

梅雨锋结构的数值模拟^{*1}

陈丽芳¹ 高 坤²

1 杭州市气象局, 杭州, 310008

2 浙江大学地球科学系, 杭州, 310027

摘 要

利用 1999 年 6 月下旬持续性梅雨锋降水过程的全程四维同化模拟结果, 深入分析梅雨锋结构的时空不均匀变化特征及其与低涡降水强度的密切关系。结果表明, 梅雨锋呈现明显的中层锋和边界层锋两段锋的特征, 中层梅雨锋区对降水的影响比边界层锋更为关键, 中层锋的加强、锋坡增大趋于垂直、锋区垂直环流的加强与高空急流锋区的上下贯通, 有利于梅雨锋降水的加强, 强降水并不出现于中层锋区最强的时段, 而是发生于大范围锋区强度达峰值之后约 16—24 h。中低层总变形加强与梅雨锋的加强有密切关系。组成低空急流的中低层 u, v 分量呈现不同的分布和演变特征, 强南风中心位于 900—800 hPa, 呈明显的低空急流状特征, 贴近暴雨区还可能出较小尺度的急流; 而强西风中心出现于中层锋前 700—500 hPa, 表现为高空强西风区沿锋区上界的向下延伸; 低空南风急流通常与总变形同时加强。强锋段的锋前饱和和高湿高能气柱、锋前中低层急流状南风区和中层西风均匀大值区等要素场呈现高度组织化的特征。梅雨锋的低层特性, 如辐合、锋区强度、总变形和南风分量及降水强度等要素呈现显著的中尺度扰动特征, 有明显的日变化且受长江中下游中尺度地形影响, 扰动特征有随时间上传的趋势。

关键词: 梅雨锋结构, 中层锋区, 边界层锋区。

1 引 言

梅雨锋是导致长江中下游梅汛期降水的最为稳定持续的天气尺度系统, 长期来, 很多研究者对梅雨锋的结构作过详细讨论研究, 主要采用常规观测资料对梅雨锋进行诊断分析, 并籍此初步建立起梅雨锋结构的概念模型^[1-4]。但由于常规资料较低的时空分辨率, 使人们对于梅雨锋结构的认识主要局限于大尺度特征, 在时空尺度上具有明显的局限性。高分辨中尺度数值模式的发展, 使人们有可能通过数值模拟来揭示梅雨锋多时空尺度的结构特征及其变化。模拟研究发现梅雨锋主要表现为强烈的湿度对比, 降水区在锋区的南面^[5]。梅雨期的降水引起了高 θ_{se} 带及其南北高 θ_{se} 梯度区, 其北侧高 θ_{se} 梯度区大致相当于梅雨锋^[6]。

梅雨锋独特的结构特征^[7]及其时空不均匀性变

化, 直接影响到梅雨锋降水的强度和分布; 梅雨雨带沿梅雨锋伸展, 梅雨锋雨带内降水分布高度不均匀, 存在多个 α 和 β 中尺度的暴雨雨团^[8], 又与沿梅雨锋的中尺度涡旋扰动有密切关系^[9], 因此在对梅汛期降水的形成机理和预测理论的研究中, 有必要重视梅雨锋结构的中尺度特征及其时空变化的研究。

本文试图利用 1999 年 6 月下旬一次梅雨锋持续性降水过程的全程四维同化模拟产生的较高时空分辨率的结果, 深入分析梅雨锋结构的时空不均匀变化特征, 及其与低涡降水强度的密切关系。

2 模式和资料简介

1999 年 6 月 22 日开始在长江中下游地区发生持续近 10 d 的连续性暴雨, 强降水带自湘鄂交界处经大别山直指长江口, 113°E 以东的长江中下游地区 6 月下旬总雨量达 300—700 mm, 为常年同期的

* 初稿时间: 2005 年 5 月 31 日; 修改稿时间: 2005 年 11 月 24 日。

资助课题: 973 国家重点基础研究发展规划项目(G1998040907), 国家自然科学基金资助项目(40075009), 杭州市科技发展计划项目(200214 B03)。

作者简介: 陈丽芳, 女, 1978 年生, 浙江上虞人。硕士, 现从事中尺度数值模拟和短期预报。

3—4 倍,每天均出现日雨量大于 100 mm 的特大暴雨。这次过程中长江中下游梅雨锋自始至终稳定维持,其上有多个低涡扰动活动,二者分别与稳定的雨带和强降水中心对应,与连续暴雨的形成和维持关系十分密切。该过程的稳定性和连续性为梅雨锋结构特征及其变化的模拟研究提供了一个很好的个例。

以 1999 年 6 月 22 日 00 时(世界时,下同)为初始场,采用 NCAR/PSU 联合研制的 MM5 中尺度模式^[10],对这次连续暴雨进行直至 6 月 30 日 12 时的长达 204 h 的两重网格双向嵌套模拟,水平格距分别为 90 和 30 km,计算范围分别为 67×73 和 91×85 格点,垂直 23 层。对于次网格尺度对流降水采用 Grell 方案,通过包含上升、下沉通量和环境补偿运动的简单云模式来确定加热增湿廓线;对于非对流层状降水采用 Duhdia 简单冰方案,即在暖雨方案的云水、雨水预报方程中加入简单冰相过程;对行星边界层采用 Blackadar 的高分辨参数化方案。为了获得长时间较为逼真的连续模拟结果,在模式积分过程中进行了 204 h 的连续四维同化,利用 12 h 间隔的高空观测、3 h 间隔的地面观测和以 TOGA 分析场为猜值的客观分析场,分别对粗、细网格进行分析场同化和测站观测同化,该试验产生了相当逼真的动力协调的时空高分辨分析结果。过程总降水的模拟和实况分布的对照表明^[11-12],在长江中下游模拟出 200 mm 以上的强降雨带,并在大别山和黄山地区分别模拟出 705 和 657 mm 的两个中心,与实况相比,对于梅雨锋雨带的位置和主要暴雨中心的模拟是比较逼真的,降水的成功模拟使我们有可能进一步利用模拟结果对主要降水系统——梅雨锋进行深入分析。

3 梅雨锋基本特征的模拟

为了揭示梅雨锋总体结构的基本特征,利用以上连续同化积分得到的结果(模式每隔 4 h 输出)进行全过程时间平均,首先以等压面场的时间平均图对梅雨锋水平结构基本特征进行分析,并基于梅雨锋呈准东西走向的事实,采用垂直于锋面的纬向平均剖面的时间平均图来分析梅雨锋垂直结构基本特征。分析要素包括模式输出的常规温、湿、风、垂直速度、云雨水和常规诊断的位温、相当位温、涡度、散度、对流不稳定性等。由于梅雨锋在对流层中低层

主要表现为湿度对比而不是温度对比,在时空平均图上梅雨锋的这一特征就更为明显,因而本文中以相当位温的密集带确定梅雨锋的湿斜压锋区位置,并以其南北向梯度表示湿斜压锋区强度,同时以位温的南北向梯度表示温度锋区强度。

3.1 梅雨锋水平结构特征的模拟

图 1 给出 1000,900,850 和 700 hPa 4 层等压面的相当位温场(实线)、温度场(细实线)和流场(风旗)的时间平均图,阴影区为湿斜压锋区强度大于 $4\text{K}/(100\text{ km}^2)$ 的区域,显然在各层上存在准东西向的以相当位温密集带为主要特征的梅雨锋系,锋区宽度在近地面最窄,约 100 km,向上渐变宽,700 hPa 锋区宽度达 200—300 km。锋面坡度在不同的锋段有明显不同,自西向东锋坡逐渐变陡,锋面西段坡度较小,约为 $1/70$,而东段约为 $1/20$ — $1/30$, 116° — 120°E 的锋坡最陡处恰为强降水区所在。在温度场上,温度密集带仅存在于近地面层,温度梯度为 2 — $3\text{K}/(100\text{ km}^2)$,而 900 hPa 以上梅雨锋区的温度梯度迅速减小,低于 $1\text{K}/(100\text{ km}^2)$,这表明除边界层外的对流层中低层的梅雨锋区斜压性很弱。在流场上,梅雨锋北侧为大范围偏东气流,在低层锋后东南风与东北风交替出现,相应的锋面也呈扰动形式;而梅雨锋南侧为大范围南至西南气流,在低层为南风气流,随高度明显顺转为西南气流,在这股气流中,900 hPa 边界层以上出现低空急流;急流轴左侧为暖湿高能舌所在,自西南地区伸向长江中下游,体现了锋前中低层暖湿气流的输送,强梅雨降水(图 1d 中粗虚线)正位于低空急流与梅雨锋相交处及其左侧,同时锋面北侧的干冷低能空气则主要由黄海地区西伸,另有一股较弱的干冷空气则由河套南部向东南方向伸至长江中游地区。

图 2 给出中低层湿度、涡度、散度、稳定性和高层流场的时间平均图。850 hPa 湿度和流场图上(图 2a),梅雨锋区及其南侧为高湿饱和区,由西南地区伸向长江下游,呈明显带状,该高湿带在西南地区较宽广,而伸至长江中下游强降水区时迅速变窄,也正是水汽输送辐合最强地区,反映水汽在强降水区的高度集中。高层 200 hPa 流场上(图 2b),梅雨锋及其雨带位于自河套伸向黄海的准东西向高空西风急流南侧,同时在东伸的青藏高原东侧存在一支偏北大风轴,强降水区正处于高空急流和低空急流

