

孙建华, 卫捷, 傅慎明, 等. 2018. 江淮流域持续性强降水过程的多尺度物理模型 [J]. 大气科学, 42 (4): 741–754. Sun Jianhua, Wei Jie, Fu Shenming, et al. 2018. The multi-scale physical model for persistent heavy rainfall events in the Yangtze–Huaihe River valley [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (4): 741–754, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17246.

江淮流域持续性强降水过程的多尺度物理模型

孙建华^{1,2,3} 卫捷¹ 傅慎明¹ 张元春¹ 汪汇洁^{4,5}

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 95968 部队气象台, 北京 100097

5 空军装备研究院航空气象防化研究所, 北京 100085

摘 要 本文对江淮流域持续性暴雨事件 (PHREs) 的多尺度物理模型和能量转换特征以及青藏高原东部对流系统东移影响下游地区降水的研究成果进行了总结。从欧亚大陆 Rossby 波列能量频散的角度揭示了江淮流域 PHREs 中纬度系统槽脊稳定的机制, 定量分析了冷暖空气的源地和输送路径, 提出了江南型和江北型 PHREs 的多尺度物理模型。从天气尺度和次天气尺度之间的能量转换角度呈现了不同尺度系统相互作用的物理图像, 指出背景场的能量供给是直接触发暴雨的次天气尺度系统维持的最重要因子, 尤其是在对流层的低层, 动能的降尺度级串 (即能量由背景场传递给次天气尺度系统) 最强。研究表明青藏高原东部对流系统东移影响江淮流域的降水是一系列天气系统配合和活跃的结果, 主要由青藏高原和四川盆地、二级地形和东部平原之间的热力环流、西南涡、二级地形以东中尺度涡旋和对流系统的共同影响。除了本文总结的内容, 还有一些影响 PHREs 的因子值得深入研究, 多尺度相互作用中的 Rossby 波源及其波列如何影响天气系统, 中尺度系统对其背景场的能量反馈等。

关键词 持续性暴雨事件 (PHREs) 多尺度物理模型 能量转换 波作用通量

文章编号 1006-9895(2018)04-0741-14

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17246

The Multi-scale Physical Model for Persistent Heavy Rainfall Events in the Yangtze–Huaihe River Valley

SUN Jianhua^{1,2,3}, WEI Jie¹, FU Shenming¹, ZHANG Yuanchun¹, and WANG Huijie^{4,5}

1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 Meteorological Observatory, Unit 95959, Beijing 100097

5 Institute of Aeronautical Meteorology, Air Force Academy of Equipment, Beijing 100085

Abstract The multi-scale physical model for persistent heavy rainfall events (PHREs) in the Yangtze–Huaihe River Valley (YHRV), the energy conversion between systems of various scales, and the effects of eastward propagating convection systems from the eastern edge of Tibetan Plateau (TP) on precipitation in regions downstream have been summarized in this paper. To reveal the mechanisms sustaining the quasi-stable middle-latitude troughs and ridges over

收稿日期 2017-09-29; 网络预出版日期 2018-03-29

作者简介 孙建华, 女, 1972 年生, 研究员, 主要从事中尺度气象学研究。E-mail: sjh@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41375053、41675045、41775046

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41375053, 41675045, and 41775046)

Eurasia, we analyze the energy dispersion of Rossby waves. The sources of the cold and warm air and their main transport paths are also discussed. The multi-scale physical model for PHREs in the YHRV is proposed. Quantitative calculation of energy conversion between systems of different scales show that the large-scale background circulation is the main energy source maintaining the sub-synoptic and/or mesoscale systems that directly induce heavy precipitation. Energy is transferred from the background circulation to the precipitation-related smaller-scale system through the downscaled energy cascade process of kinetic energy, which maximizes in the lower troposphere. The eastward propagation of convective systems from the eastern edge of the TP to the eastern coastal region is primarily attributed to a series of convective activities associated with several systems from west to east, including the mountain-plain solenoid between the Tibetan Plateau and Sichuan Basin, the southwest vortex, the mountain-plain solenoid between the second-step terrain and the eastern plains, the mesoscale vortices, and convective systems to the east of the second-step terrain. In addition to the factors summarized in this paper, the PHREs in YHRV are also affected by many other factors, such as the Rossby wave sources associated with the multi-scale interaction, the effects of Rossby waves on synoptic systems, and the energy feedback of the mesoscale systems on their large-scale background circulations. These factors will be investigated further in the future.

