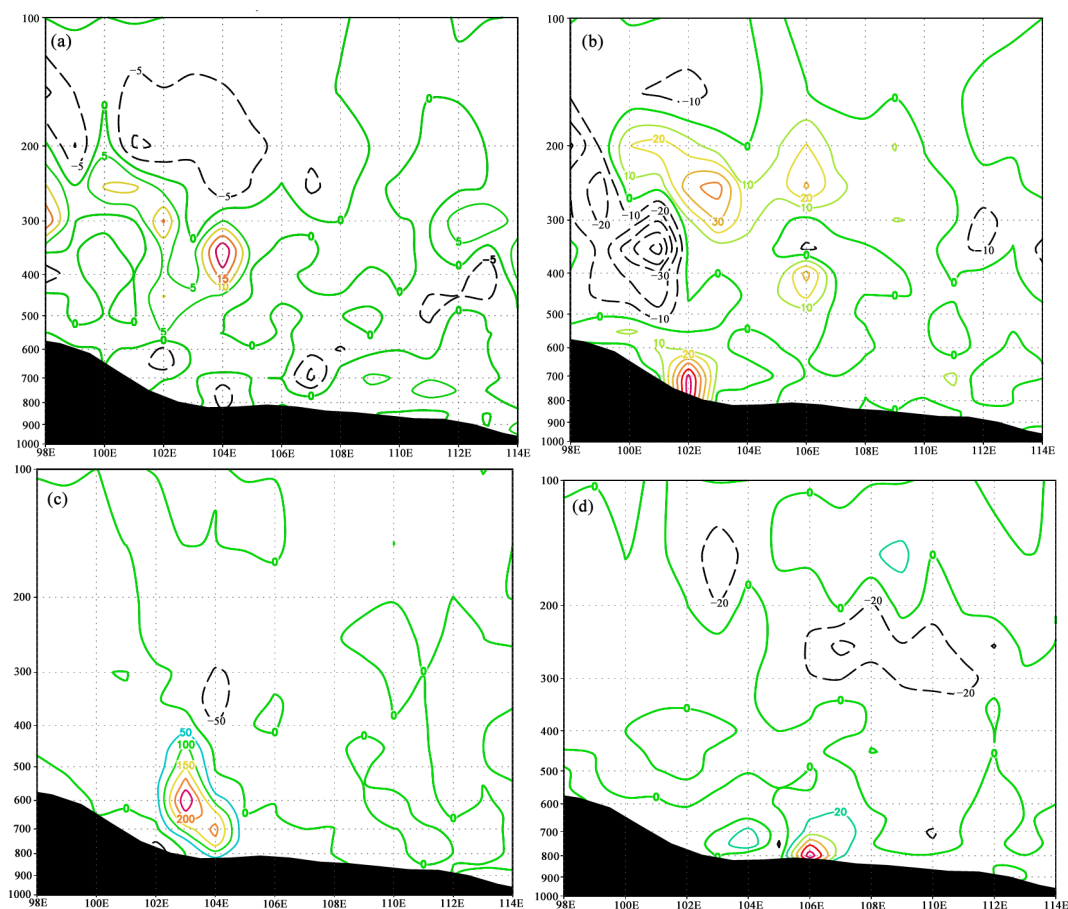
$IPVU = 10^{-6} m^2 \cdot K \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1}$ 。根据公式, 可以分析出, 当湿正压项大于零( $MPV1 > 0$ )的时候, 表示大气呈现对流稳定的状态, 反之, 湿正压项小于零( $MPV1 < 0$ )的时候, 大气呈现对流不稳定的状态; 湿斜压项( $MPV2$ )考虑了风的垂直切变以及湿斜压性, 当湿斜压项大于零( $MPV2 > 0$ )的时候, 大气即为斜压不稳定的状态; 根据两种公式的性质, 能够很好地对暴雨进行诊断。