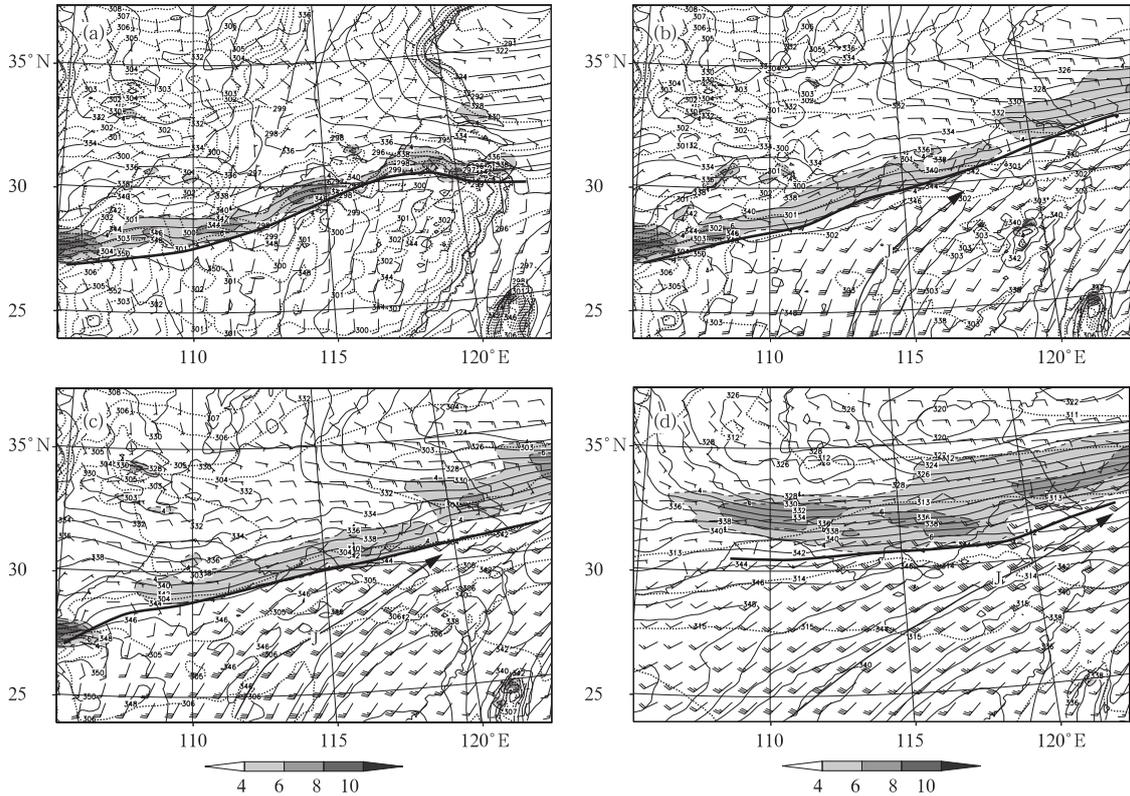


图1 1999年6月22日00时至6月30日12时(世界时,下同)中低层相当位温场(实线,K)、温度场(虚线,K)和流场(风旗)模拟结果的时间平均

(a. 1000 hPa, b. 900 hPa, c. 850 hPa, d. 700 hPa; 阴影区为相当位温南北向梯度大于 $4 \text{ K}/(100 \text{ km}^2)$ 的区域, 粗实线标志梅雨锋区的上界, 粗箭矢标志低空急流, 字母“J”为低空急流中心所在; 图(d)中粗虚线为过程总雨量 200, 400 mm 等值线)

Fig. 1 The average fields of potential equivalent temperature (solid lines, K), temperature (thin solid lines, K) and streamline (barbs) during 00UTC 22 June to 12UTC 30 June 1999

(a. 1000 hPa, b. 900 hPa, c. 850 hPa, d. 700 hPa; shade areas depict the places where the values of the south-north cross section of potential equivalent temperature are grater than $4 \text{ K}/(100 \text{ km}^2)$, thick line depict the north limit of meiyou front, thick arrows depict low-level jet, “J” depicts the center of low-level jet, the thick dashed lines in Fig. 1d depict the isoline of 200, 400 mm)

在下游趋于汇合和高空偏北大风轴与低空急流相交并散开之处附近, 这儿也正是高空强辐散所在(图 2b 阴影区), 这表明高低空流场的恰当配置是梅雨锋及其伴随降水加强的重要条件。在 850 hPa 涡度场和 900 hPa 散度场上(图 2c), 沿梅雨锋为一平行的准东西向的正涡度带, 强正涡度区位于东段, 与强云雨带相合(图 2d 阴影区); 相比之下, 低层散度场上, 尽管在正涡度带的偏南侧总的为一辐合带, 但辐合强度极不均匀, 存在多个西南—东北走向的 β 中尺度强辐合区, 并与长江流域地形有密切关系, 自西向东分别位于武陵山、幕阜山、大别山和黄山天目山附近, 其中大别山东南侧和黄山及天目山附近的 3 小块强低层辐合区因有高空强辐合区(图 2b 的阴影区)并存, 导致产生 400 mm 以上的强降水过程。对流稳定度场($\theta_{e700} - \theta_{e900}$)上(图 2d), 梅雨锋区上界位

于近中性的对流弱稳定区, 锋后为一与锋区平行的狭窄的对流稳定度, 西段锋坡小, 故而稳定区强而宽, 而东段锋坡陡, 所以稳定区弱而窄, 在该稳定带的南北两侧分别为大范围的对流不稳定区; 同时可以看到梅雨锋区上界两侧对应强云雨带(图 2d 阴影区)。

3.2 梅雨锋垂直结构特征的模拟

由上节分析可见, 梅雨锋及其伴随雨带的强度在东西方向是不均匀的, 为了揭示梅雨锋的垂直结构, 有必要分段进行分析, 根据本次个例中东段的锋区和降水强度均明显大于西段的特点, 以 108°E 和 114°E 为界将整条锋区分为西、中、东 3 段, 分别作各段范围内纬向平均垂直剖面的全过程时间平均图, 以分析东段为主, 结合与中、西段的对比, 从而既揭示梅雨锋的基本垂直结构特征, 又探讨雨强不同

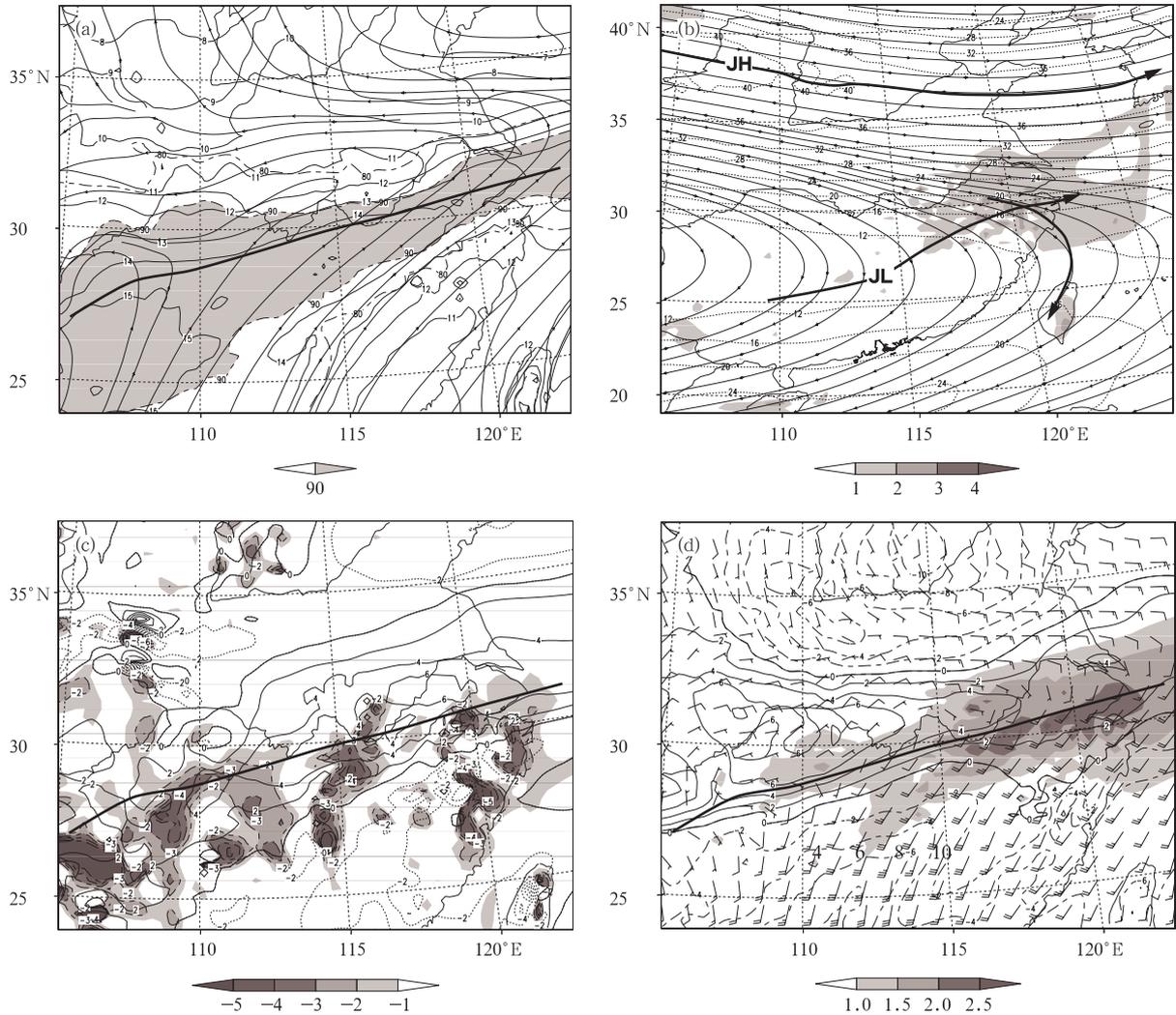


图2 1999年6月22日00时至6月30日12时模拟结果的时间平均场

(a. 850 hPa 比湿(实线, g/kg)、流线(细箭头)和相对湿度大于90%的饱和区(阴影区), b. 200 hPa 流线(细箭头)、全风速(点线, m/s)和高空辐散区(散度大于 $10^{-5} s^{-1}$, 阴影区);粗箭头分别为高空急流(JH)和低空急流(JL), 细弯箭头为青藏高压东侧的偏北大风轴, c. 850 hPa 涡度(实线, $10^{-5} s^{-1}$)和900 hPa 辐合场(散度值小于 $-10^{-5} s^{-1}$ 的阴影区), d. 对流稳定度($\theta_{e700} - \theta_{e900}$, K)、900 hPa 风旗和地面至200 hPa 云雨水质量加权积分总量(阴影区:

大于 $1 kg/m^2$);粗实线:梅雨锋区上界)

Fig 2 The average fields during 00UTC 22 June to 12UTC 30 June 1999(a. specific humidity at 850 hPa (solid lines, g/kg), streamline (thin arrows) and the zone of saturation that relative humidity great than 90% (shade areas), b. streamline at 200 hPa (thin arrows), wind (dotted lines, m/s) and divergence field at up air (shade areas depict the places where the values of divergence are great than $10^{-5} s^{-1}$), thick arrows depict up-level jet (JH) and low-level jet (JL), thin and curly arrow depict the axis of north high wind at the eastern of Tibetan Plateau, c. the value of vorticity at 850 hPa (solid lines, $10^{-5} s^{-1}$) and convergence at 900 hPa (shade areas depict the places where the values of convergence are little than $-10^{-5} s^{-1}$), d. convective stability ($\theta_{e700} - \theta_{e900}$, K), barbs at 900 hPa and the total values of weighting integration of rain water and cloud water from surface to 200 hPa (shade areas depict the places where the values are great than $1 kg/m^2$); the thick lines depict the north limit of Meiyu front)

的各段梅雨锋区垂直结构的区别。

图3为相当位温及其南北向梯度和沿剖面垂直环流的纬向平均垂直剖面的时间平均图,在梅雨锋东段(图3a),由相当位温的密集区看,锋面由地面

一直向上伸展到500 hPa以上,并与高空急流锋区趋于打通,锋坡较陡,锋区内相当位温等值线接近垂直,略向北倾,因而锋区内为弱对流稳定,该稳定区的南北两侧由于中层700—600 hPa低能区的存在,

