

林建. 2009 年 8 月 29 日黄淮和西南地区不同性质暴雨特征分析[J]. 气象, 2011, 37(3): 276-284.

# 2009 年 8 月 29 日黄淮和西南地区 不同性质暴雨特征分析<sup>\*</sup>

林 建

国家气象中心, 北京 100081

**提 要:** 利用观测资料和 NCEP 再分析资料, 对 2009 年 8 月 29 日发生在黄淮和西南地区东部不同性质暴雨的垂直结构特征进行了对比分析。结果表明: 两地区的暴雨发生在同一环流背景下, 但却具有不同的性质, 黄淮地区是锋面附近或锋后的稳定性降水, 西南地区属于锋前暖区中对流性强降水特征。不同性质暴雨在涡度、散度、高低空急流配置及垂直经向环流特征上有明显的差异, 湿位涡垂直分布特征也各有异同: 稳定性强降水对应高层有大湿位涡舌向下伸展至对流层低层, 高空冷槽东移诱发低层低涡发展, 低层有高湿位涡区与强降水对应; 对流性强降水对应高层湿位涡舌向下伸展至对流层中层, 干冷空气侵入触发湿对称不稳定能量释放产生对流性强降水。两类不同性质暴雨其垂直结构特征具有明显的不同, 可以为降水性质和短历时降水强度预报提供参考依据。

**关键词:** 暴雨, 稳定性降水, 对流性降水, 湿位涡

## Characteristic Analysis of Different Torrential Rain over Huanghuai Basin and Southwest China on 29 August 2009

LIN Jian

National Meteorological Center, Beijing 100081

**Abstract:** In terms of the observed data and NCEP  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  reanalysis data, the vertical characteristics of different feature torrential rain over Huanghuai Basin and Southwest China on 29 August 2009 are studied. Results show that the torrential rain over above two areas happened in the same circulation background, the former belongs to the stable heavy precipitation ahead of or rear of the front and the latter is of convective heavy precipitation in the warm area before the front. They have distinct differences in the vertical distribution of vorticity, divergence, jet stream at higher and lower levels, vertical meridional circulation and moist potential vorticity (MPV). For the stable heavy precipitation, cold trough at higher levels induced the vortex at lower levels and high MPV was transferred from higher level down to the lower level of the troposphere, which resulted in the high MPV at lower levels corresponding to the heavy rain; for the convective heavy precipitation, high MPV at high levels only was transferred down to the middle level of the troposphere together with dry and cold air intruding, which triggered the moist symmetry instability energy leading to the heavy convective rain. There are significant characters of vertical structure in two different feature torrential rains, which can provide some reference for the feature and strength of short-time precipitation forecast.

**Key words:** torrential rain, stable heavy precipitaion, convective heavy precipitation, moist potential vorticity (MPV)

<sup>\*</sup> 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906010)和国家气象中心预报员专项共同资助  
2010 年 5 月 27 日收稿; 2010 年 8 月 12 日收修定稿  
作者: 林建, 从事短期天气预报和定量降水预报研究. Email: linjian@cma.gov.cn

## 引言

2009年8月29日受高空槽东移和东北低涡后部南下冷空气及副热带高压西侧暖湿气流的影响,加上低层低涡切变和急流的共同作用,在黄淮和西南地区东部出现了大到暴雨,重庆西南部局部地区出现了大暴雨。研究<sup>[1-4]</sup>表明副高西侧往往是暴雨的频发区,尽管上述两个地区暴雨发生在相同的大尺度环流背景下,但由于暴雨是各种尺度天气系统相互作用的结果<sup>[5]</sup>,两个地区的暴雨具有不同的性质,高低空系统配置及对应的降水量都有所不同。陶诗言先生早在1980年<sup>[5]</sup>就研究过高低空急流同暴雨的配置关系,顾清源等<sup>[2,6]</sup>研究了低空急流和冷空气在副高西北侧连续暴雨中的触发作用和西南低涡诱发的特大暴雨中尺度特征,尹洁等<sup>[7]</sup>分析了冷锋前部对流性暴雨的特征。位涡理论的分析和应用<sup>[8]</sup>对暴雨和强对流等天气现象物理机制的研究也十分重要,有助于对大气动力过程的理解,高层位涡扰动可引起地面气旋的发展<sup>[9]</sup>。吴国雄、刘还珠、高守亭、黄亿等<sup>[10-13]</sup>指出湿位涡异常与强降水区有很好的对应关系。阎凤霞、姚秀萍等<sup>[14-15]</sup>分析了干侵入对气旋的发展和暴雨的作用。本文主要针对两个地区大气的不同垂直结构特征及系统配置,用涡度、散度、垂直速度、位温、锋生函数等物理量及反映大气热力学和动力学综合特征的湿位涡进行分析,试图找出不同降水性质对应的大气垂直结构特征的异同,对不同性质暴雨天气的形成机理作初步探讨,为定量降水预报寻找一些可用的预报依据。

## 1 降水特征分析

2009年8月28日20时至29日20时在四川盆地东南部、重庆、陕西东南部、山西南部、河南、湖北、安徽出现了大到暴雨,降水量一般有25~80 mm,其中黄淮局地最大降水量99 mm,重庆西南部地区出现了大暴雨,降水量为100~161 mm(如图1),最强降水时段主要出现在29日02—14时。从地面实况观测(图略)可以清楚地看到,在陕西东南部、黄淮和江淮等地(简称黄淮地区)分布的大多数是雨层云,而在四川东部和重庆附近(简称西南地区)分布的则是积雨云。本文重点对比的区域是指32°~34°N、113°~115°E(黄淮地区),28°~29°N、103°~