## 4. 暴雨落区动力诊断

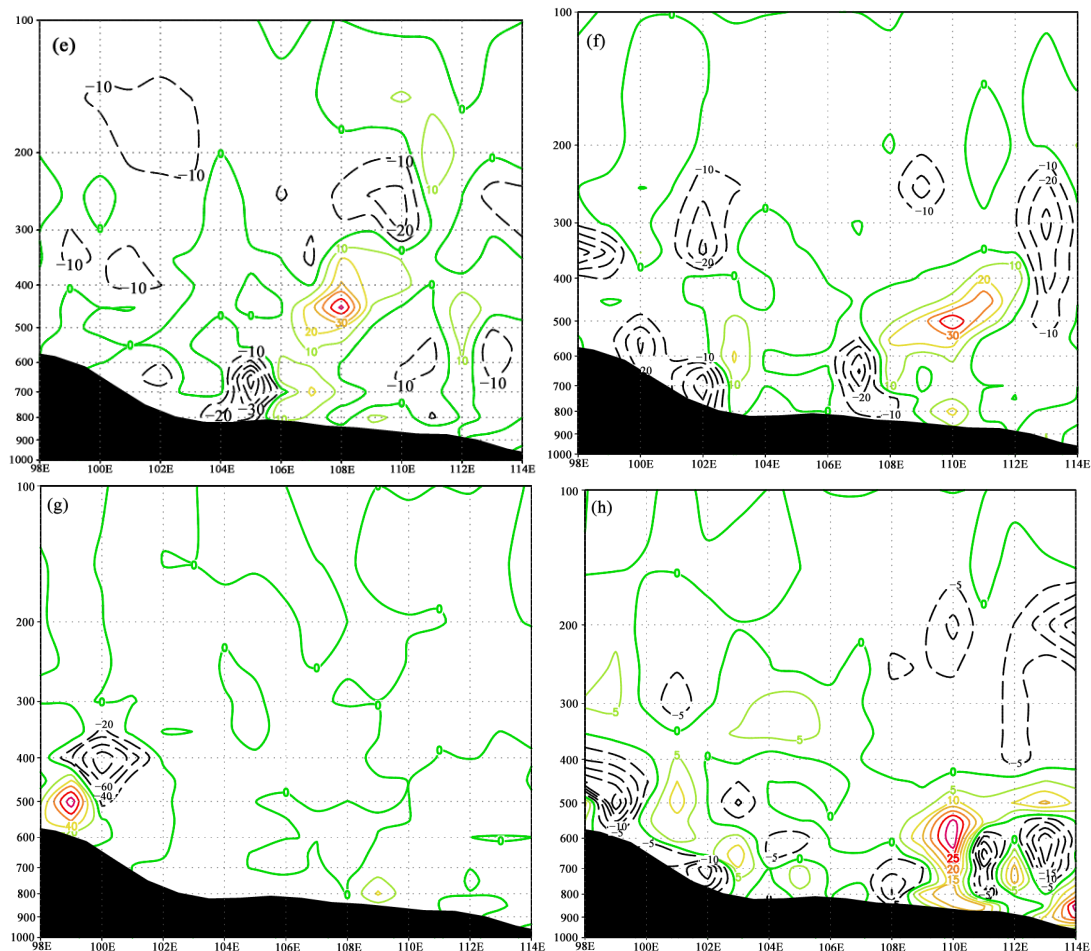
### 4.1. 垂直螺旋度的诊断

实况的暴雨是在移动的, 进入宁夏然后离开宁夏, 为了更好地了解这个过程, 沿银川站绘制垂直螺旋度的纬向剖面图。图 2 中显示出, 实际的降雨区与螺旋度的中低层正值中心相对应, 正值中心随雨区的移动而移动, 低层和高层有很好的配合作用; 29 日夜间到 30 日白天, 宁夏中北部地区普降暴雨, 其强度与位置都能在正值中心上得到良好的体现。

29 日 08 时, 正值中心位于  $104^{\circ}E$ 、350 hPa 处, 强度为  $20 \times 10^{-8} hPa/s$ , 对流层低层主要为零值区, 200 hPa 存在一个负值中心, 此时银川地区上空处于稳定状态, 没有出现降水; 29 日 14 时, 中低层 700 hPa 出现正值中心区, 强度为  $60 \times 10^{-8} hPa/s$ , 对应中高层的负值中心, 对流不稳定; 29 日 20 时, 正值中心强度明显增大, 达到  $250 \times 10^{-8} hPa/s$ , 高度发展到 400 hPa, 并对应中高层强度为  $-50 \times 10^{-8} hPa/s$  的负值中心, 已经接近银川, 对流不稳定的程度相较上一时刻已经明显加强, 处于正值中心边缘影响下的银川站已经出现降水; 30 日 02 时, 正值中心强度降低, 高度下降, 中高层依然对应负值区, 并且移动到  $106^{\circ}E$ ,