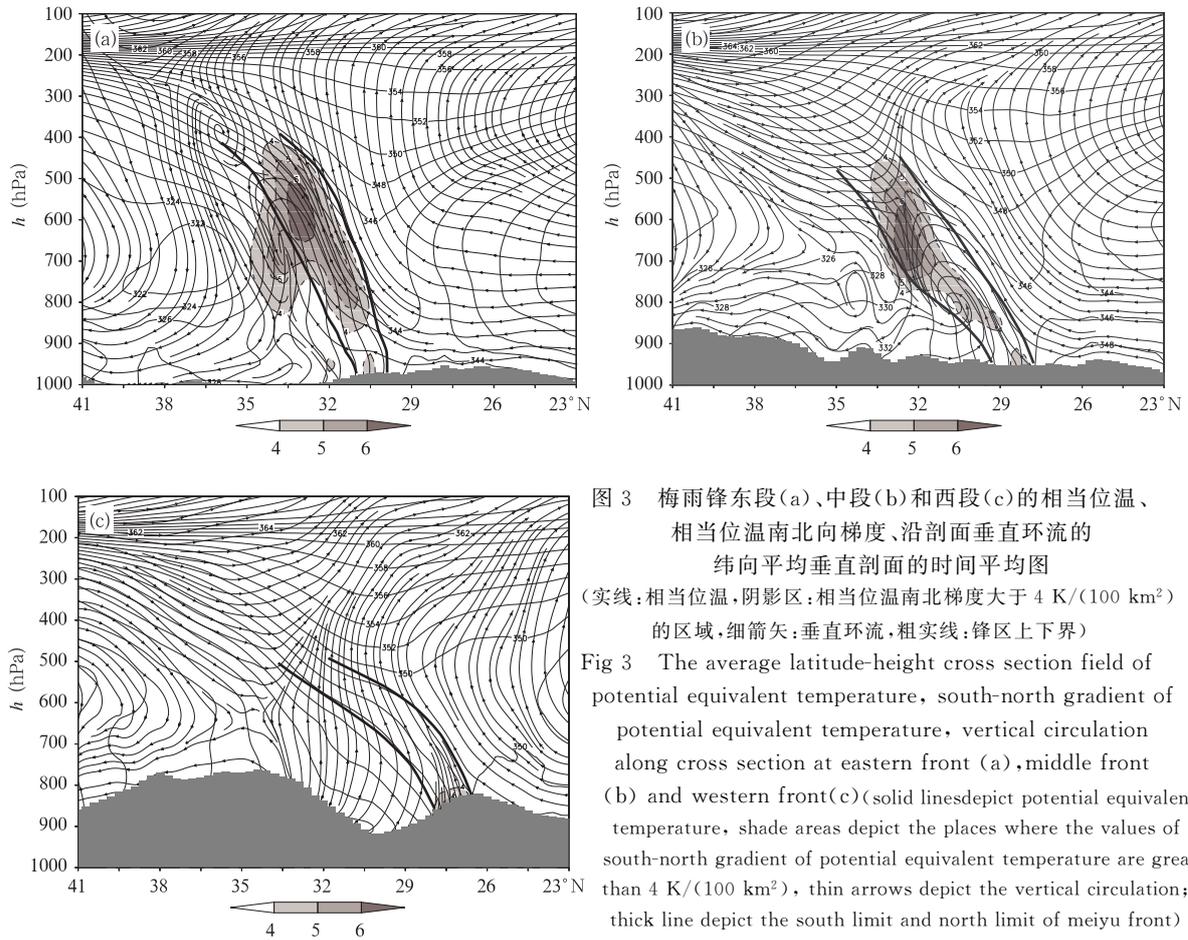


图3 梅雨锋东段(a)、中段(b)和西段(c)的相当位温、相当位温南北向梯度、沿剖面垂直环流的纬向平均垂直剖面的时间平均图(实线:相当位温,阴影区:相当位温南北梯度大于 $4\text{ K}/(100\text{ km}^2)$ 的区域,细箭头:垂直环流,粗实线:锋区上下界)

Fig 3 The average latitude-height cross section field of potential equivalent temperature, south-north gradient of potential equivalent temperature, vertical circulation along cross section at eastern front (a), middle front (b) and western front(c)(solid lines depict potential equivalent temperature, shade areas depict the places where the values of south-north gradient of potential equivalent temperature are great than $4\text{ K}/(100\text{ km}^2)$, thin arrows depict the vertical circulation; thick line depict the south limit and north limit of meiuyu front)

形成中低层对流不稳定区,而锋面紧南侧的强上升区中,高低层的高值相当位温空气垂直方向趋于打通,形成近中性层结;从锋区强度看,最强区位于800—500 hPa的对流层中层,同时在边界层内存在一个浅薄的次强区(图3a中阴影区),两者之间在800—900 hPa锋区相对较弱,呈现出明显的中层和边界层两段锋的特征;最强的中层锋区伴随一个最明显的锋区次级环流,锋前和锋区内为近乎平行锋区的强上升气流,锋后为宽广一致的下沉气流,该锋区次级环流的上升下沉支与400 hPa以上的高空急流锋区的垂直环流相衔接,形成锋区前后高度组织化的深厚一致的强上升下沉气流。在锋区中西段(图3b,c),中层锋坡减小,向北倾斜趋于明显,锋区北侧的对流稳定区变宽;锋区的垂直范围减小,特别是西段的中层锋区大为减弱,与高层的高空急流锋区脱离,但边界层锋强度却与东段差别不大;中层锋区的垂直环流减弱,在西段垂直环流消失,锋前锋后均为弱上升,锋后中低层下沉消失,这意味着中层锋

区的强度、坡度和与高空急流锋的相联对降水强度是起关键作用的。

图4为位温、位温扰动、西风分量和位温南北梯度的纬向平均剖面的时间平均图,在东段(图4a)边界层内存在一个弱冷丘,其前为水平方向位温相对密集区,表明边界层锋锋后弱冷空气的存在和对低层锋面的贡献,而中层梅雨锋的锋后则没有明显冷空气存在,温度梯度弱,对锋区贡献很小;而在高层400—200 hPa存在与高空急流锋相联系的明显的位温水平梯度,北冷南暖,这一强温度梯度的上方恰为副热带高空西风急流所在,该西风带向南沿中层梅雨锋区的上界向下伸展,在锋前中层500—700 hPa呈现西风的均匀大值区,锋区内西风等风速线基本与锋面平行,同时梅雨锋北侧600 hPa以下为东风区,使梅雨锋区内西风的垂直切变很小,而水平切变很大,与高空急流锋内的西风强垂直切变和弱水平切变,形成鲜明对比;相比之下,在梅雨锋的中西段(图4b,c)低层冷丘和位温锋区同样存在,且西

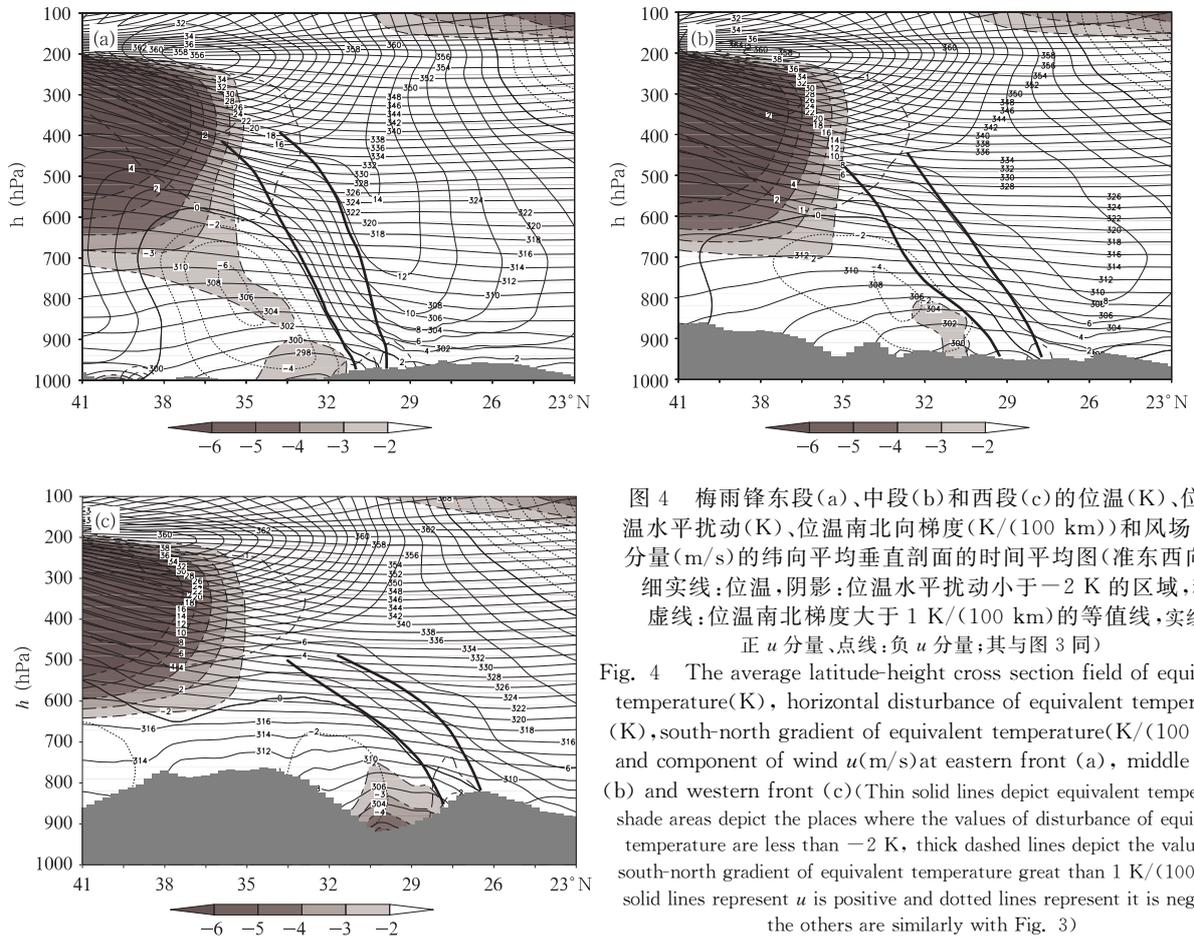


图4 梅雨锋东段(a)、中段(b)和西段(c)的位温(K)、位温水平扰动(K)、位温南北向梯度(K/(100 km))和风场 u 分量(m/s)的纬向平均垂直剖面的时间平均图(准东西向:细实线:位温,阴影:位温水平扰动小于-2 K的区域,粗虚线:位温南北梯度大于1 K/(100 km)的等值线,实线:正 u 分量,点线:负 u 分量;其与图3同)

Fig. 4 The average latitude-height cross section field of equivalent temperature(K), horizontal disturbance of equivalent temperature(K), south-north gradient of equivalent temperature(K/(100 km)) and component of wind u (m/s) at eastern front (a), middle front (b) and western front (c) (Thin solid lines depict equivalent temperature, shade areas depict the places where the values of disturbance of equivalent temperature are less than -2 K, thick dashed lines depict the values of south-north gradient of equivalent temperature great than 1 K/(100 km), solid lines represent u is positive and dotted lines represent it is negative; the others are similarly with Fig. 3)