106°E(西南地区)。

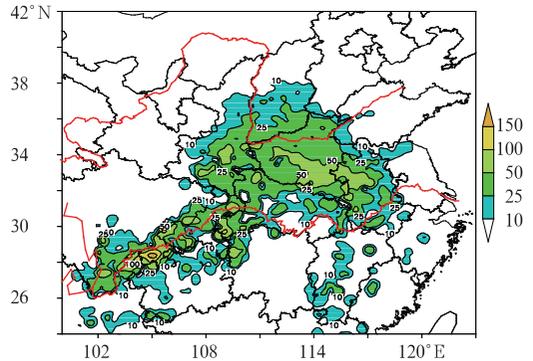


图1 2009年8月28日20时至29日20时24小时实况降水量(单位:mm)

Fig.1 Distribution of observed precipitation in China from 20:00 BT 28 to 20:00 BT 29 August 2009

从河南西平站1小时自动站雨量演变(图2a)可以看到,降水基本上都在15 mm以下,个别时次降水达25 mm。而重庆珙县(图2b)的降水29日02时左右开始,06时降水明显加强,06—09时每小时雨量在20~30 mm,并且在此期间,气压从1004 hPa升高到1012 hPa,气温从24℃下降到20℃,对应地面有弱的雷暴高压,10时中心强度达1014 hPa,之后随着整个降水区东移,降水减弱。从8月28日20时探空曲线(图略)也可以看出,河南南阳 $CAPE=43.3 J \cdot kg^{-1}$ , $K=28 K$ , $SI=7.8 K$ ,属于稳定层结,整个降水时段 $TBB$ 值基本都维持在一22℃以上;而重庆沙坪坝 $CAPE=1521.5 J \cdot kg^{-1}$ , $K=38 K$ , $SI=-2.18 K$ ,具有明显的不稳定层结结构,并且29日02—10时 $TBB$ 值都低于-32℃,29日03—04时 $TBB$ 极值达-65℃。也就是说,黄淮和西南地区的暴雨具有不同的性质,前者属于稳定性降水,后者属于对流性强降水特征。

## 2 大尺度环流背景及影响系统

从500 hPa环流形势和850 hPa风场可以看出,8月28日08时亚洲中高纬为两槽一脊形势,副高为东西两环,西环位于青藏高原,东环位于云南中南部、江南大部到西太平洋,高原槽位于青藏高原东部东西两环副高之间,其北侧青海东部有高原涡配合,700 hPa在陇南有低涡中心,850 hPa上空从四川北部到江汉有弱的切变。28日20时东环副高移

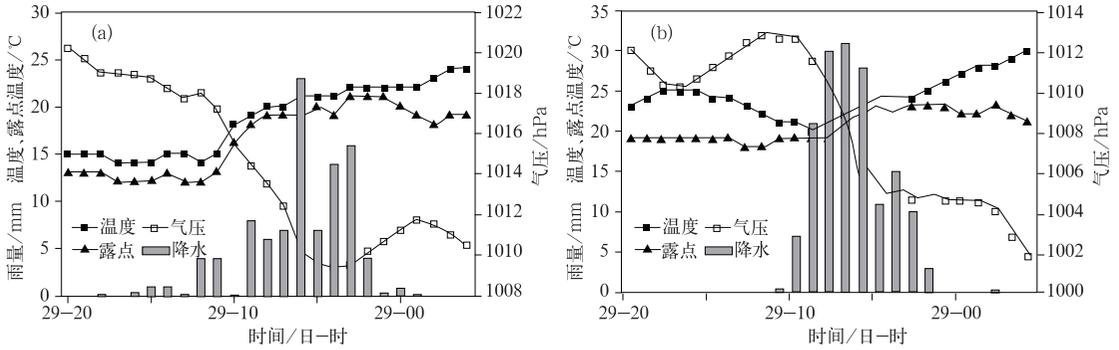


图2 河南西平(a)、重庆珙县(b)1小时自动站雨量、温度、气压、露点演变

Fig. 2 The hourly variation of AWS precipitation, temperature, pressure and dew point temperature at (a) Xiping, Henan Province and (b) Gongxian, Chongqing during 00:00 BT to 20:00 BT 29 August 2009

出西南地区,西界位于广西西部到湖南西部,西环副高加强,东界东移到  $110^{\circ}\text{E}$  附近,高原涡东移减弱,高原槽移到陇南到四川东部,700 hPa 低涡东移到陕西南部,低层 850 hPa 上空贵州北部有弱的西南涡,长江中游有弱的低涡环流,其北侧偏东风急流加强。随着高原槽的东移,槽前的正涡度平流使得 8 月 29 日 08 时西南涡和黄淮附近的低涡切变有一个明显加强的过程,从而使得偏东风急流加强,700 hPa 低涡切变位于四川东部到黄淮西部,850 hPa 低涡切变位于重庆到江淮西部(图 3),地面锋面位于黄淮至四川北部一带。从地面气压场和 850 hPa 温度场的演变(图略)来看,冷空气一方面来源于高原东部并随高原槽东移,另一方面则来源于东北低涡后部。因此,此次降水过程主要是受高原槽东移和东北低涡后部南下冷空气及副高西侧暖湿气流的影响,在低层低涡切变和偏东风急流及地面锋面的共