**Figure 2.** Vertical helix along 38°N vertical profile (unit:  $10^{-8}$  hPa/s ). (a) 08:00 on the 29th; (b) 14:00 on the 29th; (c) 20:00 on the 29th; (d) 02:00 on the 30th; (e) 08:00 on the 30st; (f) 14:00 on the 30th; (g) 20:00 on the 30th; (h) 02:00 on the 31st  
**图 2.** 沿 38°N 的垂直螺旋度的垂直剖面图(单位:  $10^{-8}$  hPa/s )。(a) 29 日 08 时; (b) 29 日 14 时; (c) 29 日 20 时; (d) 30 日 02 时; (e) 30 日 08 时; (f) 30 日 14 时; (g) 30 日 20 时; (h) 31 日 02 时

在 29 日夜间到 30 日凌晨, 正值中心移过宁夏, 并且配合中高层负值中心的移动, 低层上升辐合、高层下沉辐散, 为宁夏地区带来强降水, 强度逐渐降低, 与银川地区的实际降水时段以及强度相配合; 30 日 08 时~31 日 02 时, 正值中心正逐渐移出宁夏地区, 中高层负值中心强度降低, 宁夏地区对流层中低层由负值区或零值区代替, 形势趋于稳定, 降水逐渐停止。

在整个暴雨过程中, 雨区几乎对应低层正中心、高层副中心的状态, 并且随着正、负中心强度的增大、减小, 雨量也随之增大、减小, 暴雨增大的过程中, 正值中心也向下移动, 暴雨过程在不断释放不稳定能量, 低层的正值区对应大气的辐合上升, 良好的动力条件提供给了暴雨。

为了更好的对此次暴雨的中心——银川站进行准确的分析, 绘制沿银川站(106°E, 38°N)垂直螺旋度的时间-高度剖面图。图 3 中显示, 29 日 14 时, 暴雨开始前, 银川地区 500 hPa 以上有两个正值中心, 强度均为  $20 \times 10^{-8}$  hPa/s, 有上升运动; 29 日 20 时, 降雨已将开始, 正值中心位于 800 hPa, 强度为  $80 \times 10^{-8}$  hPa/s, 对应高层 300 hPa 强度为  $-20 \times 10^{-8}$  hPa/s 的负值中心, 这种形式持续到 30 日 02 时, 与暴雨时段相对, 与实际暴雨最大强度出现的时间接近, 数值大小与实际雨量相对应; 在 30 日 08 时, 强度逐渐减弱, 降水量逐渐减少, 05 时左右, 低层 900 hPa 以下被负值区控制, 预示降水即将停止, 30 日白天大气趋于稳定。

## 4.2. 湿位涡的诊断

### 4.2.1. 湿正压项的诊断

湿正压项是可以反映出大气运动中的对流是否处于稳定状态的物理量, 也可描述对流层低层暖湿气流, 为了更好地对此次暴雨过程进行诊断分析, 绘制 7 月 29 日 08 时~31 日 02 时沿银川站(106°N, 38°E)的湿正压项的垂直剖面图。

结合降水图(图略), 对图 4 进行分析, 29 日 14 时, 500 hPa 以下几乎都被负值区控制, 负值中心位于 650 hPa、800 hPa 下的 103°E~106°E 之间, 最大值-0.6 PVU, 500 hPa 以上是正值区, 相较于上一时次, 零值线下降; 29 日 20 时, 103°E 有正值中心向下发展到 700 hPa, 强度为 0.2 PVU, 带来高层的下沉冷空气, 此时银川受负值区的影响, MPV1 垂直发展至 500 hPa, 强度为 0.8 PVU, 此时有降水。30 日 02 时, 正值中心向东移动两个经度, 强度增强, 高度下降至 800 hPa, 取代了原本位于此位置的负值区, 同时, 负值区东移, 暴雨落区东移, 强度增强至-2.1 PVU, 高度上升到 500 hPa, 在 8 小时内银川地区负值区强度不断增大, 最强的降雨时段也出现在这期间。30 日 08 时, 负值区强度减弱到-1.2 PVU, 正值中心继续向东移动, 高度下降到 850 hPa, 强度增强到 0.8 PVU, 负值区高度下降至 650 hPa, 控制范围到 106°E, 此过程中冷空气不断入侵对流层中低层, 取代暖湿气流, 对流稳定度减小, 降水强度也由强到弱的变化; 在之后的时间段内, 正值中心高度上升到中高层, 对流层底层逐渐被零值线控制, 负值区减弱, 范围减小, 对应暴雨过程的结束。

