徐亚钦, 吴松涛, 杨旺文, 等. 2019. 浙江省梅雨锋强降水的锋生及环流特征分析 [J]. 大气科学, 43(6): 1219-1232. XU Yaqin, WU Songtao, YANG Wangwen, et al. 2019. Analysis of Frontogenesis and Circulation Characteristics of the Meiyu Front with Heavy Precipitation in Zhejiang Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6): 1219-1232. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1907.18187

浙江省梅雨锋强降水的锋生及环流特征分析

徐亚钦1 吴松涛2 杨旺文2 刘学华1 黄艳1

1 浙江省金华市气象局,浙江金华321000 2 浙江省浦江县气象局,浙江浦江322200

摘 要为了研究新中西(浙江省中部和西部)梅雨锋强降水的锋生及环流特征,以2016年6月15日一次典型 梅雨为代表,采用ERA-INTERIM(0.25°×0.25°)再分析资料、FY-2E卫星云顶亮温和雷达资料,运用风场分 解、合成分析等方法对锋生与强降水的对应关系及环流结构进行分析。结果表明:此次典型梅雨处于有利的天气 尺度背景下,强降水区与中低层锋生区有较好对应。锋区维持时,强降水区伴随中层倾斜锋生和形变锋生;锋区 南压时,强降水区伴随中层倾斜锋生和低层水平锋生。低层梅雨锋北侧为超地转偏西气流,南侧为非地转东南气 流,它们分别影响了北侧非平衡偏北气流和南侧平衡西南气流的发展,从而影响锋生系统。在锋区存在低层地转 偏差辐合、高层辐散的上升运动,形成次级环流上升支,锋后反之。此外,锋前低空纬向风为次地转,而锋后低 空纬向风为超地转,高空纬向风为次地转,这进一步促进了次级环流的发展。合成场中,在200 hPa西风槽槽后 及槽前分别存在西北气流和西南气流显著增强区;在700 hPa浙北(浙江北部)地区存在东北气流显著增强区。 合成锋生各分解项的水平及垂直分布与典型个例较类似。低层锋生主要由散度项贡献,形变项次之,倾斜项则起 负作用;中层锋生主要由倾斜项贡献,形变项次之;高层锋消主要由倾斜项贡献。 **关键词**梅雨锋 锋生函数 非地转风 平衡风 非平衡风 次级环流

文章编号 1006-9895(2019)06-1219-14 中图分类号 P458 文献标识码 A **doi:**10.3878/j.issn.1006-9895.1907.18187

Analysis of Frontogenesis and Circulation Characteristics of the Meiyu Front with Heavy Precipitation in Zhejiang Province

XU Yaqin¹, WU Songtao², YANG Wangwen², LIU Xuehua¹, and HUANG Yan¹

Jinhua Meteorology Bureau, Jinhua, Zhejiang 321000
 Pujiang Meteorology Bureau, Pujiang, Zhejiang 322200

Abstract This paper analyzes the frontogenetic and circulation characteristics in central and western Zhejiang Province as represented by a typical Meiyu process on 15 June 2016. Based on ERA-INTERIM $(0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ})$ reanalysis data, FY-2E TBB (Black Body Temperature) data, and radar data, the relationship between frontogenesis and heavy precipitation, and the characteristics of circulation, were analyzed by means of wind decomposition and composite analysis. Results indicated that the typical Mei-yu was under a favorable synoptic-scale background, and the heavy precipitation area was closely related to the low-to-mid-level frontogenesis. When the frontal zone persisted, it was accompanied by mid-level deformation and tilting frontogenesis. When the frontal zone shifted southward, it was accompanied by mid-level tilting

收稿日期 2018-07-04; 网络预出版日期 2019-03-24

作者简介 徐亚钦, 男, 1986年出生, 工程师, 主要从事中尺度强对流和暴雨数值模拟研究。E-mail: hekele@126.com

资助项目 金华市气象局灾害性天气预报创新团队项目,浙江省气象局预报员专项项目2016YBY13

Funded by Innovation Team Project of Severe Weather Forecast in Jinhua Meteorological Bureau, Specific Funds for Weather Forecast in Zhejiang Meteorological Bureau (Grant 2016YBY13)

	大	气	科	学			
Chinese Journal of Atmospheric Sciences							

frontogenesis and low-level horizontal frontogenesis. The super-geostrophic westerly airflow on the north side of the lowlevel Mei-yu front and the strong southeast ageostrophic airflow on the south side affected the unbalanced northerly airflow on the north side and the balanced southwesterly airflow on the south side, thus affecting frontal development. In the frontal zone, upward motion, which formed the ascending branch of the secondary circulation, was caused by lowlevel geostrophic deviation convergence and upper-level divergence. The contrary was found in the post-frontal area. Additionally, in the pre-frontal area, the low-level zonal wind was sub-geostrophic, while in the post-frontal area, the lowlevel zonal wind was super-geostrophic, and the upper-level zonal wind was sub-geostrophic. Thus further enhanced the secondary circulation. After composite, there was an area of significant enhancement of the northwesterly and southwesterly airflow behind and in the frontal trough at 200 hPa. In addition, there was a significant northeasterly wind variation area over northern Zhejiang Province at 700 hPa. Horizontal and vertical distribution of the decomposition items were similar between the composite and typical cases. Low-level frontogenesis was mainly contributed to by the divergence term, followed by the deformation term, while the tilting term had a negative contribution. Mid-level frontogenesis was mainly contributed to by the tilting term.

Keywords Meiyu front, Frontogenesis function, Ageostrophic wind, Balanced wind, Unbalanced wind, Secondary circulation

1 引言

梅雨是影响浙江省的主要气象灾害之一,梅雨 期间常伴有区域性暴雨过程,6月至7月浙江省的 暴雨日数占全年一半左右,易使洪涝、泥石流、山 体滑坡等灾害频发,这会对人民生命财产安全和社 会经济造成巨大影响。因此,梅雨一直是气象研究 的重点也是难点。许多学者对梅雨的环流形势(陶 诗言等,1958;孙建华和赵思雄,2003)、结构特 征(丁一汇等,2007;郑永光等,2007;Zhou et al.,2004)、形成机理等做了大量研究(刘建勇等, 2012;Zhang and Zhang,2011;张庆云和郭恒, 2014),为梅雨的研究预报奠定了坚实基础。