同作用下造成的。黄淮地区降水是锋面附近或锋后的稳定性降水,西南地区降水属于锋前暖区中产生的对流性强降水。

### 3 垂直结构特征分析

#### 3.1 冷空气及锋生作用

从黄淮地区经向平均的假相当位温  $\theta_{se}$  垂直剖面(图 4a)不难看出,大气具有冷锋锋区的斜压结构。冷空气主要来源于东北低涡后部 400 hPa 以下,28 日 20 时,500~800 hPa 有冷空气入侵,中层锋区位于 700 hPa 附近  $34^{\circ}\text{N}$  上空,低层锋区位于  $35^{\circ}\text{N}$  附近。29 日 02 时冷空气进一步南压,低层西南风加大,偏东风急流也明显加强,斜压锋生加强,冷锋锋区位于  $34^{\circ}\text{N}$  附近,垂直速度达  $-0.9 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略)。29 日 08 时随着偏东风急流的进一步加强,暖湿气流沿锋面继续爬升,锋区位于  $33^{\circ}\text{N}$  附近,此时上升运动达最强,900~300 hPa 垂直速度都小于  $-1.4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,极值达  $-1.8 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 4a),14 时以后随着冷空气南下和低层偏南气流减弱,降水逐渐东移减弱。

西南地区经向平均的假相当位温  $\theta_{se}$  垂直剖面(图 4b)则具有明显的差别, $\theta_{se}$  剖面具有典型的上冷下暖的对流不稳定垂直结构,低层  $\theta_{se} \geq 400 \text{ K}$ 。西来的冷空气主要位于 700~300 hPa 的中高层,而从东北低涡后部南下的冷空气则位于 700 hPa 以下整层,受东、西两侧冷空气的夹挤,29 日 02 时低层暖舌( $\theta_{se} \geq 356 \text{ K}$ )向上伸展到了 500 hPa,锋区位于  $29^{\circ}\text{N}$  附近,上升运动也较 20 时明显增强,达  $-1.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,中心位于 600 hPa(图 4b)。29 日 08 时东

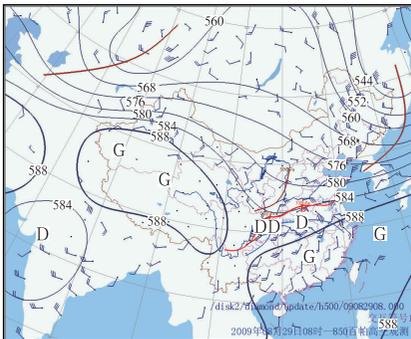


图3 2009年8月29日08时500 hPa环流形势分析和850 hPa风场

Fig. 3 Distribution of the 500 hPa geopotential height field (solid lines, unit: dagpm) and the 850 hPa wind field at 08:00 BT 29 August 2009

北低涡后部冷空气进一步南压,锋区也相应南压并加强,位于  $28^{\circ}\text{N}$  附近,低层暖湿舌高度降低到 600 hPa 附近,上升运动较 02 时显著增强,垂直速度达  $-1.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,中心抬高位于 500 hPa,具有明显的对流降水特征;29 日 14 时西南地区被冷空气占据,降水基本结束(图略)。

从以上分析可以看出,黄淮地区以锋面附近及锋后的稳定性降水为主,28 日 20 时至 29 日 20 时,在  $30^{\circ}\text{N}$  以上上空存在一条向北倾斜的高空锋区,随着冷空气的南压和低层偏南、偏东急流的加强,斜

压锋生加强并自北向南、自高空向地面传播,暖湿气流沿着冷锋锋面向上爬升,上升运动得到加强,29 日 08 时锋生函数达最强  $14 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  (图 5a),位于  $33^{\circ}\text{N}$  上空。西南地区降水属于暖区对流性降水,冷空气位于暖空气之上,锋生大值区位于 700 hPa 以下,主要集中在 800~900 hPa,29 日 02 时锋生最强,位于  $29^{\circ}\text{N}$  附近,达  $8 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  (图 5b)。

对黄淮地区来说,冷空气从高原东移南下与高空东北冷涡后部南下冷空气合并,冷平流和正涡度

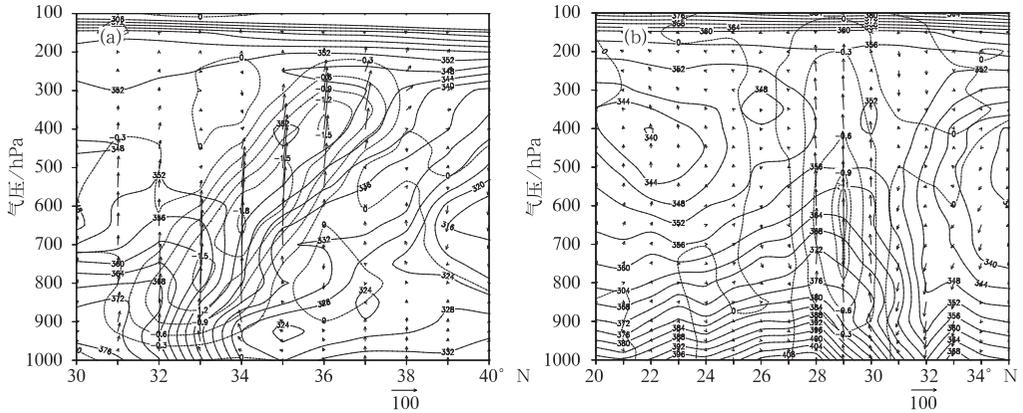


图 4 2009 年 8 月 29 日 08 时沿黄淮地区(a)和 02 时沿西南地区(b)经向平均的假相当位温  $\theta_{se}$  (粗实线)和垂直速度( $\leq 0$ ,虚线)纬度-高度垂直剖面及经向垂直环流(箭头)  
Fig. 4 Latitude-height cross sections of pseudo-equivalent temperature ( $\theta_{se}$ , bold solid line) and vertical velocity ( $\leq 0$ , dashed line) and meridional vertical circulation (arrow) averaged over (a)  $113^{\circ}-115^{\circ}\text{E}$  at 08:00 BT and (b)  $103^{\circ}-106^{\circ}\text{E}$  at 02:00 BT 29 August 2009