在全过程中, 对流层中高层一直被正值区所控制, 暴雨区处在负值区的控制之下, 此条件下大气呈现不稳定状态; 随着雨势的减弱, 对流层中低层不断被正值区控制。

### 4.2.2. 湿斜压项的诊断

为了反映出大气的斜压性, 绘制 7 月 29 日 08 时~31 日 02 时沿银川站(106°N, 38°E)的湿斜压项的垂直剖面图。

结合降水图(图略), 对图 5 进行分析 29 日 08 时, 中低层大气湿斜压项数值小, 103°E 上 500 hPa 的位置有一个强度为 0.005 PVU 的正值中心, 银川地区上空的对流层中层湿斜压项强度为 0.005 PVU, 中低层是零值线, 大气存在弱的斜压性; 29 日 14 时, 对流层中层几乎都处于正值区的影响范围, 强度增大, 104°E、108°E 上空对应正值中心数值都达到 0.01 PVU, 呈现“W”型, 银川正对两中心之间低值处,

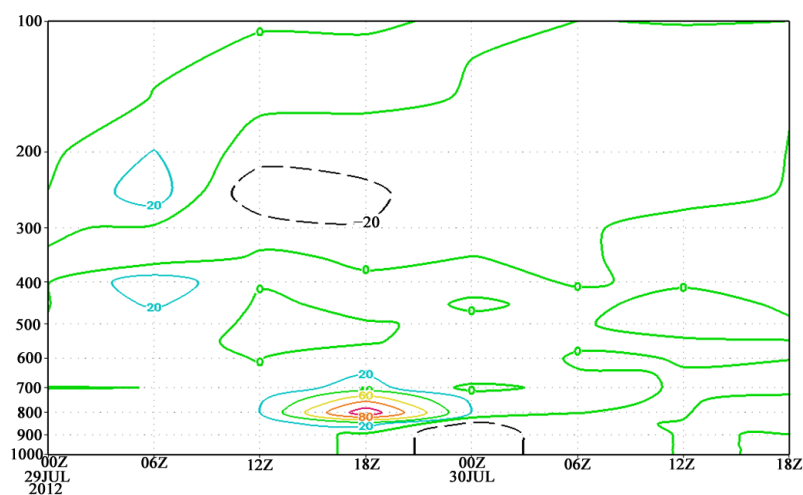
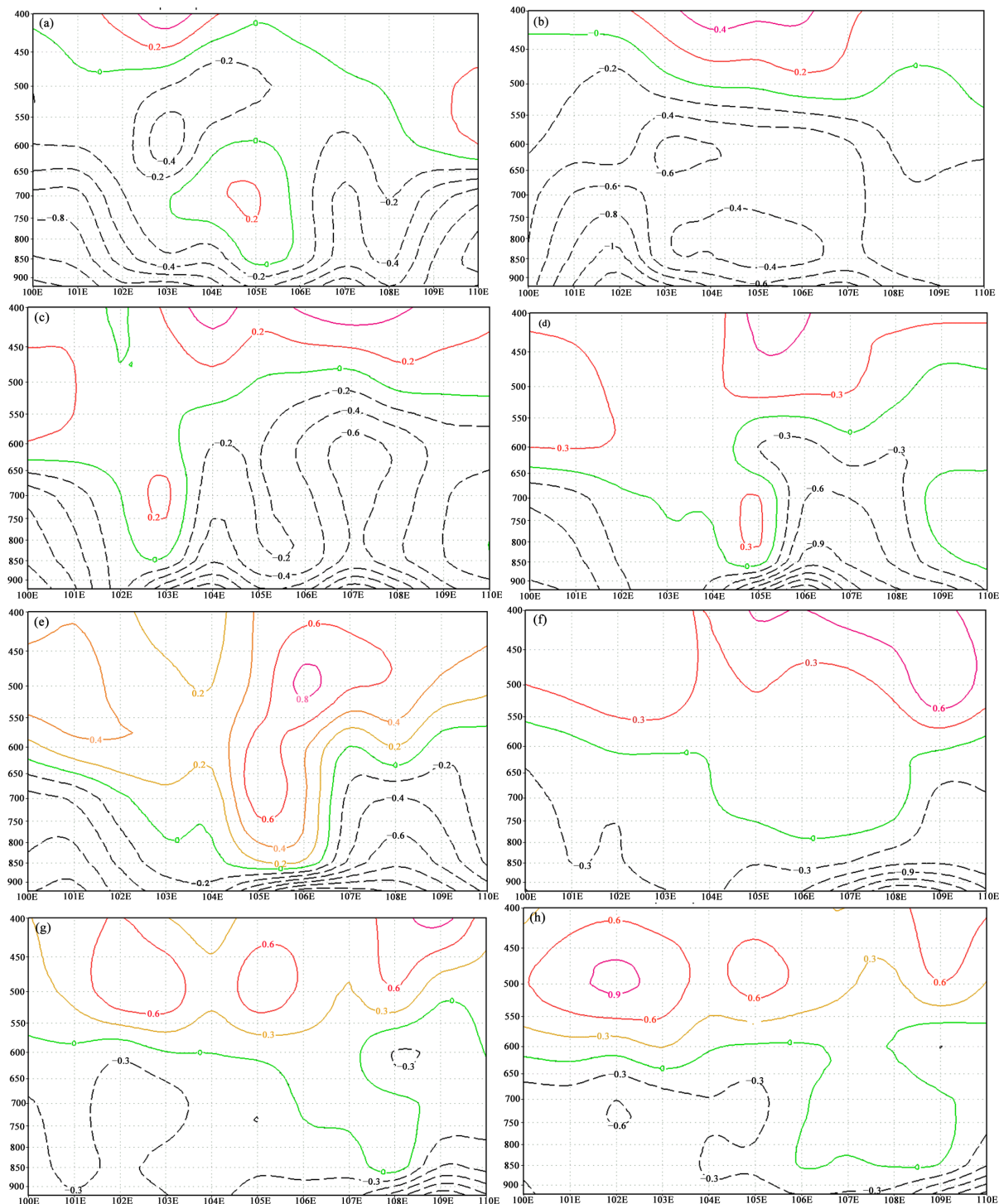


Figure 3. Time-height profile along the Yinchuan (106°N, 38°E) (unit:  $10^{-8}$  hPa/s)

图 3. 沿银川站(106°N, 38°E)的时间 - 高度剖面图(单位:  $10^{-8}$  hPa/s)