梅雨锋是梅雨的重要组成部分,它是季风气团 和其他气团之间的锋面,是位于夏季风北风侧的相 当位温强梯度带(郑永光等,2008)。它是多尺度 天气系统共同作用的产物,其降水结构复杂(Oue et al., 2010;郑婧等,2015),存在多种尺度的对流 组织形式(Luo et al., 2014)。它与暴雨关系密切, 暴雨系统总是在梅雨锋附近发生、发展,暴雨系统 和降水云系总是沿着梅雨锋陡立的等相当位温面发 展和移动(Cui et al., 2003)。梅雨锋的锋生作用与 中尺度对流系统的发生、发展密切相关。锋生使湿 等熵面倾斜,在锋区前产生显著的正垂直涡度变 化,有利于暴雨中尺度对流系统的剧烈发展和维持 (王伏村等,2016)。湿物理过程产生的锋生和锋前 强中尺度对流系统的发展呈一种正反馈过程,这是 梅雨锋维持机制之一(Jiang and Ni, 2004)。锋生 导致水平位温梯度随时间增大,热成风平衡随之破 坏,根据地转偏差与加速度关系,形成横向非地转 环流,次级环流也会反过来影响锋生作用(朱乾根 等,2007)。

锋生函数可很好地表征梅雨锋的锋生结构、时 空分布和演变特征。它对梅雨锋暴雨的强度和范围 具有指示意义(王建捷和陶诗言, 2002; 尹东屏 等,2010)。侯俊和管兆勇(2013)分析了华东地 区梅雨锋生的气候学特征,表明降水量与锋生函数 关系密切,降水时间序列与锋生函数的相关系数可 达0.55。锋生函数各分解项对降水的贡献有所差 异。孙淑清和杜长萱(1996)认为锋生函数的形变 项是一个主要项,它与锋生的维持有直接关系,而 散度锋生项则与梅雨锋上中尺度扰动及由此引起的 不均匀性有关,其正值区与暴雨区相对应。Chen et al. (2007)分析了一次强斜压特征的华南梅雨锋 锋生过程,发现梅雨锋的锋生及其维持与锋生函数 中的形变项和散度项有着更大的关系。郑婧等 (2015) 认为倾斜项对锋生的作用主要表现在强降 雨发生时垂直运动的发展,而在梅雨锋维持中,水 平项对锋生的作用比倾斜项更大。此外,不同层次 的锋生对暴雨的作用不尽相同。有研究认为梅雨锋 的锋生中心多位于低层(Jiang and Ni, 2004)。陈 丽芳和高坤(2006)对一次梅雨过程模拟分析认为 该过程中层梅雨锋对降水的影响比边界层锋更为关 键。郭英莲等(2014)分析了三次梅汛期暴雨过

程,表明三次过程均在中层出现锋生,主要由垂直 锋生组成,有利于对流不稳定的发生。低层锋生主 要由水平锋生组成,有利于水汽输送和辐合抬升。 当中层为垂直锋生、低层为水平锋生时,有利于降 雨强度的加强。因此,梅雨锋锋生的研究颇有意 义,且有必要重视不同高度上锋生分解项分布特征 的研究。

浙江省地理位置特殊,梅汛期浙江省各区域天 气差异明显,浙中西(浙江省中部和西部)又是梅 汛期暴雨最集中的区域之一。因此对浙中西梅雨锋 锋生特征及环流结构的研究十分必要。本文以 2016年6月15日一次典型浙中西单阻冷切型梅汛 期暴雨过程作为代表,利用欧洲中心(ERA-INTERIM)再分析资料(0.25°×0.25°)、FY-2E卫 星云顶亮温资料和雷达资料研究运动学锋生函数及 其分解的形变项、散度项、倾斜项与强降水之间的 关系,梅雨锋非地转环流及(非)平衡环流的特 征。并进一步选取多个相似个例对锋生和环流特征 进行合成分析,从而了解该类梅雨锋暴雨的锋生结 构和环流特征。

2 典型梅雨个例研究

2.1 降水及环流特征

2.1.1 降水实况

2016年6月15日浙江省出现一次典型梅雨锋

强降水过程,15日08时(北京时,下同)至16日 08时浙江省衢州雨量76.8 mm、丽水65.5 mm、金 华64.1 mm。大暴雨以上站点达75个,雨量最大的 站点为丽水龙泉西井村226.6 mm。多个站点出现 1 h雨量大于50 mm的短时强降水。从雨量分布 (图1a)可见,浙中西出现区域性暴雨,过程最大 降水中心位于丽水地区,次降水中心位于金华、衢 州地区。从衢州和丽水两个代表站的小时雨量(图 1b)可见,衢州站降水呈单峰状,从10时出现降 水,16时起明显增强并持续近4 h。丽水站降水呈 双峰状,在17~18时和21~22时均出现明显的降 水增幅。

2.1.2 环流特征

由 500 hPa 位势高度场(图 2a、b)可见,15 日 08 时(图 2a)西风槽位于东北南部到西南东部 地区,江淮和江南地区处于西风槽前。在高纬度, 单阻型阻塞高压位于贝加尔湖西部地区,在其东侧 存在低压中心,冷空气沿着内蒙古中部入侵至江南 地区。副热带高压(简称副高)西伸脊线位于 20° N,浙江省处于高空槽和副高边缘区域,具有良好 的水汽和不稳定能量条件。在高层,浙江省处于 200 hPa高空急流入口区右侧及100 hPa南亚高压脊 线北侧的分流区中(图略),这十分有利于高空气 流的辐散,并进一步通过抽吸作用影响低层气流的 辐合。15日 20 时(图 2b)高空槽有所东移,浙江 省仍处于高空槽和副高边缘位置。由 700 hPa位势



图1 2016年6月15日08时到6月16日08时(a)浙江省24h累积降雨量(单位:mm)分布,(b)衢州站和丽水站小时降雨量(单位:mm)时间序列

Fig. 1 (a) 24-h accumulated precipitation (units: mm) in Zhejiang Province, (b) time series of 1-h precipitation (units: mm) at Quzhou and Lishui stations from 0800 BJT (Beijing time) on 15 June to 0800 BJT on 16 June 2016



图 2 2016年6月15日 (a) 08时、(b) 20时500 hPa位势高度场(等值线,单位: dagpm)和风场(风羽,单位: m s⁻¹),(c) 08时、(d) 20时700 hPa位势高度场(等值线,单位: dagpm)、850 hPa风场(风羽,单位: m s⁻¹)和FY-2E卫星平均TBB(填色,单位: ℃)。图a、 b中,黑色虚线表示500 hPa槽线