Keywords Persistent heavy rainfall events (PHREs), Multi-scale physical model, Energy conversion, Wave activity fluxes

1 引言

持续性暴雨事件 (Persistent Heavy Rainfall Events, 简称 PHREs) 经常造成洪涝、城市内涝、山体滑坡、泥石流等灾害, 对我国的经济建设和人民生命财产安全构成极大威胁。历史上有多次由 PHREs 造成的洪灾事件, 例如 1998 年和 1999 年的长江流域洪涝 (陶诗言等, 2001, 2004; 赵思雄等, 2004; 齐艳军等, 2016), 1991 年、2003 年和 2007 年的淮河流域洪涝 (丁一汇, 1993; 张庆云等, 2004)。为深入研究 PHREs, 揭示这类事件的发生发展机理, 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 设立了“我国持续性重大天气异常形成机理与预测理论和方法研究”专项, 该项目的目标之一是研究产生持续性重大天气异常 (包括夏季持续性强降水) 持续稳定的多尺度天气系统结构配置和演变特征, 提出我国持续性异常天气形势形成的多尺度系统相互作用的物理模型, 以及揭示持续稳定天气形势下中尺度系统不断形成发展的机理。

丁一汇 (1993) 指出有利的气候背景、持续稳定的大尺度环流条件、低频振荡、不断东移的天气尺度低压扰动、稳定的梅雨锋以及频繁活动的中尺度系统等不同时空尺度系统的相互作用会产生持续性暴雨。东亚夏季风和大气低频振荡对于 PHREs 的影响, 已经有不少研究, 且成果丰富, 然而在多尺度系统相互作用的物理模型以及持续稳定天气形势下天气尺度和中尺度系统不断形成发展的机理研究较少。

Zhang et al. (2002) 提出西太平洋副热带高压、

南海季风涌、中高纬度冷空气和青藏高原中尺度对流系统, 这四个系统同时处于活跃阶段时, 容易造成长江流域大范围、长时间的暴雨。这个天气学模型定性给出了影响长江流域持续性暴雨形成的主要系统或者影响因子, 但没有确定水汽和干冷空气的具体源地和输送路径, 也没有揭示青藏高原对流系统东移影响下游的对流或涡旋系统活动的机理。本文针对江淮流域夏季的 PHREs, 从多尺度系统相互作用的物理模型、持续稳定天气形势下中尺度系统不断形成发展的机理、以及地形影响等几个方面对最近的研究进行了总结。

2 江淮流域 PHREs 的分类和环流特征

对于持续性暴雨事件, 不同的研究者有不同的定义, 根据侧重点的不同, 可分为针对单站定义和针对区域定义两大类。因为单站的影响范围小, 现在的研究基本都针对区域进行定义。Chen and Zhai (2013, 2014) 采用邻近 3 个站出现暴雨, 持续时间 3 天以上为一次持续性暴雨事件, 针对我国东部地区 1951~2010 年共挑选出 74 个区域持续性暴雨个例, 这些个例大部分发生在我国南方, 且主要发生在江淮流域和华南地区。由于基于站点个数的挑选无法考虑持续性降雨的范围大小, 汪汇洁等 (2014) 采用 Cressman 客观分析方法将中国气象局国家气象中心提供的 1981~2011 年中国 752 站日降水资料插值到 0.25° (纬度) $\times 0.25^\circ$ (经度) 格点上, 利用该资料挑选持续性暴雨事件。江淮区域持续性暴雨事件的定义为: 至少连续 5 天有不小于 10 个格点 ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的经纬度网格) 出现 ≥ 50