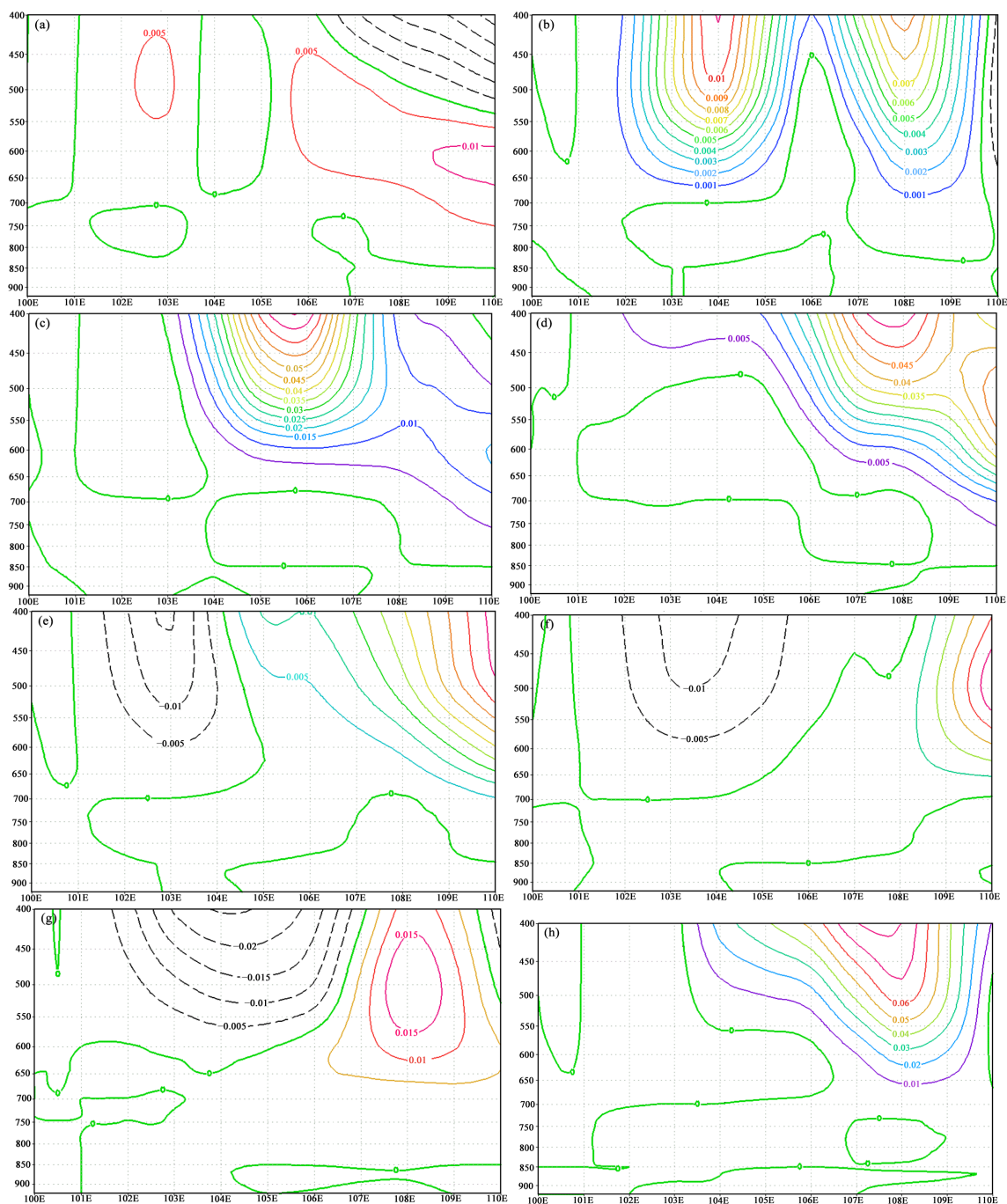
**Figure 4.** Wet positive pressure (MPV1) along 38°N vertical profile (unit: PVU). (a) 08:00 on the 29th; (b) 14:00 on the 29th; (c) 20:00 on the 29th; (d) 02:00 on the 30th; (e) 08:00 on the 30th; (f) 14:00 on the 30th; (g) 20:00 on the 30th; (h) 02:00 on the 31st

**图 4.** 沿 38°N 的湿正压项(MPV1)的垂直剖面图(单位: PVU)。 (a) 29 日 08 时; (b) 29 日 14 时; (c) 29 日 20 时; (d) 30 日 02 时; (e) 30 日 08 时; (f) 30 日 14 时; (g) 30 日 20 时; (h) 31 日 02 时

斜压性弱; 29 日 20 时, 银川上空被强的 MPV2 正值区控制, 强度达到 0.065 PVU, 斜压性增大; 30 日



02 时, 正值区向东移动, 强度有所减弱, 但银川地区依然受正值区的影响; 30 日 08 时, 正值区继续东移并减弱至 0.005 PVU, 103°E 的上方出现湿斜压项负值区, 强度为 -0.015 PVU; 此 16 小时内, 随着南下冷空气的影响, 银川上空斜压性增加到最大然后呈现减弱的趋势, 对应实况暴雨由强到弱的过程; 随后的几小时内, 负值区不断取代正值区, 强度增大, 正值区也逐渐减弱对银川的影响, 降雨停止。