Fig. 2 Geopotential height (contours, units: dagpm) and wind (wind barbs, units: $m s^{-1}$) at 500 hPa at (a) 0800 BJT, (b) 2000 BJT on 15 June 2016, the black dashed lines indicate the 500-hPa troughs. 700-hPa geopotential height (contours, units: dagpm), 850-hPa wind (wind barbs, units: $m s^{-1}$), and TBB (Black Body Temperature, shadings, units: $^{\circ}$ C) from FY-2E satellite at (c) 0800 BJT, (d) 2000 BJT on 15 June 2016

高度和850 hPa风场(图2c、d)可见,15日08时 (图2c)700 hPa在渤海存在低值中心,低压槽底 位于浙北。850 hPa在江南中部存在切变线,并一 直延伸至华南西北部地区。切变线附近伴随多个 对流云团发展,其南侧强西南急流将孟加拉湾和 南海的水汽源源不断地输送至江南地区。15日20 时(图2d)700 hPa低涡南摆,850 hPa切变线东 伸发展,切变线南侧西南急流也明显加强,并在 江南中部到华南西部形成一条强盛的梅雨锋云 带,浙江省西南部 TBB(Black Body Temperature) 达到-75℃。

2.2 锋生特征

2.2.1 锋生函数水平分布

锋生函数可定量表征大气的动力和热力特征及 锋生结构。本文锋生函数计算采用 Miller 锋生公式 (Miller, 1948),在p坐标下其表达式为

$$F = \frac{d}{dt} |\nabla \theta| = T_1 + T_2 + T_3 + T_4, \qquad (1)$$

其中,

$$T_{1} = -\frac{\frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\right) + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\right)}{|\nabla \theta|}, \qquad (2)$$

$$T_{2} = -\frac{\left(\frac{\partial\omega}{\partial x}\frac{\partial\theta}{\partial x} + \frac{\partial\omega}{\partial y}\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)\frac{\partial\theta}{\partial p}}{|\nabla\theta|},\qquad(3)$$

$$T_3 = -\frac{1}{2}D|\nabla\theta|, \qquad (4)$$

$$T_{4} = -\frac{1}{2} \frac{E\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)^{2} + 2F\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial\theta}{\partial y}\right) - E\left(\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)^{2}}{|\nabla\theta|}, \quad (5)$$

上式中, $E = \partial u/\partial x - \partial v/\partial y$ 表示伸展形变, $F = \partial v/\partial x + \partial u/\partial y$ 表示切变形变, θ 为位温, ω 为垂直 速度。 T_1 为非绝热加热项,即非绝热加热梯度产生 的锋生作用,在湿绝热条件下,此项可忽略; T_2 为 倾斜项,即垂直速度的水平梯度产生的锋生作用; T_3 为散度项,即水平辐合 (D < 0)或辐散 (D > 0) 产生的锋生或锋消; T_4 为形变项,即水平变形产生 的锋生作用。湿对流大气可用湿位温代替位温进行 锋生计算 (郭英莲等, 2014)。本文着重分析总锋 生函数及水平运动和垂直运动对锋生的作用。

从 700 hPa 锋生和风场可见, 15 日 08 时(图 略)赣北存在低涡,浙江省处于一致西南气流中,此时梅雨带并未影响浙江省。14 时(图 3a)赣北

低涡有所东移,浙中南地区西南气流强度加强,存 在风速辐合。能量条件也明显转好,最大假相当位 温中心位于丽水地区,达352 K。此时,在赣北到 浙中地区形成一条宽约100 km的锋生带,最大锋 生强度达7.0×10⁻⁹ K s⁻¹ m⁻¹。在丽水还存在暖锋锋 生,锋生区和未来1h强降水区有较好对应。此 外,在皖中和苏中一带存在冷锋锋生带,但处于冷 性场,并未产生强降水。20时(图3b)冷空气南 下,锋区有所南压。在赣中北到浙西北地区形成一 条东南一西北型冷式切变线,未来1h强降水位于 700 hPa冷切南侧,与锋生带仍有较好对应。16日 02 时(图略)锋生带移至浙南地区,降水明显 减弱。

1223

以15日14时为代表分析锋生函数各分解项与 浙中西强降水之间的对应关系(图4)。各分解项 量级相近,范围有所重叠。相对而言,中层倾斜项 对应的范围更南,中层形变项的范围更北。各项叠 加的区域和未来1h强降水有较好对应。因此在研 究锋生函数和浙中西降水对应关系时应当充分考虑 不同分解项在不同层次的对应性。

2.2.2 锋生函数垂直分布

锋区维持时刻(图5a),垂直锋区由低到高先向南再向北倾斜。在锋区北侧中低层(900 hPa和 700 hPa附近)均存在干冷空气锲入从而形成两个 干冷中心;在锋区南侧为低层暖湿,高层相对干冷



图3 2016年6月15日(a)14时、(b)20时700hPa假相当位温(等值线,单位:K)、风场(风羽,单位:ms⁻¹)、总锋生函数(填色, 单位:10⁻⁹Ks⁻¹m⁻¹)和未来1h雨量大于10mm的站点(蓝点)

Fig. 3 Equivalent potential temperature (contours, units: K), wind (wind barbs, units: $m s^{-1}$), frontogenesis function (shadings, units: $10^{-9} K s^{-1} m^{-1}$) at 700 hPa, and stations with subsequent 1-h precipitation more than 10 mm (blue dots) at (a) 1400 BJT, and (b) 2000 BJT on 15 June 2016



图4 2016年6月15日14时850 hPa散度项(填色,单位: 10⁻⁹ K s⁻¹ m⁻¹)、700 hPa形变项(红色等值线,单位: 10⁻⁹ K s⁻¹ m⁻¹)、700 hPa倾斜项(黑色等值线,单位: 10⁻⁹ K s⁻¹ m⁻¹)和未来1h雨量大于10 mm的站点(蓝点)。黄色框表示浙中西地区,黑色虚线表示图5、图6、图9中剖面位置

Fig. 4 850-hPa divergence term (shadings, units: 10^{-9} K s⁻¹ m⁻¹), 700-hPa deformation term (red contours, units: 10^{-9} K s⁻¹ m⁻¹), 700-hPa tilting term (black contours, units: 10^{-9} K s⁻¹ m⁻¹), and stations with subsequent 1-h precipitation more than 10 mm (blue dots) at 1400 BJT on 15 June 2016. The yellow frame indicates the central and western Zhejiang Province, the black dashed line indicates the location of the cross sections in Fig. 5, Fig. 6, and Fig. 9

的不稳定层结,锋生作用不断触发不稳定能量释 放,形成持续对流性降水。在700 hPa,28.5°N和 29.5°N附近存在两个锋生中心,并与未来强降水区 相对应。南侧为暖锋锋生,伴随局地对流性强降 水;北侧主锋生强度更强、范围更广,降水也更为 明显。其他锋生区对应着一定的下沉气流,因此并 未产生明显的降水。