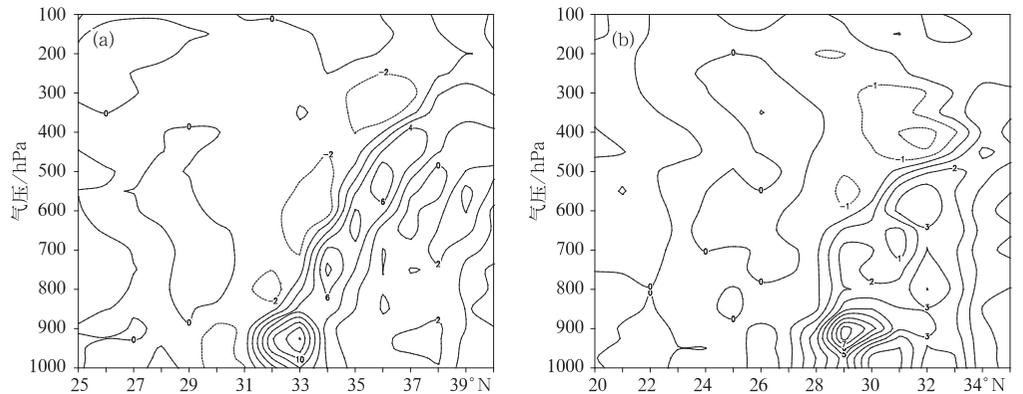


图 5 2009 年 8 月 29 日 08 时沿黄淮地区(a)和 02 时沿西南地区(b)经向平均的锋生函数垂直剖面(单位:  $10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
Fig. 5 Latitude-height cross sections of frontogenesis function averaged over (a)  $113^{\circ}-115^{\circ}\text{E}$  at 08:00 BT and (b)  $103^{\circ}-106^{\circ}\text{E}$  at 02:00 BT 29 August 2009 (unit:  $10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

平流作用使得低层黄淮低涡东移并加强,低涡南北两侧偏南、偏东风急流加强,冷暖平流使得斜压锋生加强,暖湿气流是沿锋面爬升,对应的是倾斜上升气流。对西南地区来说,高原东侧冷平流一方面使得

低层低涡向东南方向移动,一方面加强了低涡后侧的偏北气流,加上中高层(500 hPa 附近)正涡度平流的作用,使得低涡加强,其南侧偏南风加强;而东北低涡后部南下的冷空气向西南推进,和高原南下

的冷空气共同作用使得低层的暖湿气流强迫抬升,造成西南地区的对流性降水,对应的是垂直上升气流。

### 3.2 涡度散度及湿度垂直分布特征

为了了解两个地区不同性质降水对应的大气垂直结构,图 6 给出了两个区域平均的相对湿度、涡度和散度的时空剖面图。黄淮地区(图 6a)正涡度区位于 600 hPa 以下,层次较低,中心达  $120 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,负散度区则更低,位于 850 hPa 以下,达  $-90 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,中高层辐散位于 800~400 hPa,中心值为  $50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,集中在 650~500 hPa。02—14 时,相对湿度大值区( $\geq 90\%$ )与正涡度(负散度)区配合一致,对应该时次降水较大。西南地区(图 6b)垂直结构很不相同,其正涡度(负散度)区位于 400 hPa 以下,集中在 29 日 02—14 时。正涡度中心位于 750~600 hPa,为  $60 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,负散度中心位于 950~850 hPa,为  $-40 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,高层正散度中心位于 250~150 hPa,为  $80 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。02—08 时,相对湿度大值区( $\geq 80\%$ )与正涡度(负散度)区配合一致,

对应该时次降水达最大。

对比不难看出(图 6a,b),西南地区对流性降水区相对湿度不如黄淮地区稳定性降水,黄淮地区 90% 大湿度区位于 500 hPa 以下,几乎接近 1000 hPa,湿层较厚;西南地区 80% 大湿度区位于 500 hPa 以下,湿度中心( $\geq 90\%$ )位于 800~500 hPa 之间。动力结构两者也明显不同,黄淮地区正涡度位于 600 hPa 以下中低层,但正涡度值较西南地区大得多,负散度集中在 850 hPa 以下更低层次,中(低)层正(负)散度值也较西南地区偏大,对应低层偏南风 and 偏东风急流汇合,低层辐合作用较中高层辐散作用明显,中高层对应高空急流入口区右侧辐散作用也较明显。西南地区则相反,正涡度柱较高,中心位于中层,负散度区也较高,但数值偏小,高层正散度值明显大于低层负散度值,低层辐合较小,主要来源于低涡南北两侧偏南风和东北风的辐合,由于南亚高压东移,29 日 02—14 时其中心位于该地区上空,对应高层辐散抽吸作用相比低层辐合更大,并且这种强的辐散下沉运动加强了垂直环流的下沉支,使得对流性上升运动加强。