段尤为明显,高空急流锋的特征也与东段相近,区别最大的是中层,高空西风的向下向南延伸虽仍存在,但伸展坡度亦随中层锋区坡度的减小而减小,锋前中层西风减弱,锋后中低层的东风强度亦减弱,导致锋区东西风水平切变的减弱。

比湿及其南北向梯度和南风分量的垂直剖面(图略)表明,在梅雨锋区的上界及其南侧存在沿锋面垂直向上伸展的高湿气柱,东段比中西段更为集中突出,西段锋前的高湿区显得平宽;在东段和中段锋区的中低层存在较强的湿度梯度,最大湿度梯度位于对流层中层,低层也存在一定的湿度对比,西段各层湿度对比均大为减弱,导致梅雨锋区的减弱,说明干湿对比是中层梅雨锋的主要标志;梅雨锋前中低层400 hPa以下为较深厚的南风区,其中900—800 hPa存在南风高值区,具有明显的急流状特征,即使在平均图上也可看出有两个南风中心的迹象,其中一个离锋区较近,仅200 km左右,考虑到 u 分量是在500—700 hPa表现为大值西风的均值区,可

以认为 v 分量是800 hPa以下低空急流的主要组成部分,锋区内 v 分量等值线与 u 分量一样近乎垂直,亦存在强水平梯度和弱垂直梯度,锋后中低层 v 分量小,甚至出现弱北风,与锋前垂直较深厚的南风构成中低层深厚的辐合层,这对锋区垂直环流的加强十分重要,中段 v 分量低空急流甚至比东段强,考虑到梅雨锋前低空急流位于西南方,这一分布是合理的;高层为北风区,自北向南北风加大,梅雨锋正位于高层偏北大风轴的入口区,而中西段锋区的高空北风较东段为弱。

在涡度和相对湿度的垂直剖面上(图5),梅雨锋区内400 hPa以下为深厚的垂直正涡度气柱,其上方为负涡度区,在中低层的正涡度柱中有两个中心分别与中层梅雨锋和边界层梅雨锋对应,主要正涡度区位于800—600 hPa中层锋区内,强中心在700 hPa处,在900 hPa附近另有一次大正涡度中心,位于边界层锋区上部;中层涡度柱的强度与梅雨锋强度密切相关,东段梅雨锋的中层正涡度最强,中

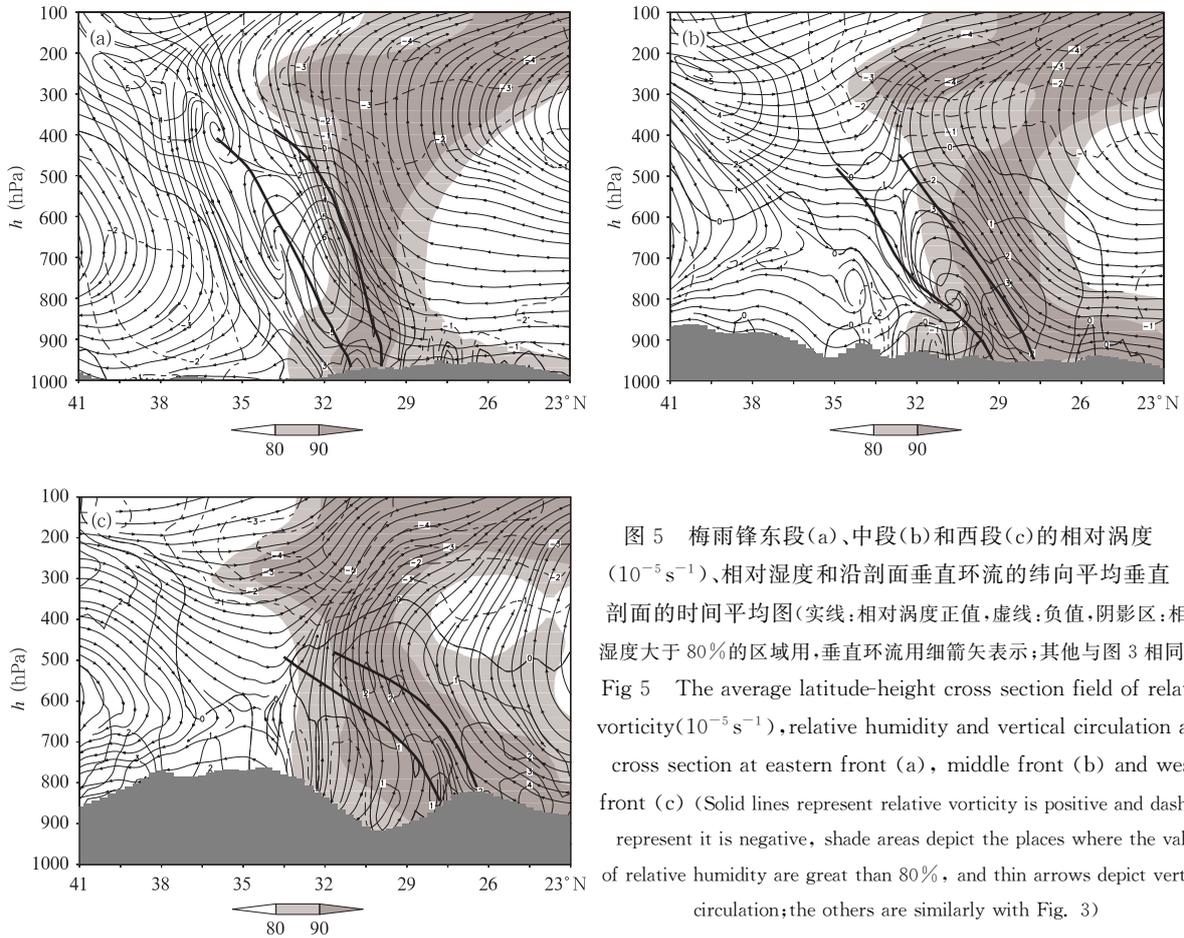


图5 梅雨锋东段(a)、中段(b)和西段(c)的相对涡度(10^{-5} s^{-1})、相对湿度和沿剖面垂直环流的纬向平均垂直剖面的时间平均图(实线:相对涡度正值,虚线:负值,阴影区:相对湿度大于80%的区域用,垂直环流用细箭头表示;其他与图3相同)

Fig 5 The average latitude-height cross section field of relative vorticity(10^{-5} s^{-1}), relative humidity and vertical circulation along cross section at eastern front (a), middle front (b) and western front (c) (Solid lines represent relative vorticity is positive and dashed lines represent it is negative, shade areas depict the places where the values of relative humidity are great than 80%, and thin arrows depict vertical circulation;the others are similarly with Fig. 3)

段次之,西段中层梅雨锋最弱,中层正涡度也弱;在250 hPa附近的高空急流附近另有一正涡度区,在东段该高空急流正涡度区与梅雨锋正涡度柱趋于贯通,而在西段两者则完全分离。图上深阴影区为相对湿度超过90%的地区,表明梅雨锋区上空为垂直深厚的饱和区,在东段锋区,该饱和气柱最为集中,南北宽度仅150—200 km,与垂直环流的配置表明,高湿饱和空气来自锋区南侧的低层,低层饱和湿空气一直到靠近锋区时才突然上升,形成深厚高湿饱和气柱,到高层后向南流出,而在西段锋面,饱和气柱扩散,南北范围大,大量饱和空气从中低层向锋区靠近,并沿锋区向北倾斜上升。

图6是散度、云雨水和风廓线垂直剖面,锋区及其南侧为低层辐合,高层辐散,在东段锋区,低层辐合强而集中,在边界层内和中层800—700 hPa分别有辐合中心,低层锋面南侧较小尺度的强辐散辐合相间出现,无辐散层在中层锋区上空呈向下突出的漏斗状,相应的高空辐散亦在梅雨锋区上空明显向

下伸展,直至500 hPa;而中西段锋区的低层辐合区虽也较强,但区域较为宽广,同时高空辐散较弱,且不在锋区上空与低层辐合相合。东段锋区南侧有明显的西南风低空急流存在,强西南风区垂直深厚,南北较宽广,中段锋前的西南风低空急流减弱,而西段低空急流则消失。梅雨锋上空有明显的云雨柱(图6阴影区),在中层锋区上空亦呈漏斗状向上伸展,到高层后逐渐向南北两侧扩展开来,在锋区中西段,该漏斗状云雨区减弱,云雨水高值区主要位于高层,在锋区上空不出现明显的向下延伸。

4 梅雨锋结构时空不均匀性的模拟

观测和分析均表明,梅雨锋并不是一个均匀的带状系统,其不均匀性与梅雨锋及附近的天气尺度系统和梅雨锋上的中尺度对流系统的发展密切相关,发展成熟的梅雨锋一定伴有强的中尺度对流系统,梅雨锋上的中尺度对流系统是以梅雨锋为依托而发展形成的,它又是影响梅雨锋结构不均匀变化