锋区南压时刻(图5b),锋后倾斜南侵的冷空 气明显增强,锋区有所南压,垂直锋区变陡。此 时,中低层锋生区与未来强降水区仍有较好对应。 此外,28.5°N附近在700 hPa和850 hPa上均存在锋 生作用,不同高度锋生叠加的区域对应着更为显著 的降水。而下沉气流所对应的锋生区并未产生明显 的降水。

在锋生分解项垂直剖面中(图6),各项量级 相近,倾斜项分布较散度项和形变项差异较大。锋 区维持时刻(图6a、b),低层锋区附近(29°~30° N)强降水对应的锋生以散度项为主,强度较弱, 倾斜项则起了锋消作用;中层以倾斜锋生和形变锋 生为主;中高层(700 hPa以上)倾斜锋消、形变 锋生和散度锋生大体抵消,并随高度向北倾斜。此 外,低层锋区前侧(28.5°N附近)强降水对应的总 锋生函数由中层倾斜锋生组成。

锋区南压时刻(图6c、d),形变锋生和散度锋 生均明显增强。在低层锋区附近(28.3°~29.5°N)



图5 2016年6月15日 (a) 14时和 (b) 20时假相当位温 (等值线,单位:K)、经向环流 (ν,ω×10) (箭头,ν的单位为m s⁻¹,ω的单位 为Pa s⁻¹)、总锋生函数 (填色,单位:10⁻⁹K s⁻¹m⁻¹) 沿着119.5°E的剖面和未来1h降水(柱状,单位:mm)

Fig. 5 Vertical cross sections of pseudo-equivalent potential temperature (contours, units: K), meridional circulation ($v, \omega \times 10$) (arrows, units of v: m s⁻¹, units of ω : Pa s⁻¹), frontogenesis function (shadings, units: 10^{-9} K s⁻¹ m⁻¹) along 119.5°E, and subsequent 1-h precipitation (bars, units: mm) at (a) 1400 BJT, (b) 2000 BJT on 15 June 2016



图6 2016年6月15日 (a、b) 14时, (c、d) 20时 (a、c) 散度项 (填色,单位: 10^{-9} K s⁻¹ m⁻¹)、形变项 (等值线,单位: 10^{-9} K s⁻¹ m⁻¹)、经向环流 ($v, \omega \times 10$) (箭头, v的单位为m s⁻¹, ω 的单位为Pa s⁻¹), (b、d) 倾斜项 (填色,单位: 10^{-9} K s⁻¹ m⁻¹)、经向环流 (箭头, v的单位为m s⁻¹, ω 的单位为m s⁻¹, ω 的单位为m s⁻¹) 沿着 119.5°E的剖面和未来1h降水 (柱状,单位: mm) Fig. 6 (a, c) Vertical cross sections of divergence term (shadings, units: 10^{-9} K s⁻¹ m⁻¹) and deformation term (contours, units: 10^{-9} K s⁻¹ m⁻¹), meridional circulation ($v, \omega \times 10$) (arrows, units of v: m s⁻¹, units of ω : Pa s⁻¹), (b, d) tilting term (shadings, units: 10^{-9} K s⁻¹ m⁻¹), meridional circulation ($v, \omega \times 10$) (arrows, units of ω : Pa s⁻¹) along 119.5°E, and subsequent 1-h precipitation (bars, units: mm) at (a, b) 1400 BJT, (c, d) 2000 BJT on 15 June 2016

存在散度锋生和形变锋生,700 hPa则存在倾斜锋 生中心,倾斜锋生叠置在低层水平锋生上,有利于 降雨强度的加强(郭英莲等,2014)。低层锋区后 侧(29.5°~31°N)总锋生函数主要由散度锋生和 形变锋生组成,中层无倾斜锋生,该区域降雨强度 较弱。高空锋区各分解项的锋生与锋消仍大体抵 消。此外,低层锋区前侧(28°N以南)的倾斜锋 生由下沉运动引起,并未产生明显的降水。 浙中西区域平均(图4黄色框)总锋生函数和 各分解项垂直分布(图7)可见,锋生、锋消集中 在400 hPa以下。总锋生函数垂直分布呈双峰型, 1000~825 hPa,锋生随着高度先增后减,最大位 于875 hPa,达2.5×10⁻⁹K s⁻¹m⁻¹。各分解项中, 散度项为主要贡献因子,其次为形变项,倾斜项起 弱锋消作用。825~650 hPa,总锋生函数随着高度 先增后减,中层最大锋生强度较低层更强,达



图7 2016年6月15日14时浙中西区域(图4黄色框)平均总锋生 函数及各分解项垂直分布(单位: 10⁻⁹K s⁻¹ m⁻¹)

Fig. 7 Vertical distribution of average frontogenesis function and its decomposition terms (units: 10^{-9} K s⁻¹ m⁻¹) in central and western Zhejiang Province (yellow frame in Fig. 4) at 1400 BJT on 15 June 2016

4.7×10⁻⁹ K s⁻¹ m⁻¹。各分解项中,倾斜项为主要贡 献因子,达2.5×10⁻⁹ K s⁻¹ m⁻¹,其次为形变项。 650~400 hPa,以锋消为主,倾斜项为锋消作用主 要贡献因子。

2.3 风场环流特征

2.3.1 非地转风和(非)平衡流

锋生导致水平相当位温梯度变化,原地转平衡 和热成风平衡随之破坏,有利于地转偏差的增大。 地转偏差对高低空急流演变和大气垂直运动有着重 要的作用。在不考虑黏性项时,水平纬向运动方 程为

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} = f\left(v - v_g\right) = fv_a,\tag{6}$$

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = f\left(u_g - u\right) = -fu_a,\tag{7}$$

式中, u_{g} 和 v_{g} 是纬向地转风和经向地转风, u_{a} 和 v_{a} 是纬向非地转风和经向非地转风,f是科氏参数。

按照 Helmholtz 定理可进一步把原始风场分解 为平衡风(旋转风 V_{ψ})和非平衡风(辐散风 V_{χ})。其 中, $V_{\psi} = \mathbf{k} \times \nabla \psi$, $V_{\chi} = \nabla \chi$, $\psi \pi \chi \beta$ 别为流函数和 速度势。非地转风发展趋势及(非)平衡流的分布 对锋生发展以及未来系统的演变有一定的参考性。