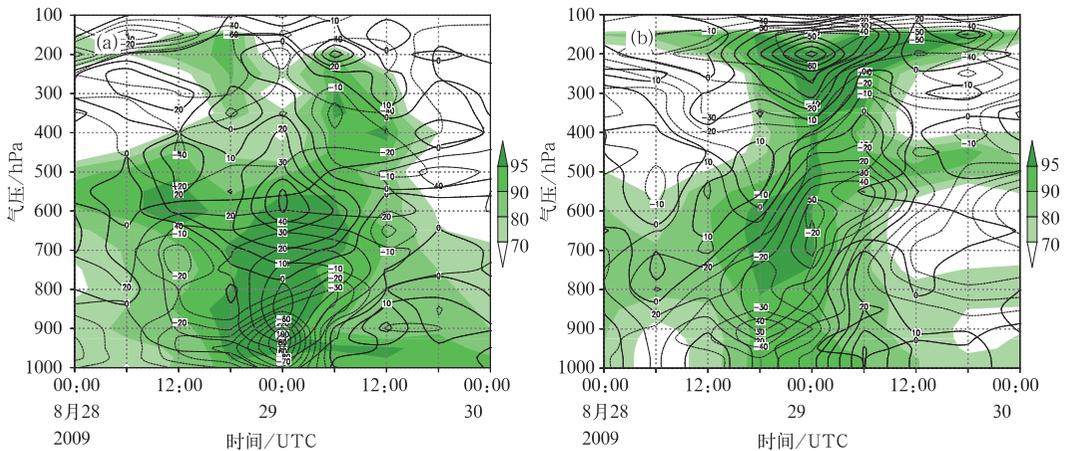


图 6 黄淮地区(a)和西南地区(b)区域平均的散度(虚线)、涡度(实线)及相对湿度(阴影 $\geq 70\%$ )时间-高度剖面

Fig. 6 Time-height cross sections of divergence (dashed line), vorticity (solid line) and relative humidity (shaded area  $\geq 70\%$ ) averaged over Huanghuai area (a) and Southwest China (b)

### 3.3 高低空急流及经向环流特征

随着高原槽的东移,槽前的正涡度平流使得低层西南涡和黄淮附近的低涡切变有一个明显加强的过程,从而使得西南涡东西两侧偏南风和偏北风急流以及黄淮低涡北侧偏东风急流加强。29 日 02 时低层(850 hPa 和 925 hPa)西南低涡两侧南北风明显加大,达  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,黄淮低涡北侧 850 hPa 偏东风也

有所加大,达到  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,925 hPa 偏东风超过  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 7a)。29 日 08 时低层(850 hPa 和 925 hPa)西南低涡两侧南北风有所减弱(图 7b),而 29 日 08—14 时黄淮低涡北侧 850 hPa 和 925 hPa 偏东风急流都加大到  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,为水汽的输送提供了很好的条件,而且黄淮低涡北侧对应高空西南急流超过  $48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 7c,d)。

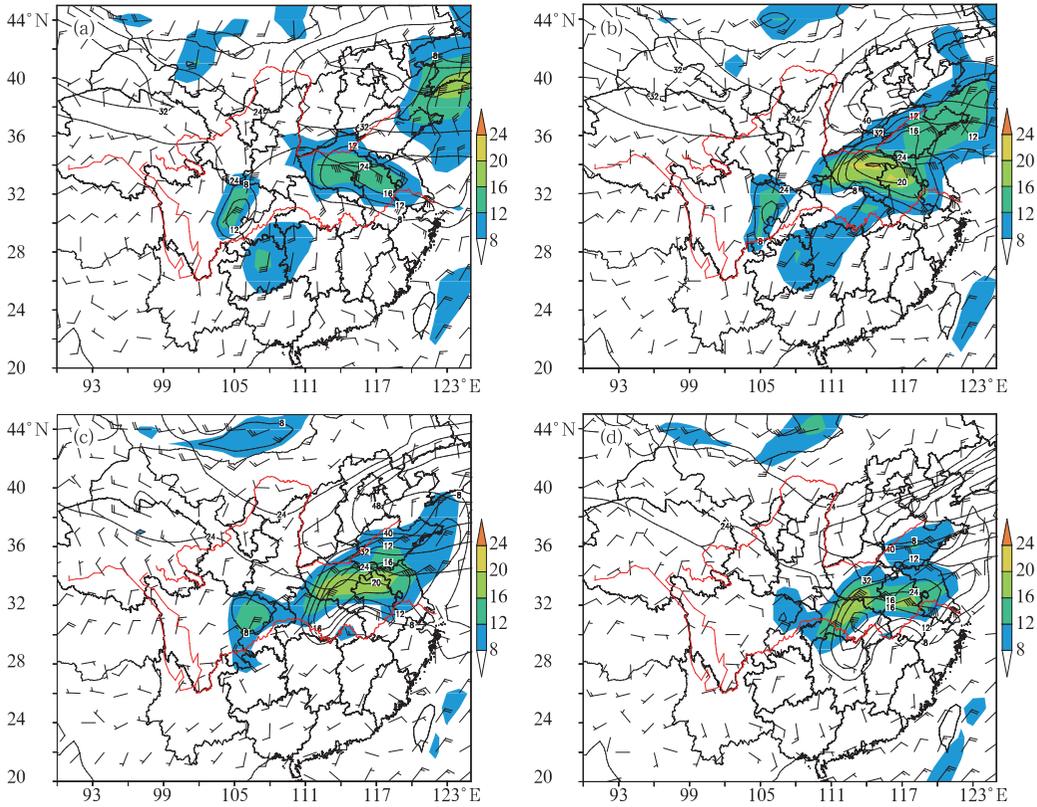


图 7 2009 年 8 月 29 日 02 时(a)、08 时(b)、14 时(c)、20 时(d) 925 hPa 风场及 850 hPa 急流 (阴影 $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、300 hPa 急流(等值线 $\geq 32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 7 The 925 hPa wind field, 850 hPa jet stream (shaded area  $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and 300 hPa jet stream (isoline  $\geq 32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at (a) 02:00 BT, (b) 08:00 BT, (c) 14:00 BT, and (d) 20:00 BT 29 August 2009