mm 的日降水，且相邻两日雨带重合率 $CRB \geq 20\%$ （中间允许 1 天中断）。这个分类标准可综合考虑影响降雨过程的天气系统的持续性、移动性和影响范围。根据定义挑选出我国江淮区域（ $26^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ， $112^{\circ}\text{E} \sim 122.5^{\circ}\text{E}$ ；图 1），1981~2011 年的非台风影响的 PHREs 个例共 35 例。采用场相关的方法，将这些个例分为江南型（主雨带在长江以南）、江北型（主雨带在长江以北）和沿江型（主雨带在长江沿江地区）三种类型。由于沿江型个例环流的共同特征不显著（汪汇洁等，2014），主要针对江南型和江北型开展了环流特征、水汽源地和输送路径、能量特征等方面的研究。

对于江南型和江北型的环流特征在汪汇洁（2014）中有详细的描述，这里只给出两种类型环流特征的主要异同。江南型 PHREs 持续期间，200 hPa 上（图 2a），中高纬度合成高度距平场从北大西洋东岸大不列颠岛附近开始，依次向东经地中海、高加索山、伊朗高原、蒙古高原到达江淮区域呈现近似纬向的正负相间的距平中心，与各中心对应的是高度场的槽脊系统及其活动强度的异常。这些槽脊的稳定维持决定了冷空气的路径和强度。通过与历史同期气候态比较，江南型 PHREs 发生期间，作为波导的高空副热带急流比气候态明显偏

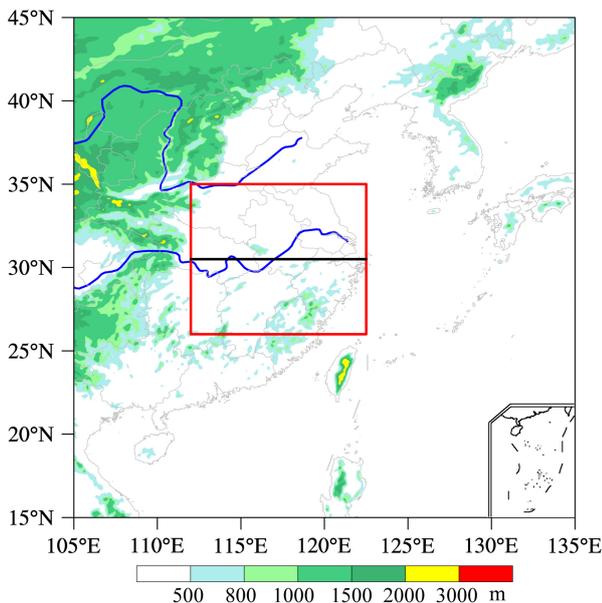


图 1 东亚地形高度分布（单位：m），红色框为本文选取的江淮区域，其中的黑线将江淮流域分成江南和江北部分

Fig. 1 Distribution of topography (shadings, units: m). The red rectangle represents the YHRV (Yangtze-Huaihe River Valley), and the black solid line divides the YHRV into the northern and southern portions

南，南压高压偏西偏强，江淮地区高空出现显著异常的气旋性扰动，与低层显著偏强的锋面低值系统相配合，为影响江南型 PHREs 的关键系统。500 hPa 西太平洋副热带高压异常偏南偏强，其西端主要位于我国南海（图略）。江南型 PHREs 中，中高纬度行星环流呈现的纬向正负相间的位势高度异常和对应槽脊活动异常与 Rossby 波能量频散有关。Rossby 波源位于大西洋上空，大部分能量向东南频散到地中海上空后折向东，大致沿着 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}\text{N}$ 传播一直到达江淮区域，在江淮区域出现显著的能量辐合，对应该区域斜槽的发展（图 3a）。