锋区维持时刻,浙江省存在南北两条回波带 (图8a)。北侧回波带对应着超地转(*u_a* > 0)偏西

气流,最大风速中心达8ms⁻¹,并与强回波有较好 对应。超地转纬向气流使 dv/dt < 0, 北风增强。 对照此时的非平衡风(图8c)可见,在皖东南到 浙西北地区存在非平衡偏北气流,最大风速中心达 7 m s⁻¹, 表征了质量调整正在进行。超地转偏西气 流和非平衡偏北气流有利于冷空气加强南下。南回 波带的南侧为非地转东南气流(图8a),最大风速 中心达 10 m s⁻¹,即纬向风次地转 ($u_a < 0$)和经向 风超地转 $(v_a > 0)$, u n v 分量增大, 存在西南气 流增强过程。对照此时平衡风(图8e)可见,在 29.5°N以南为大范围西南急流,即西南急流强度将 有所增强。南侧回波带主要由平衡西南气流的增强 作用占主导,通过科氏力矩,非地转风增强了急流 产生超地转流(Chen et al., 2008)。此外,浙中西 平衡偏南气流与非平衡偏北气流量级大体相当,使 得锋区整体维持在浙中西地区,以东移为主。

锋区南压时刻,随着低层冷空气扩散,强回波 带南压至浙西南地区(图8b)。浙西北非平衡西北 气流的强度和范围均有所增强(图8d),但该地区 的超地转偏西气流已明显减弱(图8b),北风增率 将减少。此时回波带南侧的非地转东南气流也有所 减弱(图8b),即南侧西南急流增率也将减小。此 外,浙西南地区的非平衡偏北气流大于南侧平衡偏 南气流,锋区将继续南压,但强度有所减弱。

2.3.2 次级环流

显著的水平锋生强迫有助于次级环流的发展 (Chen and Tseng, 2000),次级环流也会反过来影响 锋生作用。强烈的梅雨锋天气主要出现在垂直环流 圈的上升支,次级环流上升支的维持和发展直接影 响梅雨锋暴雨的维持和增强。

锋区维持时刻(图9a),非地转风辐合、辐散随高度向干冷区倾斜,上升气流沿着高空锋区向外流出。在低层锋区(29°~29.5°N),700~900 hPa中低层存在非地转风辐合中心,650~400 hPa存在辐散中心。低层辐合高层辐散耦合作用下形成上升运动,从而形成了直接环流的上升支。在锋后(31.5°N附近),850 hPa存在弱非地转风辐散,其高层(450 hPa附近)则存在强辐合中心,高层辐合低层辐散作用形成下沉运动,从而形成了次级环流的下沉支。在补偿气流下,形成了直接环流圈。

此外,在低层锋前暖区侧(800 hPa以下)纬 向风为次地转($u_a < 0$),则dv/dt > 0,即存在南风 增强过程。而在低层锋后干冷区侧(700 hPa以下)



图8 2016年6月15日 (a、c、e) 14时和 (b、d、f) 20时850 hPa的 (a、b) 非地转风 (矢量和等值线,单位: m s⁻¹)、雷达回波 (阴影,单位: dBZ), (c、d) 非平衡流 (矢量和等值线,单位: m s⁻¹), (e、f) 平衡流 (矢量和等值线,单位: m s⁻¹) Fig. 8 (a, b) Ageostrophic wind (vectors and contours, units: m s⁻¹) and radar reflectivity (shadings, units: dBZ), (c, d) unbalanced wind (vectors and

contours, units: m s⁻¹), (e, f) balanced wind (vectors and contours, units: m s⁻¹) at 850 hPa at (a, c, e) 1400 BJT, (b, d, f) 2000 BJT on 15 June 2016



图9 2016年6月15日 (a) 14时和 (b) 20时非地转风散度(填色,单位: 10^{-5} s^{-1})、纬向非地转风(等值线,单位: m s^{-1})、经向环流 ($\nu, \omega \times 10$)(箭头, ν 的单位为m s⁻¹, ω 的单位为Pa s⁻¹)沿着119.5°E的垂直剖面。粗虚线表示直接环流圈,粗实线表示锋区位置 Fig. 9 Vertical cross sections of ageostrophic wind divergence (shadings, units: 10^{-5} s^{-1}), zonal ageostrophic wind (contours, units: m s^{-1}), and meridional circulation ($\nu, \omega \times 10$) (arrows, units of ν : m s⁻¹, units of ω : Pa s⁻¹) along 119.5°E at (a) 1400 BJT, (b) 2000 BJT on 15 June 2016. The bold dashed lines and bold solid lines indicate the direct circulation and the frontal zone

纬向风为超地转 (*u_a* > 0),则dv/dt < 0,即存在北 风增强过程。低层锋区两侧风速的增强进一步加强 锋区的辐合上升运动,进而加强了次级环流的上升 支。而锋后沿着高空锋区 (600 hPa 以上)*u_a* < 0, 即南风增强。因此,锋后干冷区高层南风的增强和 低层北风的增强进一步促进了次级环流的发展,并 进一步影响锋生形成正反馈作用。上升支加强上升 运动使对流发展,下沉支气流出流,加强边界层辐 合。锋面系统对天气的影响不仅表现在上升或下沉 气流的直接关系,而且表现在锋面次级环流引起的 锋生(消)对天气变化的影响(周文吉和吴宝俊, 1994)。

锋区南压时刻(图9b),锋后倾斜南侵的冷空 气明显增强。在低层锋区上空仍为非地转风低层辐 合高层辐散,在锋后仍为倾斜的中低层辐散中高层 辐合,且800 hPa辐散中心强度较上一时次明显增 强,并在锋后形成明显的倾斜次级环流。在低层锋 区南侧低空纬向风为次地转,北侧低空纬向风为超 地转,高空纬向风为次地转,仍有利于直接环流圈 的增强。此外,锋后500 hPa以下存在偏北气流回 流层,而锋前为较一致的偏南气流。因此,与一些 梅雨锋次级环流相佐(矫梅燕等,2006),此过程 只在锋后形成正热力直接环流圈,并未在锋前形成 间接环流圈。

3 浙中西梅雨锋合成特征

3.1 个例选取

为进一步了解该类浙中西梅雨锋暴雨的锋生及 环流结构。选取近10年在浙中西地区(图4黄色框 区)产生区域性暴雨(24h暴雨站点大于20个) 且形势相近的梅雨个例(表1)。选取条件如下: 500hPa中高纬度阻塞高压呈单阻型,阻高位于贝 加尔湖附近,在阻高东侧存在较深厚的冷涡或西风 槽;700hPa存在低涡切变或西风槽影响浙江省; 850hPa存在较明显切变线南压过程。