**Figure 5.** Wet oblique (MPV2) along 38°N vertical profile (unit: PVU). (a) 08:00 on the 29th; (b) 14:00 on the 29th; (c) 20:00 on the 29th; (d) 02:00 on the 30th; (e) 08:00 on the 30th; (f) 14:00 on the 30th; (g) 20:00 on the 30th; (h) 02:00 on the 31st

**图 5.** 湿斜压项(MPV2)沿 38°N 的垂直剖面图(单位: PVU)。 (a) 29 日 08 时; (b) 29 日 14 时; (c) 29 日 20 时; (d) 30 日 02 时; (e) 30 日 08 时; (f) 30 日 14 时; (g) 30 日 20 时; (h) 31 日 02 时

与 MPV1 的图进行对比分析, 暴雨发生阶段, 在对流层中低层, 暴雨落区上空的呈现 MPV1 小于零, MPV2 大于零的状态, 也就是说, 此时暴雨区上空存在对流不稳定、斜压不稳定的状态, 有利于暴雨的发展; 并且 MPV2 比 MPV1 小一个量级, 其对 MPV 的总体影响也就较小。

## 5. 结论

对 2012 年 7 月 29~30 日发生在宁夏中北部地区的一次大暴雨过程进行了暴雨落区的动力诊断分析, 得到以下结论:

1) 垂直螺旋度 Fz 的分析表明: 在暴雨时段, 对流层低层归螺旋度为正值区、高层负值区, 并且随着暴雨的增强, 正值区数值增大, 负值区数值减小, 正值中心也更靠近低层, 正、负值区域的大小能够很好的配合实际暴雨的强度。

2) 湿位涡 MPV 的分析表明: 对流层低层湿正压项负值区、中高层湿斜压项正值区相对应, 能够体现暴雨的落区, 此时对流不稳定、斜压不稳定; 湿斜压项数值远小于湿正压项数值, 湿斜压项对湿位涡的影响较小, 主要依靠湿正压项的作用。

## 基金项目

国家自然科学基金: 青藏高原低频振荡空间结构的配置特征及其对我国天气气候的影响(41775079) 和宁夏气象防灾减灾重点实验室开放基金(2014)共同资助。

## 参考文献

- [1] 张虹, 李国平, 王曙东. 西南涡区域暴雨的中尺度滤波分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 361-371.
- [2] 杨越奎, 吴宝俊, 沈文梅, 等. “91.7”梅雨锋暴雨的螺旋度分析[J]. 气象学报, 1994, 52(3): 379-384.
- [3] 陆慧娟. 螺旋度及螺旋度方程的讨论[J]. 气象学报, 2003, 61(6): 684-691.
- [4] 崔灿. 郑州一次暴雨天气过程诊断分析[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(120): 137-141.
- [5] 留小强, 王田民, 吴宝俊, 等. 湿位涡方程及其应用[J]. 大气科学, 1995, 18(5): 569-575.
- [6] 高守亭, 雷霆, 周玉淑, 等. 强暴雨系统中湿位涡异常的诊断分析[J]. 应用气象学报, 2002, 13(6): 662-670.
- [7] 井喜, 李明娟, 王淑云, 等. 青藏高原东侧突发性暴雨的湿位涡分析[J]. 气象, 2007, 33(1): 99-106.
- [8] 程海霞, 帅克杰, 任璞, 等. 山西南部一次暴雨过程的湿位涡分析[J]. 山西气象, 2005(3): 1-2, 21.
- [9] Lilly, D.K. (1986) The Structure, Energetics and Propagation of Rotating Convective Storms. Part I: Energy Exchange with the Mean Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **43**, 113-125. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1986\)043<0113:TSEAPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1986)043<0113:TSEAPO>2.0.CO;2)
- [10] 张程明. 一次秋季台风暴雨的机制研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [11] Rossby, C.G. (1940) Planetary Flow Patterns in the Atmosphere. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, **66**, 68-87.
- [12] Ertel, H. (1942) Ein neuer hydrodynamischer Wirbelsatz. *Meteorology. Z. Braunschweig*, **59**, 277-281.
- [13] Bennetts, D.A. and Hoskins, B.J. (1979) Conditional Symmetric Instability—A Possible Explanation for Frontal Rainbands. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **105**, 945-962.

**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：2163-3967，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：[ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)