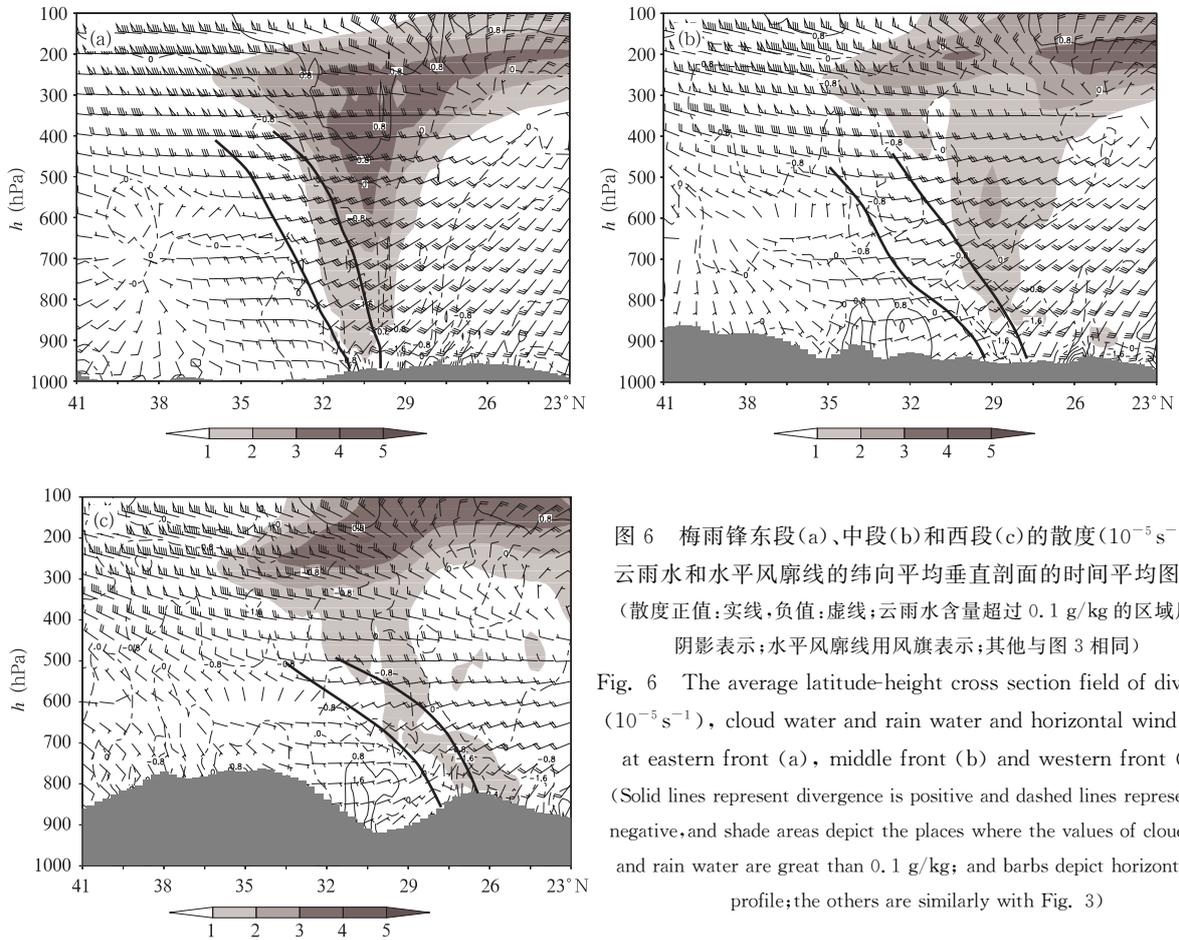


图6 梅雨锋东段(a)、中段(b)和西段(c)的散度(10^{-5} s^{-1})、云雨水和水平风廓线的纬向平均垂直剖面的时间平均图(散度正值:实线,负值:虚线;云雨水含量超过 0.1 g/kg 的区域用阴影表示;水平风廓线用风旗表示;其他与图3相同)

Fig. 6 The average latitude-height cross section field of divergence (10^{-5} s^{-1}), cloud water and rain water and horizontal wind profile at eastern front (a), middle front (b) and western front (c) (Solid lines represent divergence is positive and dashed lines represent it is negative, and shade areas depict the places where the values of cloud water and rain water are great than 0.1 g/kg ; and bars depict horizontal wind profile; the others are similarly with Fig. 3)

的重要因素,两者之间是相互作用、相互影响的。

4.1 梅雨锋上涡旋扰动的活动

图7是梅雨锋东段850 hPa相当位温、南风 v 分量和风旗的南北向时间剖面,以相当位温密集带为特征的梅雨锋带随时间呈现明显的南北波动,锋带与风场的切变线(粗实线)相伴,沿锋面切变有5个低压环流中心(D),其中3个发展完整的闭合低压环流对应锋面出现3次明显北突的波峰,分别出现在6月22,27,30日,这3个低涡是东移性 α -中尺度西南涡,其来临前锋面北抬,移过后锋面南压,另外两个低压是局地性低涡,强度较弱,基本不引起锋面的南北摆动。锋前南风大值区强度和南北位移明显的脉动式变化,表明季风涌的存在,6次南风加强多与梅雨锋扰动相随,降水也随之加强(图7b),其中3次强南风的明显北进则与西南涡东移引起的梅雨锋波峰对应出现;南风低空急流的强度变化呈现明显的日变化特征,最强时刻均出现在后半夜至清晨。

在850 hPa相当位温时间平均场与各次低涡扰

动路径的合成图上(图8),可以看到梅雨锋低涡扰动有明显的沿锋面移动传播的特征,其中仅第一次低涡(空心圈点)的路径穿越锋区较明显,系由于该低涡处于梅雨锋开始形成的阶段,这次连续稳定的梅雨锋过程是在该低涡东移后形成的。同时低涡扰动活动的频发区正位于长江中下游的梅雨锋东段,导致东段梅雨锋及其降水最强,反映涡旋扰动对于梅雨锋强度不均匀变化的重要性。

4.2 强梅雨锋段上空要素的时间变化特征

为了揭示强梅雨锋段上空结构的时间变化,图9给出 116° — 120° E东段锋区上空湿斜压锋区强度、总变形、中低层辐合、高层辐散和梅雨锋南侧风的 u 、 v 分量区域最大值的时间-高度剖面。显然与沿梅雨锋活动的涡旋扰动相对应,锋区强度、变形场、低空急流和高低层散度也都出现5—6次峰值,呈现明显的扰动形式。主要出现于850—600 hPa的中层锋区的强弱变化比900 hPa以下的低层锋区变化更为规律,而强低层锋区的出现略超前于中层锋区。有关梅雨锋结构研究表明,变形风场是梅雨锋特

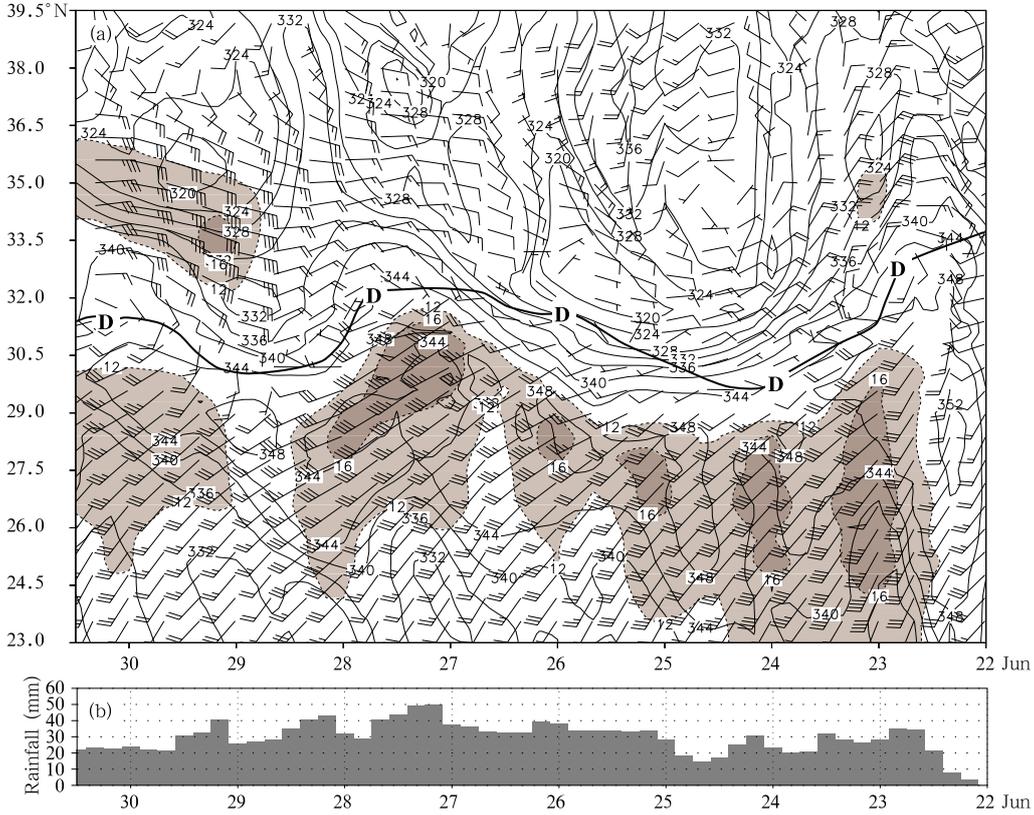


图7 梅雨锋东段116°E处,850 hPa相当位温(实线)、南风 v 分量(阴影区: v 大于 12 m/s 的区域)和水平风的南北向时间剖面(a)和降水直方图(b)(粗实线:风场切变线,字母D:气旋性环流中心)
 Fig. 7 Latitude-time cross section (a) of potential equivalent temperature at 850 hPa (solid lines), wind component v (shade areas depict the places where values of v are greater than 12 m/s), horizontal wind (barbs) along 116°E at eastern front, and histogram of rainfall (b) (the thick solid line depict shear line, D depicts the center of cyclonic circulation, is underside)

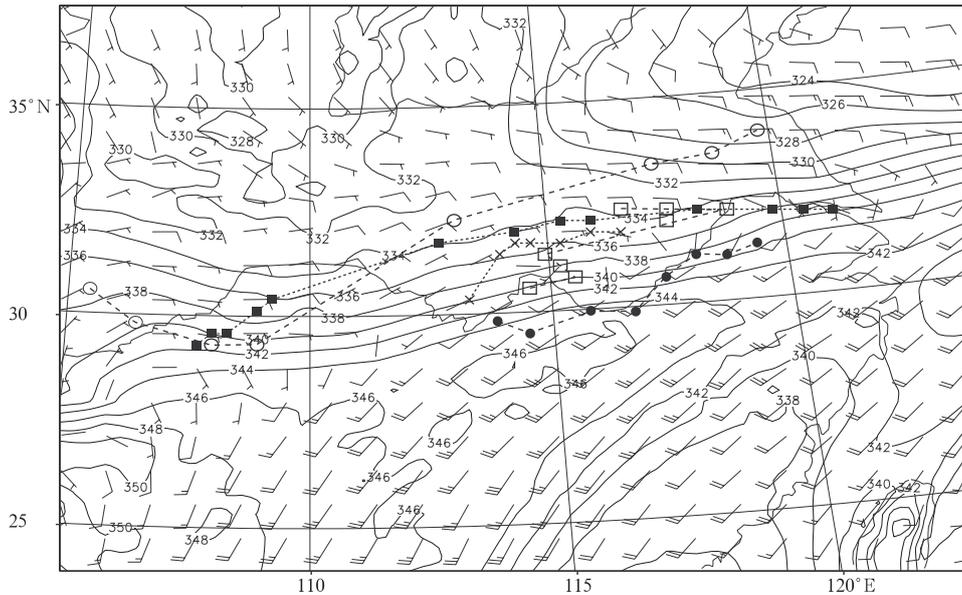


图8 850 hPa相当位温和水平风的时间平均场(实线)与各次低涡扰动路径(点线)的合成(空心圈点、实心圆点、空心方块、实心方块和叉点连线分别表示1~5号低涡路径;阴影区为地形高度大于400 m的区域)

Fig. 8 The composite image of the time average fields of potential equivalent temperature (solid lines) and horizontal wind at 850 hPa and the tracks of five vortices (dotted lines) (Hollow dots, solid dots, hollow squareness, solid squareness and furcations depict the tracks of five vortices; shade areas depict the places where relief height is higher than 400 m)