3.2 合成环流特征

表1梅雨锋暴雨合成时刻的平均形势场中,在 200 hPa(图10a),南亚高压较为强盛,120°E脊线 位于26°N附近。浙中西处于西风槽槽底和南亚高 压东北侧的分流区中,伴随强高空辐散。中纬度存 在大范围12h负变高,变高中心位于黄海附近。在 西风槽槽后存在西北气流显著增强区(A区),有 利于西风槽加强及槽底南压。在西风槽东侧存在西 南气流显著增强区(B区),这体现了槽底偏西气 流以及高空西南偏西急流的增强过程。而在典型个 例中(图略),200 hPa南亚高压较弱,且不存在明 表1 浙中西(浙江省中部和西部)梅雨锋暴雨合成个例

XU Yaqin et al. Analysis of Frontogenesis and Circulation Characteristics of the Meiyu Front with Heavy ... 1229

Table 1 Composite cases of Mei-yu frontal rainstorms in central and western Zhejiang Province									
		500 hPa 120°E	200 hPa 120°E						
		副高脊线的纬	南亚高压脊线						
个例暴雨时间	合成时刻	度位置	的纬度位置	锋生主要层次及贡献项					
2017年6月24日08时至25日08时	2017年6月24日14时	19°N	26.7°N	倾斜项和形变项(700 hPa),散度项(950 hPa)					
2015年6月17日20时至18日20时	2015年6月18日08时	22.7°N	26°N	倾斜项(750 hPa),形变和散度项(950 hPa)					
2015年6月30日20时至7月1日20时	2015年7月1日08时	19°N	27°N	倾斜项(750 hPa),散度项(950 hPa)					
2014年6月26日20时至27日20时	2014年6月27日08时	22.5°N	26°N	倾斜项(800 hPa),散度和形变项(950 hPa)					
2010年7月5日20时至6日20时	2010年7月6日08时	20.5°N	25.8°N	倾斜项(700 hPa),形变项(875 hPa)					
2010年6月19日20时至20日20时	2010年6月20日08时	21.5°N	24.3°N	形变项和散度项(800 hPa)					
2009年6月30日20时至7月1日20时	2009年7月1日02时	21°N	26.8°N	形变项(750 hPa),散度项和形变项(950 hPa)					



图 10 表1个例合成时刻平均的(a) 200 hPa、(b) 500 hPa和(c) 700 hPa位势高度场(实线,单位: dagpm)、12 h变高场(虚线,单位: dagpm)和变风场(箭头,单位: m s⁻¹),(d) 整层水汽通量(矢量和填色,单位: kg m⁻¹ s⁻¹)。方框A、B和C表示气流显著增强区, 图 a 中阴影表示 200 hPa 散度场(单位: 10⁻⁵ s⁻¹),图 d 中大矩形区域为小矩形区域的放大图

Fig. 10 Mean composite geopotential height (solid lines, units: dagpm), 12-h geopotential height variation (dashed lines, units: dagpm) and 12-h wind variation (vectors, units: $m s^{-1}$) at (a) 200 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 700 hPa. (d) Vertically integrated water vapor fluxes (vectors and shadings, units: $kg m^{-1}s^{-1}$) based on cases in table 1. The frames A, B, and C indicate the enhancement airflow zone, the shadings indicate 200-hPa divergence (units: $10^{-5} s^{-1}$) in Fig. a, the big rectangle is the magnified image of the small rectangle in Fig. d

6 期 No. 6

显分流区(分流区在100 hPa)。在500 hPa(图 10b), 副高120°E西伸脊线位于20.9°N附近, 浙中 西处于高空槽底和副高边缘584 dagpm线,具有良 好的水汽和不稳定能量条件。在中高纬度东北地区 存在低涡,12h变高中心在低涡南侧,体现了东北 低涡南落西风槽南压的特征。在典型个例中(图 略)副高和低涡位置与合成场大致相当,但浙江地 区 584 dagpm 线略偏北。在 700 hPa (图 10c),东 北地区存在低值中心,低槽南压至浙中地区。在浙 北地区存在东北风显著增强区(C区)。在典型个 例中(图略)整体环流与合成场相似,也存在这一 关键环流区,但其范围更大,强度更强。合成整层 平均水汽通量(图10d)可见,孟加拉湾东部存在 稳定的低压槽,在低压槽和副高的影响下,江南地 区盛行西南气流。暖湿气流沿着西南和偏南两条水 汽输送带将孟加拉湾和南海地区的水汽不断输送至 江南地区,形成水汽汇合。此外,东北地区存在低 值中心, 它将干冷空气往南输送, 从而在江南地区 形成宽广的干湿气流辐合区,有利于大尺度梅雨锋 锋生。浙江区域可见,浙中北存在风速辐合,合成 整层平均水汽通量大值区正位于浙江中部地区,达 700 kg m⁻¹ s⁻¹以上。典型个例中(图略)浙中地区 整层水汽通量大小与合成场相当,但范围更广,水 汽条件更为充沛。

3.3 合成锋生特征

合成的锋生水平分布(图11a)可见,暴雨时 刻,中低层切变线在过去12h南压约2个纬度, 700 hPa 切变线较 850 hPa 切变线偏北约1个纬度。 浙中西各锋生分解项的空间分布与典型个例类似, 倾斜项和散度项位于切变线南侧,形变项则围绕 850 hPa 切变线分布。散度项和形变项强度相当, 较倾斜项更强, 三者共同影响了浙中西关键区。合 成的区域平均锋生垂直分布(图11b)与典型个例 较类似,但低层锋生强度较中层更强。在低层 (825 hPa以下),总锋生函数随高度逐渐减小。各 分解项中, 散度项贡献略大于形变项, 倾斜项起锋 消作用。在825~600 hPa,总锋生函数随着高度先 增后减,最大位于750 hPa,该层倾斜项为主要贡 献因子,形变项也起了较大作用。在高层(600 hPa以上),总体为锋消作用,倾斜项为锋消作用 的主要贡献因子。因此,在浙中西单阻冷切型梅雨 锋暴雨过程中,应更多关注中层倾斜项,低层散度