江北型 PHREs 持续期内，200 hPa 上，欧亚大陆上空的位势高度距平分布与江南型的纬向波列状分布明显不同。在 60°E 以东的亚洲大陆上空，在高、中、低纬地区表现为正、负、正的位势高度带状异常分布，其中高纬度地区的位势高度正异常中心位于泰梅尔半岛（图 2b）。对应的环流形势为高纬度分别在乌拉尔山至喀拉海、我国东北至西伯利亚东岸为高脊，贝加尔湖为宽广的浅槽，高空急流和中纬度气流平直使得冷空气只能到达江淮流域的北部，而副热带地区南亚高压的偏强偏东和西太平洋副热带高压偏强相向而行（图略），使得西太平洋副热带高压偏西偏北，有利于西南暖湿气流得以北上与冷空气交汇于长江以北地区。江北型 PHREs 中，对流层中高层 Rossby 波作用通量在欧亚大陆中高纬地区传播，部分能量在乌拉尔山东侧堆积，加强和维持乌拉尔山阻塞高压的异常发展，还有部分能量继续向中纬度频散，在日本海—江淮北部辐合加强江淮北部的负异常中心。同时，在对流层中低层还有来自低纬度的南海和东海地区的 Rossby 波作用通量，从西太平洋向北频散，在江淮区域和日本海附近辐合，利于梅雨锋系统的发展（图 4）。江北型沿纬向急流波导的波通量输送比江南型弱，但中低层的经向波导比江南型更强。李明刚等（2016）发现在年代际尺度和年际尺度上，Rossby 波列的波能东传影响长江中下游降水的异常持续，与本研究的結果一致。

孙建华等（2016）采用 HYSPLIT 轨迹模式对江淮流域的江南型和江北型 PHREs 的水汽源地和输送路径进行了研究。江南型 PHREs 水汽主要由源自印度半岛以南的热带印度洋的西南路径和来自印度尼西亚与中国南海的偏南路径输送到江淮流域。而江北型 PHREs 的水汽路径除了与江南型