从高空急流配置来看,黄淮地区条件要优于西南地区东部,但为什么降水反而不如西南地区呢?黄淮上空高低空急流耦合构成垂直经向环流,主要是沿锋面爬升的倾斜上升运动,尽管垂直速度很大,

但垂直环流很宽,下沉运动较弱,数值在  $0.3 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  以下(图 8a),不利于经向环流的发展,属于大尺度降水环流特征。西南地区上空没有高空急流配合,但南亚高压位于该地区上空,高层的辐散抽吸作

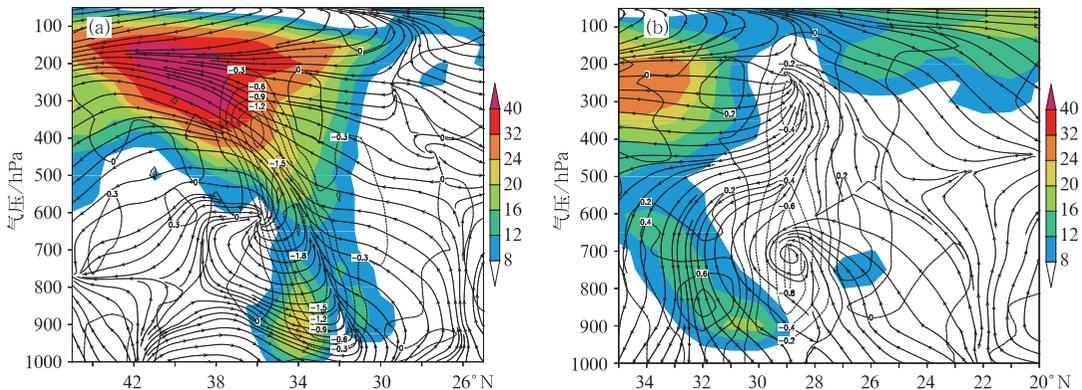


图 8 2009 年 8 月 29 日风场(阴影区风速 $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )和垂直速度沿 114°E(a,08 时)和 105°E(b,02 时)纬度-高度剖面

Fig. 8 Latitude-height cross sections of wind field (wind velocity  $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  over shaded area) and vertical velocity (a) along 114°E at 08:00 BT and (b) along 105°E at 02:00 BT 29 August 2009

用很大,高层的辐散下沉与中低层的东北风急流对应的下沉气流一起构成了经向环流的下沉支,下沉运动作用较强,数值在  $0.8 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  以上(图 8b),低涡南侧西南风急流左侧的上升气流对应经向环流的上升支,而且上升支和下沉支间距不是很宽,这种强的下沉作用加强了经向垂直环流,具有中尺度对流降水环流特征。

### 3.4 湿位涡垂直分布特征

绝热无摩擦的饱和湿空气具有湿位涡守恒的特性,考虑大气垂直速度的水平变化比水平速度的垂直切变得小得多,当忽略垂直速度的水平变化时, $p$  坐标系下湿位涡(MPV)守恒方程<sup>[6]</sup>为:

$$\begin{aligned} MPV = & -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} + g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \\ = & \text{const} \end{aligned}$$

其分量形式为:

$$MPV_1 = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p},$$

$$MPV_2 = g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y}$$

其中, $\zeta_p$  为  $p$  坐标下垂直涡度分量, $\theta_e$  为相当位温。 $MPV_1$  为湿位涡的垂直分量,取决于空气块的绝对涡度的垂直分量和相当位温的垂直梯度的乘积。因为绝对涡度是正值,当大气是对流不稳定( $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} > 0$ )时, $MPV_1 < 0$ ;当大气是对流稳定( $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} < 0$ )时, $MPV_1 > 0$ 。 $MPV_2$  是湿位涡的水平分量,由风的垂直切变(水平涡度)和  $\theta_e$  的水平梯度决定,表征大气的湿斜压性。位涡的单位为 PVU。1 PVU =  $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

吴国雄等<sup>[6]</sup>对湿斜压过程中涡旋垂直涡度的发展研究中,提出了倾斜涡度发展的理论,指出当  $\theta_e$  面陡立时,大气无论是湿对称不稳定或对流不稳定,湿等熵面的倾斜能引起垂直涡度的增长从而导致暴雨的发生。湿位涡能同时反映大气的动力、热力及水汽特征,所以近年来湿位涡用于暴雨的研究越来越多<sup>[7-8,12]</sup>。为了了解湿位涡在稳定性和对流性降水过程中的异同,图 9 分别给出了与黄淮和西南地区强降水对应的湿位涡纬向高度剖面。

从黄淮地区平均的湿位涡垂直分量( $MPV_1$ )纬向高度剖面可以看出,28 日 20 时中高层 500~700 hPa 有高湿位涡舌向低层伸展,与高层冷槽对应(图

略)。29 日 02 时 0.5 PVU 高湿位涡舌前界伸展到 750 hPa,中心值大于 1.0 PVU(图 9a)。29 日 08 时 0.5 PVU 前界接近 900 hPa,低层 900~700 hPa 黄淮上空为湿位涡的大值区( $MPV_1 > 1.0 \text{ PVU}$ ),中心值大于 2.0(图 9b),对应高空冷槽东移和低层黄淮低涡的发展阶段,并与强降水发生时段吻合。14 时高层冷空气侵入低层,对应弱的下沉运动(图略)。整个降水发生时段,300 hPa 以下层次相对湿度大值区维持 7 个左右纬度。黄淮降水区上空 700~950 hPa 大气是对流稳定的  $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} < 0$ (图 4a),对应  $MPV_1 > 0$ ;由于  $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} < 0$  和水平风垂直切变  $\frac{\partial u}{\partial p} < 0$ (低层偏东风急流和中高层偏西风急流之间的切变)的贡献,对流层中低层  $MPV_2 < 0$  湿斜压性较明显。950~1000 hPa 近地层  $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} > 0$  有很弱的对流不稳定,对应  $MPV_1 < 0$ ,近地层由于风切变很小, $MPV_2 > 0$ (图略),但数值较小;黄淮地区整个降水阶段 900 hPa 以下  $MPV > 0$ (图略),低层大气处于湿对称稳定状态,随着高层大湿位涡舌下传,低层低涡发展,对应  $MPV > 0$  的区域抬高到 800 hPa,与强降水阶段对应。