图 11 (a) 表1个例合成时刻平均的 925 hPa 散度项(填色,单位: 10⁻⁹ K s⁻¹ m⁻¹)、850 hPa 形变项(红色等值线,单位: 10⁻⁹ K s⁻¹ m⁻¹)和 750 hPa 倾斜项(蓝色等值线,单位: 10⁻⁹ K s⁻¹ m⁻¹),绿(黑)实线表示合成时刻的 850 hPa (700 hPa)切变线,绿(黑)虚线表示合成 前 12 h 的 850 hPa (700 hPa)切变线。(b)合成区域(图a 黄色框)平均总锋生函数及各分解项垂直分布(单位: 10⁻⁹ K s⁻¹ m⁻¹) Fig. 11 (a) Mean composite divergence term (shadings, units: 10⁻⁹ K s⁻¹ m⁻¹) at 925 hPa, deformation term (red contours, units: 10⁻⁹ K s⁻¹ m⁻¹) at 850 hPa, tilting term (blue contours, units: 10⁻⁹ K s⁻¹ m⁻¹) at 750 hPa based on cases in table 1. Green (black) solid lines indicate 850-hPa (700-hPa) shear lines at composite time, green (black) dashed lines indicate 850-hPa (700-hPa) shear lines at 12-h prior composite time. (b) Composite area (yellow frame in Fig. a) averaged frontogenesis function and its decomposition items (units: 10⁻⁹ K s⁻¹ m⁻¹)

No. 6 XU Yaqin et al. Analysis of Frontogenesis and Circulation Characteristics of the Meiyu Front with Heavy ... 1231

项和中低层形变项的强度和空间分布。

4 小结与讨论

本文以2016年6月15日一次浙中西典型单阻 冷切型梅汛期暴雨过程为代表,研究运动学锋生函 数和分解的形变项、散度项、倾斜项与强降水之间 的关系,以及梅雨锋非地转环流和(非)平衡环流 的特征。并进一步选取多个相似个例对锋生和环流 特征进行合成分析,从而了解该类梅雨锋暴雨的锋 生结构和环流特征。这对浙江梅汛期暴雨预报和防 灾减灾具有重要的指示和参考意义。结果表明:

(1)此次浙中西典型梅雨处于高空槽和副高边缘,随着低层低涡南摆及切变南压,在浙中西产生区域性暴雨天气。强降水区与中低层锋生区有较好的对应。在锋区维持时,强降水区伴随中层倾斜锋生和形变锋生;在锋区南压时,强降水区伴随中层倾斜锋生和低层水平锋生。

(2) 非地转风发展趋势及(非)平衡流的空间 分布对锋生发展及系统演变有一定的参考性。在典 型个例中,低层梅雨锋北侧为超地转偏西气流,南 侧为非地转东南气流,它们分别影响北侧非平衡偏 北气流和南侧平衡西南气流的发展,从而影响锋生 系统。

(3)锋生作用有利于地转偏差的改变,在典型 个例中,锋区存在低层地转偏差辐合、高层辐散作 用的上升运动,形成次级环流上升支。锋后存在低 层辐散、高层辐合的下沉运动,形成次级环流下沉 支。此外,锋前低空纬向风为次地转,而锋后低空 纬向风为超地转,高空纬向风为次地转,这进一步 促进了次级环流的发展,与锋生形成正反馈作用。

(4) 合成环流场中,200 hPa 西风槽槽后及槽 前分别存在西北气流和西南气流显著增强区,高空 辐散出流条件较典型个例更好;500 hPa 副高120°E 西伸脊位于20.9°N,浙中地区处于高空槽底584 dagpm线;700 hPa 浙北地区存在明显的东北变风 场,典型个例中更为明显;江南地区处于宽广的干 湿气流辐合区,水汽通量大值带位于浙中地区。

(5)合成锋生各分解项的水平及垂直分布与典型个例较类似。水平分布中,中层倾斜项和低层散度项均位于中低层切变线南侧,形变项则位于低层切变线两侧。区域平均垂直分布中,低层锋生主要由散度项贡献,形变项次之,倾斜项则起负作用;

中层锋生主要由倾斜项贡献,形变项次之; 高层锋 消主要由倾斜项贡献。此外,合成场的低层锋生强 度较中层更强,典型个例反之。

本文对浙中西梅雨锋锋生及环流特征进行了初 步分析,由于再分析资料时间分辨率的局限性,锋 生环流演变特征和形成机理还有待深入研究。下一 步还需利用中尺度数值模式进行高分辨率数值模 拟,深入研究中小尺度锋生演变发展及环流特征。 并适当增加相似个例合成样本,以及影响浙中西地 区其它类型梅汛期暴雨过程的分类比对研究。

参考文献(References)

- 陈丽芳, 高坤. 2006. 梅雨锋结构的数值模拟 [J]. 气象学报, 64(2): 164-179. Chen Lifang, Gao Kun. 2006. The simulation of the uneven characteristics of Meiyu front structure [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64(2): 164-179. doi: 10.11676/ qxxb2006.016
- Chen, G T, Wang C, Chang S. 2008. A diagnostic case study of Mei-yu frontogenesis and development of wavelike frontal disturbances in the subtropical environment [J]. Mon. Wea. Rev., 136: 41–61. doi:10. 1175/2007mwr1966.1
- Chen T J, Wang C C, Wang A H. 2007. A case study of subtropical frontogenesis during a blocking event [J]. Monthly Weather Review, 135(7): 2588–2609. doi:10.1175/mwr3412.1
- Chen Y L, Tseng S F. 2000. Comments on "The intensification of the low-level jet during the development of mesoscale convective systems on a Mei-yu front" [J]. Monthly Weather Rev, 128(2): 2227–2231. doi:10.1175/1520-0493(2000)128<0495:cotiot>2.0.co;2
- Cui X P, Gao S T, Wu G X. 2003. Up-sliding slantwise vorticity development and the complete vorticity equation with mass forcing [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 20(5): 825–836. doi:10.1007/ bf02915408
- 丁一汇,柳俊杰,孙颖,等. 2007. 东亚梅雨系统的天气一气候学研究
 [J]. 大气科学, 31(6): 1082–1101. Ding Yihui, Liu Junjie, Sun Ying, et al. 2007. A study of the synoptic-climatology of the Meiyu system in East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(6): 1082–1101. doi: 10.3878/j. issn. 1006-9895.2007. 06.05
- 郭英莲, 王继竹, 李才媛, 等. 2014. 锋生作用对 2011 年梅汛期湖北暴雨的影响 [J]. 气象, 40(1): 86-93. Guo Yinglian, Wang Jizhu, Li Caiyuan, et al. 2014. Effect of frontogenesis on rainstorm in Hubei during Meiyu period 2011 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 40(1): 86-93. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.01.010
- 侯俊, 管兆勇. 2013. 华东地区6~7月锋生的气候学特征及环流结构 [J]. 气象学报, 71(1): 1-22. Hou Jun, Guan Zhaoyong. 2013. Climatic features of frontogenesis in East China and their related circulation patterns during the early summer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 71(1): 1-22. doi:10.11676/qxxb2013.001