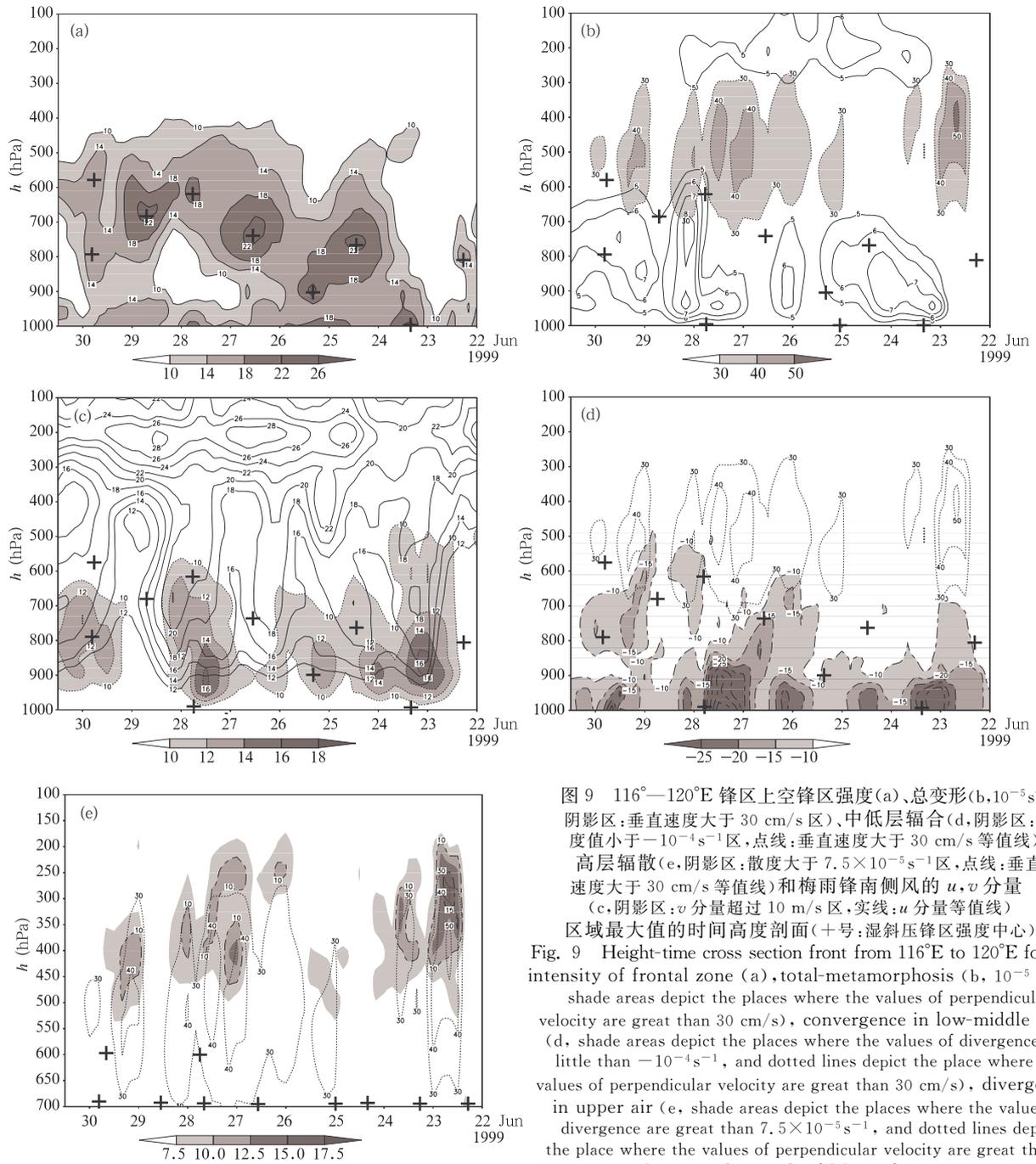


图9 116°—120°E 锋区上空锋区强度(a)、总变形(b, 10^{-5}s^{-1} ; 阴影区:垂直速度大于 30 cm/s 区)、中低层辐合(d, 阴影区:散度值小于 -10^{-4}s^{-1} 区, 点线:垂直速度大于 30 cm/s 等值线)、高层辐散(e, 阴影区:散度大于 $7.5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 区, 点线:垂直速度大于 30 cm/s 等值线)和梅雨锋南侧风的 u, v 分量(c, 阴影区: v 分量超过 10 m/s 区, 实线: u 分量等值线)区域最大值的时间高度剖面(+号:湿斜压锋区强度中心)

Fig. 9 Height-time cross section front from 116°E to 120°E for the intensity of frontal zone (a), total metamorphosis (b, 10^{-5}s^{-1} ; shade areas depict the places where the values of perpendicular velocity are great than 30 cm/s), convergence in low-middle level (d, shade areas depict the places where the values of divergence are little than -10^{-4}s^{-1} , and dotted lines depict the place where the values of perpendicular velocity are great than 30 cm/s), divergence in upper air (e, shade areas depict the places where the values of divergence are great than $7.5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, and dotted lines depict the place where the values of perpendicular velocity are great than 30 cm/s) and u, v at the south of Meiyu front (+ depict the intensity center of wet baroclinic front)

有的基本风场结构特征^[13]。与涡度场的变化相比(图略),总变形的变化特点与梅雨锋区强度的关系更为密切,它和锋的维持有直接关系(图9b)。总变形的高值区主要出现在 950—600 hPa,在中层锋区内表现得更为明显。总变形的加强往往先出现于 900 hPa 以下的低层,随后向中层发展延伸,强总变形的出现超前梅雨锋区的加强约 4—12 h。由于锋

生函数中的变形项是一个主要项,总变形的加强与锋生关系密切。在梅雨锋南侧的风场上,几乎与总变形峰值出现的同时,南风低空急流也出现 5—6 次峰值,同样也先出现于低层 900 hPa 附近,随后 4—8 h 其 10 m/s 以上的南风大值区向上延伸至 600 hPa 附近,使南风急流趋于深厚,同时出现中层西风的加强,与高层强西风区出现上下贯通,形成梅雨锋上空中层

的均匀大值西风区。中低层辐合场主要出现 5 次峰值,最强辐合出现于边界层内,850—600 hPa 的中层辐合虽强度小于边界层辐合,但往往其峰值先于低层辐合峰值的出现,当中低层辐合同时加强时,中层

上升运动也加强(图 9d,e 中的点虚线)。高空强辐散出现在 500—200 hPa,高空深厚强辐散与强垂直上升运动的关系,比低层辐合更为密切, 10^{-4} s^{-1} 以上的强高层辐散均对应 40 cm/s 的上升运动。

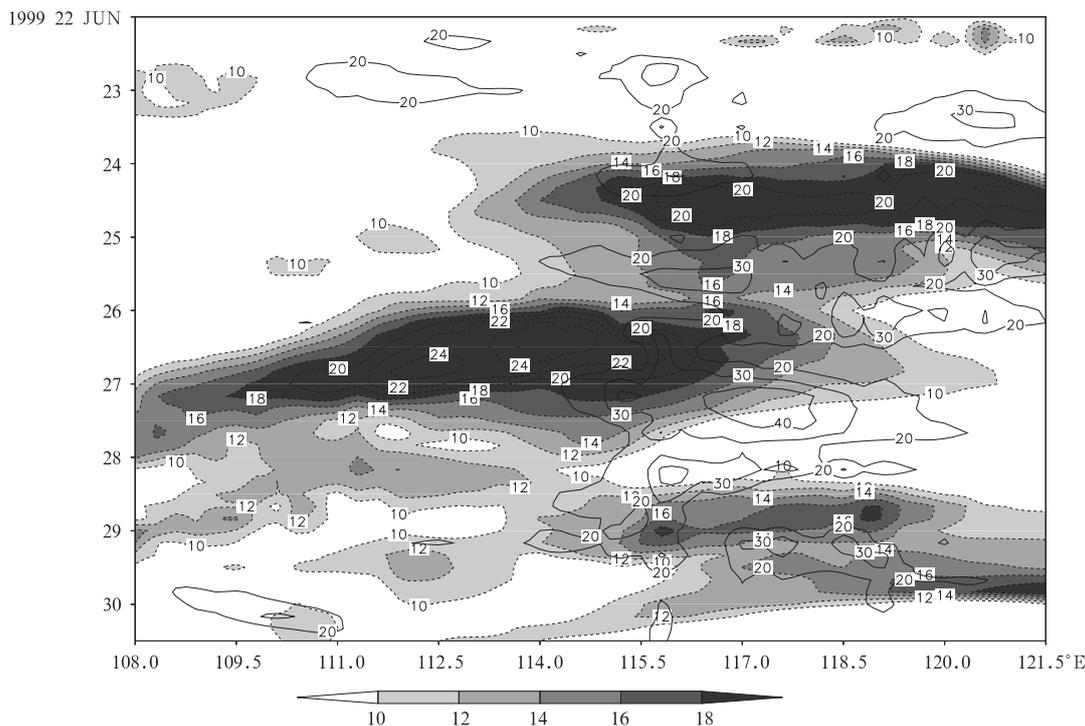


图 10 沿梅雨锋区 750 hPa 湿斜压锋区强度的经度-时间剖面

(阴影区:梯度值大于 $10 \text{ K}/(100 \text{ km}^2)$,实线:降水强度,单位: $\text{mm}/(2 \text{ h})$)

Fig. 10 Longitude-time cross section of the intensity of wet baroclinic front along meiyou front at 750 hPa

(shade areas depict the places where the values of gradient are great than $10 \text{ K}/(100 \text{ km}^2)$,

and thick lines depict the rain intensity, unit: $\text{mm}/(2 \text{ h})$)

4.3 沿梅雨锋的锋区强度和降水强度的时间变化特点

从 750 hPa 锋区强度的东西时间剖面可见,在这次梅汛期连续降水过程中,中层 750 hPa 等压面上梅雨锋出现 3 次明显的大范围加强过程,锋区强度超过 $14 \text{ K}/(100 \text{ km}^2)$ 的强锋段东西方向伸展达 700—900 km,一次强锋区维持时间约为 24—36 h,锋区加强现象呈现从最强区向东西两侧双向迅速传递并趋于减弱的特征。图中实线是 4 h 降水强度场,显然强降水并不出现于中层锋区最强的时段,而是发生于锋区强度相对较弱的时段,二者时间差约为 16—24 h。

4.4 梅雨锋特征的相互配置及与地形的关系

为了反映梅雨锋基本特征的水平配置及与长江

中下游地形的关系,给出降水总量、中低层锋区强度、中低层涡度、总变形、散度和风分量等要素沿锋区的东西向时间平均廓线(图 11)和垂直于锋区东段的南北向时间平均廓线(图 12),并给出相应方向的地形廓线(图 11a,12a)。

上述两图的综合分析表明,沿梅雨锋和梅雨锋正交方向的结构特征与长江流域地形有密切关系,模拟降水的主要峰值出现在山峰附近,特别是长江中下游地区的中尺度地形的影响尤为突出,两个强降水区分别出现在大别山幕阜山和黄山天目山附近,东西方向两地形之间也出现两个降水次峰,相比之下,在较大尺度的大巴山的背风坡则只出现一个较弱的降水峰值(图 11b,12b)。低层锋区强度也呈较明显的地形性特征,低层湿斜压锋区最强区出现