从西南地区平均的湿位涡垂直分量  $MPV_1$  纬向高度剖面可以看出,对流层高层有湿位涡舌下传,同时有冷空气侵入中低层,并且产生了强的下沉运动。29 日 02 时 0.5 PVU 前界伸展到 450 hPa,和干冷空气前界(相对湿度  $\leq 40\%$ )一致(图 9c)。29 日 08 时 0.5 PVU 前界接近 550 hPa(图 9d),14 时接近 650 hPa。西南降水区上空大气是对流不稳定的  $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} > 0$ (图 6b),对应  $MPV_1 < 0$ ;由于水平风垂直切变  $\frac{\partial u}{\partial p} > 0$  较小, $MPV_2 > 0$  数值较小(图略),湿斜压性不明显;整个降水阶段 900 hPa 以下  $MPV < 0$ (图略),但数值较小,低层大气处于弱的湿对称不稳定状态。整个降水发生时段,200 hPa 以下层次相对湿度大值区相当狭窄,仅 3~4 个左右纬度。低层的暖湿气流被高层侵入的冷空气强迫抬升,干冷空气侵入触发了低层弱的湿对称不稳定能量的释放,为锋面能强迫出强盛狭窄的上升气流提供不稳定气流的结构,因此产生的降水量及降水梯度都较大。

从以上分析可知:对流稳定或对流不稳定降水过程对应的湿位涡特征与张滨等分析的 1998 年夏季江

淮地区强暴雨湿位涡特征<sup>[16]</sup>及桂海林、尤红等<sup>[17-18]</sup>分析的淮海暴雨、滇中暴雨的位涡特征基本一致。值得注意的是黄淮地区稳定性降水对应高层有大湿位涡舌向下伸展,但没有明显的干冷空气伴随,高空冷槽东移诱发低层低涡发展,对应对流层低层有高温湿位涡区与强降水对应。西南地区对流不稳定降水对应高层有湿位涡舌向下伸展并同时伴有明显的干冷空气

气侵入,但湿位涡舌仅伸展到 500~600 hPa 左右,并没有达到对流层低层,低层大气处于湿对称不稳定状态,干冷空气侵入正好触发湿对称不稳定能量释放,从而产生强降水。因此无论大气处于湿对称稳定还是湿对称不稳定状态,都可能产生暴雨,但降水性质和短历时降水强度则有很大的不同,需结合湿位涡舌的垂直分布及变化以及冷空气的情况综合判断。