Jiang J Y, Ni Y Q. 2004. Diagnostic study on the structural

characteristics of a typical Meiyu front system and its maintenance mechanism [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 21(5):802–813. doi:10.1007/bf02916376

- 矫梅燕,毕宝贵,鲍媛媛,等. 2006. 2003 年 7月 3~4 日淮河流域大暴 雨结构和维持机制分析 [J]. 大气科学, 30(3): 475-490. Jiao Meiyan, Bi Baogui, Bao Yuanyuan, et al. 2006. Thermal and dynamical structure of heavy rainstorm in the Huaihe River basin during 3-4 July 2003 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(3): 475-490. doi: 10.3878/j. issn. 1006-9895.2006. 03.11
- 刘建勇, 谈哲敏, 张熠. 2012. 梅雨期3 类不同形成机制的暴雨 [J]. 气 象 学报, 70(3): 452-466. Liu Jianyong, Tan Zhemin, Zhang Yi. 2012. Study of the three types of torrential rains of different formation mechanism during the Meiyu period [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70(3): 452-466. doi: 10.11676/ qxxb2012.038
- Luo Y L, Gong Y, Zhang D L. 2014. Initiation and organizational modes of an extreme-rain-producing mesoscale convective system along a Mei-yu front in East China [J]. Mon. Wea. Rev., 142(1): 203–221. doi:10.1175/mwr-d-13-00111.1
- Miller J E. 1948. On the concept of frontogenesis [J]. Journal of Meteorology, 5(4): 169–171. doi: 10.1175/1520-0469(1948)005< 0169:OTCOF>2.0.CO;2
- Oue M, Uyeda H, Shusse Y. 2010. Two types of precipitation particle distribution in convective cells accompanying a Baiu frontal rainband around Okinawa Island, Japan [J]. J. Geophys. Res., 115 (D2): D02201. doi:10.1029/2009jd011957
- 孙淑清, 杜长萱. 1996. 梅雨锋的维持与其上扰动的发展特征 [J]. 应 用气象学报, 7(2): 153-159. Sun Shuqing, Du Changxuan. 1996. The maintenance of Mei-yu front and development associated disturbance [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorlolgy (in Chinese), 7(2): 153-159.
- 孙建华,赵思雄. 2003. 1998年夏季长江流域梅雨期环流演变的特殊 性探讨 [J]. 气候与环境研究, 8(3): 291-306. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2003. A study of special circulation during Meiyu season of the Yangtze River basin in 1998 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8(3): 291-306. doi:10.3878/j.issn.1006-9585. 2003.03.04
- 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 1958. 东亚的梅雨期与亚洲上空大气环流 季节变化的关系 [J]. 气象学报, 29(2): 119–134. Tao Shiyan, Zhao Yujia, Chen Xiaomin. 1958. The relationship between May-yü in Far East and the behaviour of circulation over Asia [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 29(2): 119–134. doi: 10.11676/ qxxb1958.014
- 王伏村,许东蓓,姚延锋,等. 2016. 一次陇东大暴雨的锋生过程及倾 斜涡度发展 [J]. 高原气象, 35(2): 419-431. Wang Fucun, Xu Dongbei, Yao Yanfeng, et al. 2016. Frontogenesis process and slantwise vorticity development of a rainstorm process in the eastern

Gansu [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35(2): 419-431.

- 王建捷, 陶诗言. 2002. 1998 梅雨锋的结构特征及形成与维持 [J]. 应 用气象学报, 13(5): 526-534. Wang Jianjie, Tao Shiyan. 2002. Structure and formation of Mei-yu front in 1998 [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 13 (5): 526-534.
- 尹东屏,张备,孙燕,等. 2010. 2003 年和 2006 年梅汛期暴雨的梅雨 锋特征分析 [J]. 气象, 36(6): 1-6. Yin Dongping, Zhang Bei, Sun Yan, et al. 2010. Analysis of Meiyu front characters of Huaihe valley rainstorm [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36(6): 1-6.
- Zhang M, Zhang D L. 2011. Subkilometer simulation of a torrentialrain-producing mesoscale sonvective system in East China. Part I: Model verification and convective organization [J]. Monthly Weather Review, 140(1):184–201. doi:10.1175/mwr-d-11-00029.1
- 张庆云, 郭恒. 2014. 夏季长江淮河流域异常降水事件环流差异及机 理研究 [J]. 大气科学, 38(4): 656-669. Zhang Qingyun, Guo Heng. 2014. Circulation differences in anomalous rainfall over the Yangtze River and Huaihe River valleys in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(4): 656-669. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13240
- 郑婧, 孙素琴, 许爱华, 等. 2015. 强锋区结构的梅雨锋短时暴雨形成 和维持机制 [J]. 高原气象, 34(4): 1084-1094. Zheng Jing, Sun Suqin, Xu Aihua, et al. 2015. Mechanism of formation and maintenance for a torrential rain on strong Meiyu front [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34(4): 1084-1094.
- 郑永光, 陈炯, 葛国庆, 等. 2007. 梅雨锋的典型结构、多样性和多尺 度特征 [J]. 气象学报, 65(5): 760-772. Zheng Yongguang, Chen Jiong, Ge Guoqing, et al. 2007. Typical structure, diversity and multiscale characteristics of Meiyu front [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65(5): 760-772. doi:10.11676/qxxb2007.072
- 郑永光, 陈炯, 葛国庆, 等. 2008. 梅雨锋的天气尺度研究综述及其天 气学定义 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 44(1): 157-164. Zheng Yongguang, Chen Jiong, Ge Guoqing, et al. 2008. Review on the synoptic scale Meiyu front system and its synoptics' definition [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 44(1): 157-164. doi:10.13209/j.0479-8023.2008.027
- 周文吉, 吴宝俊. 1994. 梅雨锋动力锋生方程组及其应用 [J]. 应用气 象学报, 5(4): 501-505. Zhou Wenji, Wu Baojun. 1994. Dynamic frontogenetical equations of Meiyu front and its application [J]. Journal of Applied Meterological Science (in Chinese), 5(4): 501-505.
- Zhou Y S, Gao S T, Shen S S P. 2004. A diagnostic study of formation and structures of the Meiyu front system over East Asia [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 82(6): 1565–1576. doi: 10. 2151/jmsj.82.1565
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 2007. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 99-100. Zhu Qiangen, Lin Jingrui, Shou Shaowen, et al. 2007. Weather Theory and Method (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 99-100.