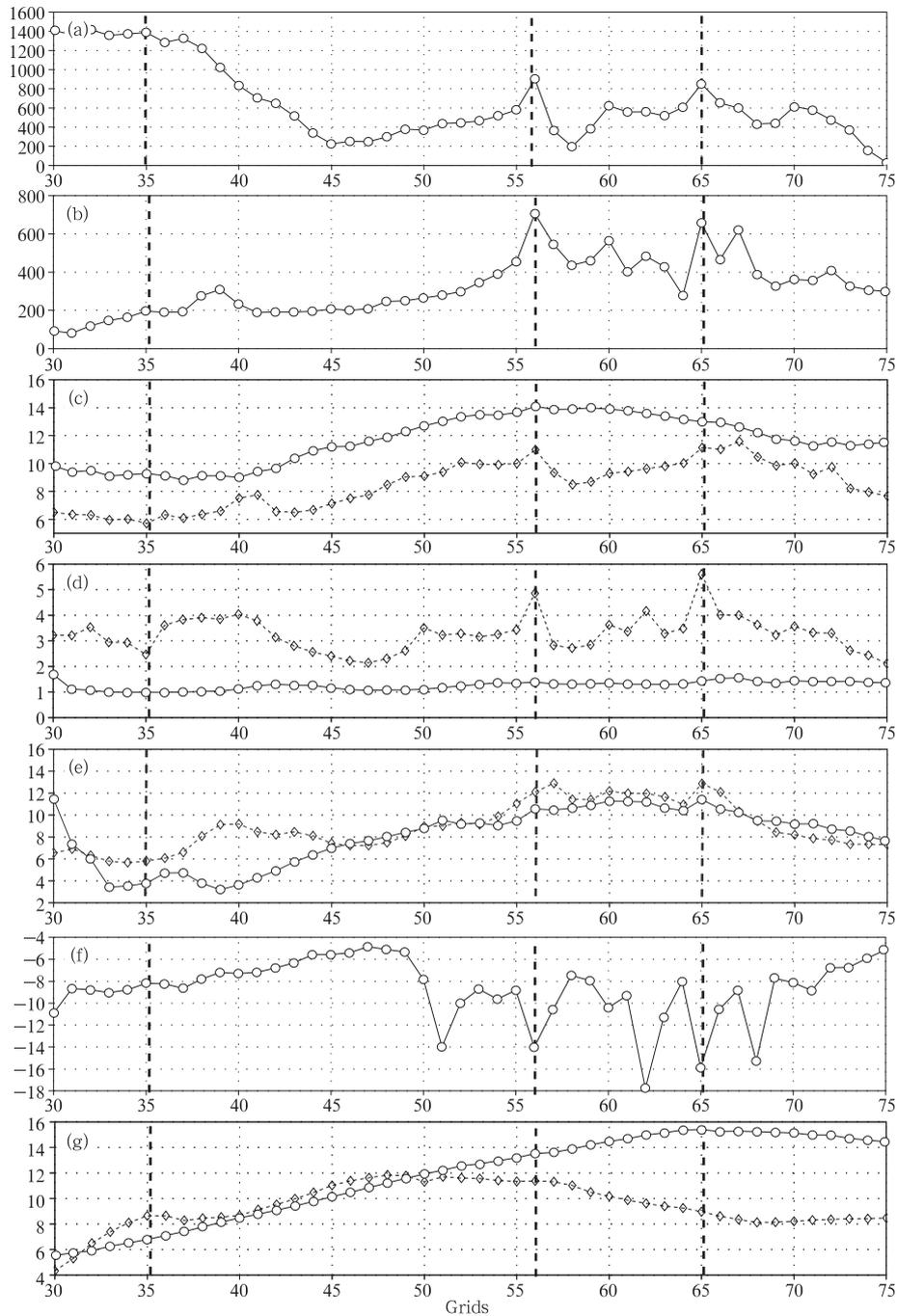


图 11 沿锋区要素的东西向时间平均廓线(a. 地形高度(m), b. 锋区附近最大总降水量(mm), c. 中低层湿斜压锋区强度(圈点:750 hPa, 菱形点:950 hPa, $K/(100 \text{ km}^2)$), d. 温度锋区强度(圈点:750 hPa, 菱形点:950 hPa, 单位: $K/(100^2 \text{ km}^2)$), e. 850 hPa 涡度(圈点, 10^{-5} s^{-1})和 900 hPa 总变形(菱形点, 10^{-5} s^{-1}), f. 950 hPa 散度(10^{-5} s^{-1}), g. 700 和 900 hPa u 分量(圈点, m/s) v 分量(菱形点, m/s)(粗虚线自西向东分别大巴山、大别山和黄山天目山)

Fig. 11 Time average profile along front, (a) relief height (m), (b) heaviest total rainfall near the front (mm), (c) the intensity of wet baroclinic front in low-middle level (dots depict the value at 750 hPa, and diamonds depict the value at 950 hPa, unit: $K/(100 \text{ km}^2)$), (d) the intensity of temperature front (dots depict the value at 750 hPa, and diamonds depict the value at 950 hPa, unit: $K/(100 \text{ km}^2)$), (e) vorticity at 850 hPa (dots, 10^{-5} s^{-1}) and total-metamorphosis at 900 hPa (diamonds, 10^{-5} s^{-1}), (f) divergence at 950 hPa (10^{-5} s^{-1}), (g) component u at 700 hPa (dots, m/s) and component v at 900 hPa (diamonds, m/s) (The thick dashed lines from west to east represent Daba mountain, dabie mountain and Huang mountain)

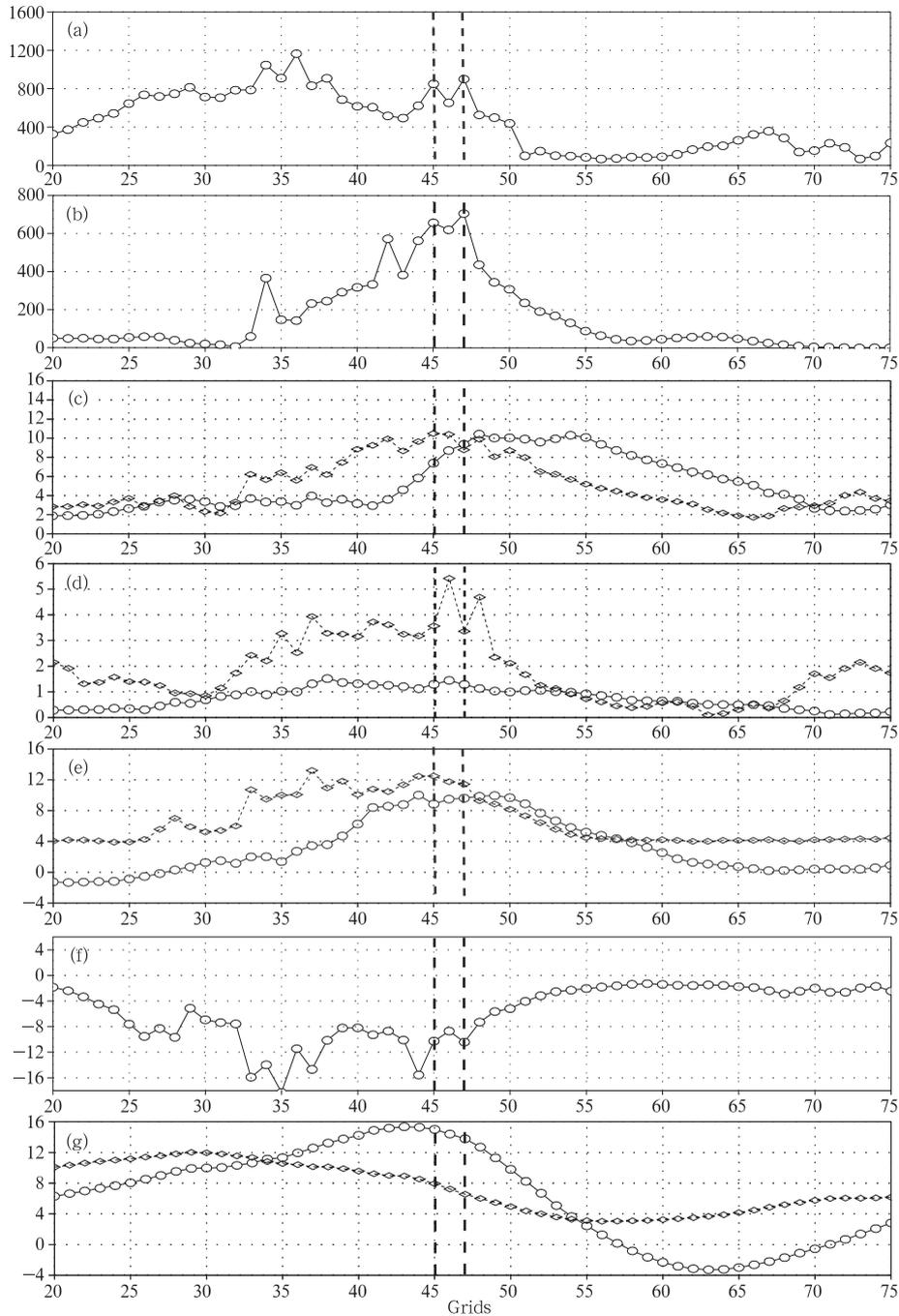


图 12 锋区东段正交方向的南北向时间平均廓线(a. 地形高度(m), b. 锋区附近最大总降水(mm), c. 中低层湿斜压锋区强度(圈点为 750 hPa, 菱形点为 950 hPa, 单位: $K/(100 \text{ km}^2)$), d. 温度锋区强度(圈点为 750 hPa, 菱形点为 950 hPa, 单位: $K/(100 \text{ km}^2)$), e. 850 hPa 涡度(圈点, 10^{-5} s^{-1})和 900 hPa 总变形(菱形点, 10^{-5} s^{-1}), f. 950 hPa 散度(10^{-5} s^{-1}), g. 700 hPa 西风 u 分量(圈点, m/s)和 900 hPa 南风 v 分量(菱形点, m/s); 图上的粗虚线自北向南分别: 大别山和幕阜山)

Fig. 12 Time average profile plumbings with the eastern front, (a) relief height(m), (b) heaviest total rainfall near the front (mm), (c) the intensity of wet baroclinic front in low-middle level (dots depict the value at 750 hPa, and diamonds depict the value at 950 hPa, unit: $K/(100 \text{ km}^2)$), (d) the intensity of temperature front (dots depict the value at 750 hPa, and diamonds depict the value at 950 hPa, unit: $K/(100 \text{ km}^2)$), (e) vorticity at 850 hPa (dots, 10^{-5} s^{-1}) and total-metamorphosis at 900 hPa (diamonds, 10^{-5} s^{-1}), (f) divergence at 950 hPa (10^{-5} s^{-1}), (g) component u at 700 hPa (dots, m/s) and component v at 900 hPa (diamonds, m/s) (the thick dashed lines from north to south represent Dabie mountain and Mufu mountain)