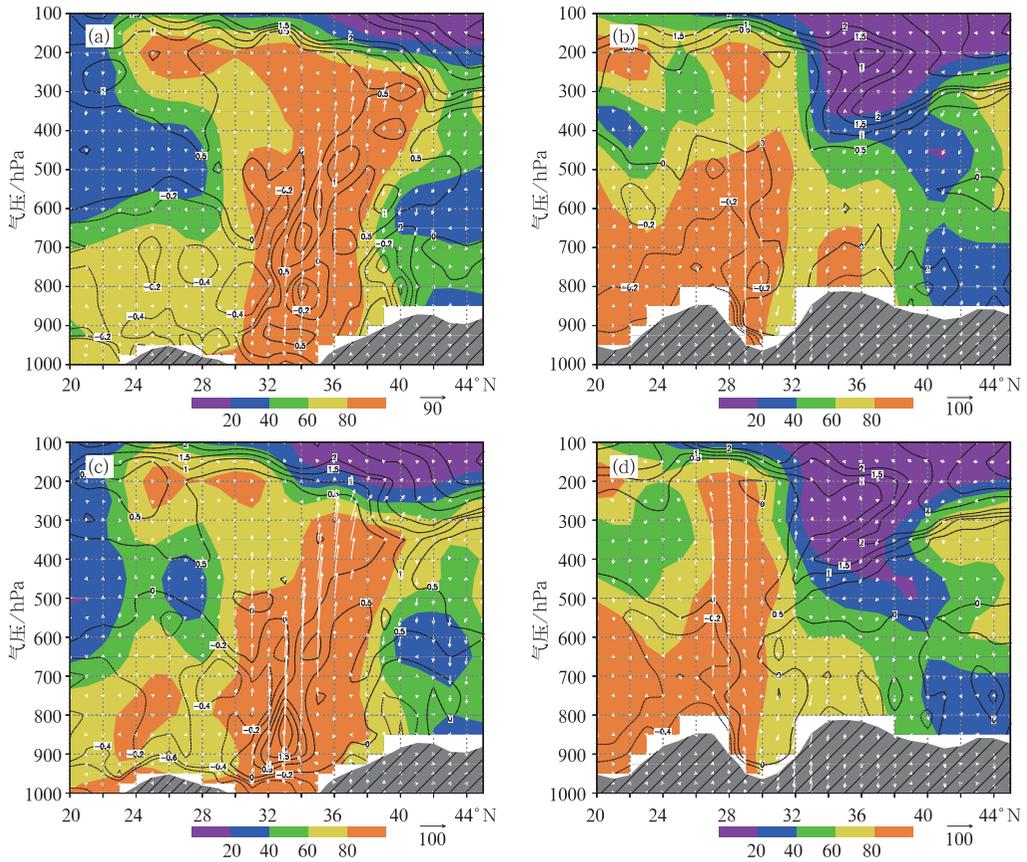


图 9 2009 年 8 月 29 日 02 时、08 时湿位涡垂直分量(等值线)及相对湿度(阴影区)沿 113°~115°E 平均(a,b)和 103°~106°E 平均(c,d)的纬度-高度剖面及经向垂直环流(箭头)(斜线阴影为地形)  
 Fig. 9 Latitude-height cross sections of vertical component of moist potential vorticity ( $MPV_1$ , contour) and relative humidity (shaded area) and meridional vertical circulation (arrow) averaged over (a) 113°-115°E at 02:00 BT, (b) 113°-115°E at 08:00 BT, (c) 103°-106°E at 02:00 BT, and (d) 103°-106°E at 08:00 BT 29 August 2009

### 4 结 论

综合以上分析,可以得到以下结论:2009 年 8 月 29 日在黄淮和西南地区东部出现的暴雨分别属于锋面附近或锋后稳定性降水和锋前暖区中对流性强降水性质。两类不同性质的暴雨其垂直结构特征具有明显的异同。

- (1) 与稳定性降水对应,大气具有冷锋锋区的斜压结构,锋生函数自南向北倾斜,暖湿气流沿锋面爬升,对应倾斜的上升气流;与对流性降水对应,大气具有典型的上冷下暖的对流不稳定垂直结构,低层暖湿气流是受冷空气的强迫抬升,对应垂直的上升气流。
- (2) 稳定性降水区正涡度(负散度)区集中在较低层次,但中心值较大,低层辐合作用较强,湿层较

厚;对流性降水区正涡度(负散度)区能达到较高层次,但中心值偏小,高层辐散作用明显较低层辐合偏强,饱和湿层集中在对流层中层。

(3) 稳定性降水区高层西南风急流和低层西南风、偏东风急流耦合构成了垂直经向环流,但经向环流倾斜上升运动强而下沉运动很弱,环流较宽,属于大尺度稳定降水环流特征;对流性降水区高层与南亚高压对应,高层辐散抽吸作用较大,西南涡东南侧和西北侧上升下沉气流几乎相当,垂直环流狭窄,具有中尺度对流降水环流特征。

(4) 稳定性降水区对应高层有大湿位涡舌向下伸展,但没有明显的干冷空气伴随,高空冷槽东移诱发低层低涡发展,对应低层有高湿位涡区与强降水对应;对流性降水区对应高层有湿位涡舌向下伸展并同时伴有明显的干冷空气侵入,低层对应有弱的湿对称不稳定,干冷空气侵入正好触发湿对称不稳定能量释放,为锋面强迫出强盛狭窄的上升气流提供必要的不稳定结构,从而产生强降水。

本研究给出的稳定性降水和对流性降水具有的不同垂直结构特征,可以为降水性质和短历时降水强度预报提供参考依据。

## 参考文献

- [1] 陶诗言,卫捷,张小玲. 2007年梅雨锋降水的大尺度特征分析[J]. 气象,2008,34(4):3-15.
- [2] 顾清源,肖递祥,黄楚惠,等. 低空急流在副高西北侧连续性暴雨中的触发作用[J]. 气象,2009,35(4):59-67.
- [3] 彭贵康,卢萍,李昀英. 雅安“8.26”特大暴雨的天气分析[J]. 高原山地气象研究,2008,28(3):27-36.
- [4] 屠妮妮,段玮. 2006年9月4-5日四川暴雨过程分析[J]. 气象,2008,34(7):51-60.
- [5] 陶诗言,等. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社,1980.
- [6] 顾清源,周春花,青泉,等. 一次西南低涡特大暴雨过程的中尺度特征分析[J]. 气象,2008,34(4):39-47.
- [7] 尹洁,吴静,曹晓岗,等. 一次冷锋南侧对流性暴雨诊断分析[J]. 气象,2009,35(11):40-47.
- [8] 寿绍文. 位涡理论及其应用[J]. 气象,2010,36(3):9-18.
- [9] 吴海英,寿绍文. 位涡扰动与气旋的发展[J]. 南京气象学院学报,2002,25(4):510-517.
- [10] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报,1995,53(4):387-405.
- [11] 刘还珠,张绍晴. 湿位涡与锋面强降水天气的三维结构[J]. 应用气象学报,1996,7(3):275-284.
- [12] 高守亭,雷霆,周玉淑. 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.
- [13] 黄亿,寿绍文,傅灵艳. 对一次台风暴雨的位涡与湿位涡诊断分析[J]. 气象,2009,35(1):65-73.
- [14] 阎凤霞,寿绍文,张艳玲,等. 一次江淮暴雨过程中干侵入的诊断分析[J]. 南京气象学院学报,2005,(1):117-124.
- [15] 姚秀萍,吴国雄,赵兵科,等. 与梅雨锋上低涡相伴的干侵入研究[J]. 中国科学 D 辑,2007,37(3):417-428.
- [16] 张滨,周林,关皓. 1998年夏季江淮地区强暴雨过程的湿位涡诊断分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2005,6(4):399-403.
- [17] 桂海林,周兵,金荣花. 2007年淮河流域暴雨期间大气环流特征分析[J]. 气象,2010,36(8):8-18.
- [18] 尤红,肖子牛,王曼,等. 2008年“7.02”滇中大暴雨的成因诊断与数值模拟[J]. 气象,2010,36(1):7-16.