在大别山幕阜山及黄山天目山的东侧(图 11c),这一特征在低层温度锋区的强度分布上尤为明显(图 11d),而中层锋区的强度在东西方向的变化十分平缓(图 11c)。850 hPa 涡度的分布呈现较大尺度特征,其变化型式与中层锋区的强度分布非常接近,位相上略偏东偏南;900 hPa 总变形东西方向的分布与涡度接近,但部分地显露出地形影响(图 11e, 12e)。低层辐合呈现明显的地形特征,强辐合出现于中下游中尺度地形的山峰和迎风、背风两侧(图 11f、12f)。风分量呈较大尺度的分布特征,且南风分量的峰值明显地位于西风分量峰值的西侧和南侧,二者之间的距离,南北方向约 350 km,东西方向约 450 km,在该时间平均图上,南风分量在靠近梅雨锋区附近仍显示一个次峰,这与梅雨锋前的中尺度南风低空急流相对应(图 11g, 12g)。

5 小 结

利用 1999 年 6 月下旬持续性梅雨锋降水过程的全程同化模拟结果,对梅雨锋结构特征进行了分析,发现梅雨锋作为中低层的湿斜压锋,伴随中低层正涡度辐合带和锋前低空急流等基本特征在模拟中得到很好的证实,与观测分析是相当一致的,同时由于模拟时空分辨率的提高,得到以下一些新的认识,使我们得以较为深入地分析梅雨锋结构的时空变化特征,并着重揭示出与梅雨锋及其降水强度关系密切的结构特征。

(1) 根据湿斜压锋区强度的垂直分布,梅雨锋呈现明显的中层锋和边界层锋两段锋的特征,边界层锋限于 900 hPa 以下的边界层内,锋后有明显的浅薄冷丘,温度对锋面的形成有显著影响,而湿度的影响在边界层锋内也同样存在,由于冷丘位于高湿区内,所以等温线密集区超前于等比湿线密集区,同时边界层锋具有明显的中尺度特征,与地形有密切关系;而 800 hPa 以上的中层锋则以湿度为主,锋坡很大,近于垂直,而两段锋之间位于 900—800 hPa 的锋区相对较弱而锋坡小;梅雨锋际的垂直正涡度柱也存在两部分,分别与两段锋相对应。

(2) 中层梅雨锋区对降水的影响比边界层锋更为关键,中层锋的加强、锋坡减小趋于垂直、伴随的锋区垂直环流的加强和与高空急流锋区的贯通,有利于梅雨锋降水的加强,但模式输出中强降水并不出现于中层锋区最强的时段,而是发生于大范围锋

区强度达峰值之后的 16—24 h,这一现象有待进一步证实。

(3) 高低空流场的恰当配置是十分重要的,梅雨锋位于高空急流的南侧和低空急流的北侧,当高低空急流趋于汇合靠近时,有利于梅雨锋及其雨带的加强;同时对流层高层青藏高原东侧的偏北大风轴与低空急流相交并散开之处是伴随强降水的强梅雨锋段所在。

(4) 中低层总变形加强与梅雨锋的加强有密切关系,总变形的加强往往先出现于 900 hPa 以下的低层,随后向中层发展延伸,强总变形的出现超前梅雨锋区的加强 4—12 h。

(5) 组成低空急流的中低层 u, v 分量呈现不同的分布和演变特征:梅雨锋前 400 hPa 以下为较深厚的南风区,强南风中心位于 900—800 hPa,呈现明显的低空急流状特征,除离锋面距离较远处的天气尺度急流外,贴近暴雨区可能出现较小尺度的急流;而西风的均匀大值区则出现于中层锋前的 700—500 hPa,表现为高空强西风区沿锋区上界的向下延伸;低空南风急流通常与总变形同时加强,一般先出现于 900 hPa 附近,随后其 10 m/s 以上的南风大值区向上延伸至 600 hPa 附近,使南风急流趋于深厚,中层西风伴随加强,与高层强西风区出现上下贯通,形成梅雨锋上空中层的均匀大值西风区。

(6) 强梅雨锋段的要素场呈现高度集中组织化的特征:无论是锋前的饱和高湿高能气柱,还是锋前中低层急流状南风区和中层西风均匀大值区,均呈现垂直深厚,水平经向狭窄,南北梯度大的特点,如 u, v 两分量的等风速线在锋区内皆密集、近于垂直并与锋区平行,形成梅雨锋区强水平风切变和弱垂直风切变的独特特征,这直接导致锋际中低层深厚的正涡度辐合气柱,沿锋面向上突伸的南风与两侧下突的高层北风形成高层漏斗状下伸的辐散区,当此高空辐散与中低层辐合相重合时,锋区垂直环流发展,导致梅雨锋上空漏斗状云雨柱的发展。

(7) 沿梅雨锋低层的辐合、锋区强度、总变形和南风分量及降水强度等要素呈现显著的中尺度扰动状特征,且有明显的日变化,最强多出现于后半夜到凌晨。低层扰动特征偏爱出现于大别山、幕阜山、黄山天目山等长江中下游特定中尺度地形附近,且扰动特征具有随时间上传的趋势。

由于数值模拟本身的局限性和不完善性,尽管

模拟结果可以部分弥补现有观测的不足,并给我们一些有意义的启示,但对模拟结果仍须慎重对待,特别是边界层内的结果,其中有些部分可能是模式引起的虚假现象,有待今后新观测事实的进一步检验验证。

参考文献

- [1] 陶诗言,倪允琪等. 1998年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究. 北京:气象出版社,2001. 43-100
Tao Shiyang, Ni Yunqi, et al. The Mechanism and Forecast of 1998 Summer Heavy Rainfall in China. Beijing: China Meteorological Press, 2001. 43-100
- [2] 丁一汇. 天气动力学中的诊断分析方法. 北京:科学出版社, 1989. 293pp
Ding Yihui. The Diagnostic and Analysis Method in Synoptic Dynamics. Beijing: Science Press, 1989. 293pp
- [3] 张小玲,陶诗言,张庆云. 1998年梅雨锋的动力热力结构分析. 应用气象学报, 2002, 13(3):257-268
Zhang Xiaoling, Tao Shiyang, Zhang Qingyun. Structures of meiyu fronts in 1998. Appl Meteor Sci (in Chinese), 2002, 13(3): 257-268
- [4] 王建捷,陶诗言. 1998年梅雨锋的结构特征及形成与维持. 应用气象学报, 2002, 13(5):526-534
Wang Jianjie, Tao Shiyang. Structure and formation of Meiyu front in 1998. Appl Meteor Sci (in Chinese), 2002, 13(5): 526-534
- [5] 张小玲. 长江流域梅雨锋暴雨灾害的研究:[博士论文]. 北京:中国科学院大气物理研究所, 2002. 239pp
Zhang Xiaoling. A study of the disaster of heavy rain over the Yangtze River basin during the meiyu period; [Ph. D. dissertation]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002. 239pp
- [6] 柳俊杰,丁一汇,何金海. 一次典型梅雨锋锋面结构分析. 气象学报,2003,61(3):291-301
Liu Junjie, Ding Yihui, He Jinhai. The structure analysis of a typical meiyu front. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2003, 61(3): 291-301
- [7] 李柏,曹性善,周昆等. 江淮梅雨锋暴雨过程中尺度系统的演变及结构特征分析与研究. 气候与环境研究, 2001, 6(2): 168-173
Li Bai, Cao Xingshan, Zhou Kun, et al. The analysis and research to the evolution and structure characters of the mesoscale systems during the meiyu front heavy rain processes. Climatic and Environ Res (in Chinese), 2001, 6(2): 168-173
- [8] 王智,翟国庆,高坤. 长江中游一次 β 中尺度低涡的数值模拟. 气象学报,2003,61(1):66-77
Wang Zhi, Zhai Guoqing, Gao Kun. Analysis and numerical simulation of a meso- β -scale vortex in middle reaches of the Yangtze river. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2003, 61(1): 66-77
- [9] 陶诗言等. 中国之暴雨. 北京:科学出版社,1980. 225pp
Tao Shiyang. The Heavy Rain in China. Beijing: Science Press, 1980. 225pp
- [10] Grell A, Dudhia J, Stauffer D R. A Description of the Fifth Generation PENN State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR/TR-398+IA, NCAR Technical Note [M]. Boulder Colorado: National Center for Atmospheric Research, 1993. 107pp
- [11] 高坤,徐亚梅. 1999年6月下旬长江中下游梅雨锋低涡扰动的结构研究. 大气科学, 2001, 25(6):740-755
Gao Kun, Xu Yamei. A simulation study of mesovortexes along meiyu front during 22-30 June 1999. Chinese Atmospheric Sciences (in Chinese), 2001, 25(6): 740-755
- [12] 陈丽芳,高坤,徐亚梅. 梅雨锋演变与低涡发展的联系. 浙江大学学报(理学版), 2004, 31(1):103-109
Chen Lifang, Gao Kun, Xu Yamei. Relationship between the evolvement of meiyu front and the vortex along it. Journal of Zhejiang University (Science Edition) (in Chinese), 2004, 31(1): 103-109
- [13] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文等. 天气学原理和方法. 北京:气象出版社,1992. 914pp
Zhu Qiangeng, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. Principle and Approach of the Synoptic (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1992. 914pp

THE SIMULATION OF THE UNEVEN CHARACTERISTICS OF MEIYU FRONT STRUCTURE

Chen Lifang¹ Gao Kun²

1 Hangzhou Meteorological Office, Hangzhou 310008

2 Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Abstract

A simulation of the heavy rainfall process along meiyu front was conducted using the NCAR/PSU mesoscale model with a four-dimensional data assimilation. The model output of high temporal and spatial resolution was used to investigate the uneven characteristics of the structure of meiyu front, which was closely responsible to the heavy rainfall. The results indicate that the meiyu front consists of two segments vertically, the middle layer front and boundary layer front. The vortex and associated heavy rainfall along meiyu front were more sensitive to the middle layer front than to the boundary layer front. The intensified, steeper of the middle layer front and intensification of the vertical circulation across the front in the middle layer are favorable to the later enhancement of precipitation along the meiyu front. The peak intensity of precipitation did not occur at the same time while the middle layer front reaching its peak intensity, but the former has a lag of about 16–24 hours. The total deformation fields at middle and low layer were closely associated with the development of front. The distribution and evolution of u and v components were significantly different. The southerly jet stream center was at 900–800 hPa, and the strong westerly flow was at middle level of 700–500 hPa ahead of the front, appearing as the downward extension of upper level westerly along the upper boundary of the front. The vertical saturated warm moist air column, southerly low layer jet and westerly middle level jet ahead of the front show highly organized features at the intense front segment. Some low layer fields along Meiyu front, such as convergence, front intensity, deformation and southerly wind, show evident mesoscale orographic features and with significant daily variation.

Key words: Structure of meiyu front, Intermediate layer front, Boundary layer front.