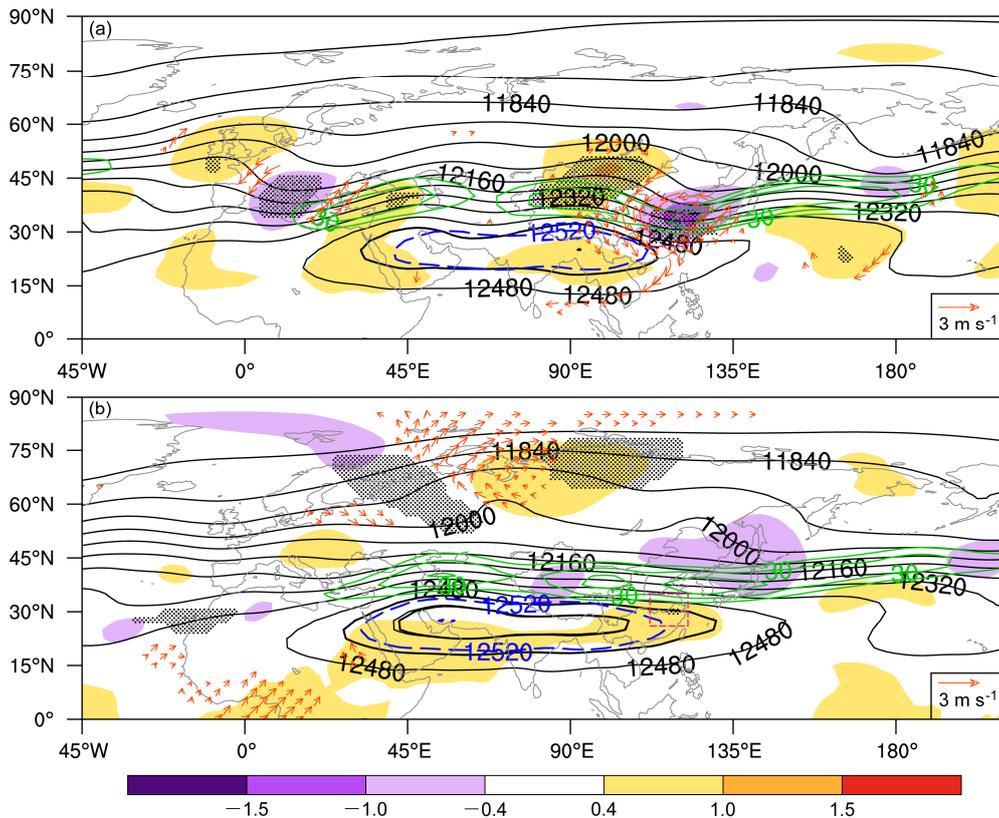


图2 江淮流域 (a) 江南型和 (b) 江北型 PHREs 的 200 hPa 合成位势高度场 (黑色线, 单位: gpm) 和标准化距平场 (填色), 粉色矩形框为研究的江淮流域, 蓝色虚线为气候平均的南亚高压, 绿色实线为 200 hPa 的急流带 (风速 $\geq 25 \text{ m s}^{-1}$), 打点阴影区和橘红色箭头区分别为高度场和风向异常通过 95% 信度水平的显著性检验 (t -test) 的区域

Fig. 2 Composite maps of geopotential height (black contours, units: gpm) and standard deviation (shadings) at 200 hPa corresponding to PHREs (Persistent Heavy Rainfall Events) in (a) the southern portion and (b) the northern portion of YHRV. Pink dashed box indicates the YHRV. Blue dashed lines denote the climatological mean of South Asia high. Green solid lines indicate the upper level jet (wind speeds $\geq 25 \text{ m s}^{-1}$) at 200 hPa. Dots and orange arrows areas show height and wind anomalies respectively significant at the 95% confidence level based on the t -test

类似的两条路径外, 还有来自西太平洋的东南路径水汽输送。江淮流域 PHREs 过程中水汽的输送主要受索马里越赤道急流、孟加拉湾南部和印尼群岛附近越赤道气流, 以及西太平洋副热带高压的影响。Hui and Fang (2016a, 2016b) 对两个典型个例的研究指出不同时间尺度低纬低频振荡的共同作用导致西北太平洋副热带高压偏强偏西, 其他研究也表明低频振荡对我国南方降水的水汽输送有显著影响 (王淑莉等, 2016; 齐艳军等, 2016)。江南型 PHREs 发生前期, 北大西洋及其东岸的环流调整使得对流层中高层的干冷空气通过中纬度槽脊活动输送至江淮区域。干冷空气主要通过源自地中海—欧洲平原的西北路径和来自蒙古高原的东北路径两条路径进入江淮地区, 西伯利亚地区对流层中高层的阻塞形势及东北亚地区的稳定低槽有利于干冷空气的堆积, 气流经渤海—黄海区域得到

水汽补充, 然后输送至江淮区域, 这条路径也有明显的水汽输送。而江北型 PHREs 干冷空气只有西北路径, 与江南型 PHREs 的西北路径干冷空气输送相比, 冷空气的源地相对略近, 层次略低。

通过对江南型和江北型 PHREs 的环流特征、Rossby 波列能量频散以及冷暖空气源地、输送路径分析, 给出江南型和江北型 PHREs 的多尺度物理模型 (图 5)。江南型 PHREs 持续期间, 对流层中高层的中高纬度行星环流呈现显著的纬向正负相间的位势高度异常分布, 这种异常分布与高度场上的槽脊位置和强度均对应 (图 5a)。Rossby 波源位于北大西洋上空, 斜压波包经过西伯利亚的北支波导和南亚副热带急流的南支波导向下游频散, 与中低层自南海和东海向北频散的能量一并在江南区域强烈辐合。江北型 PHREs 持续期内, 亚洲大陆中高层的行星环流呈现显著的经向正负相间的位势

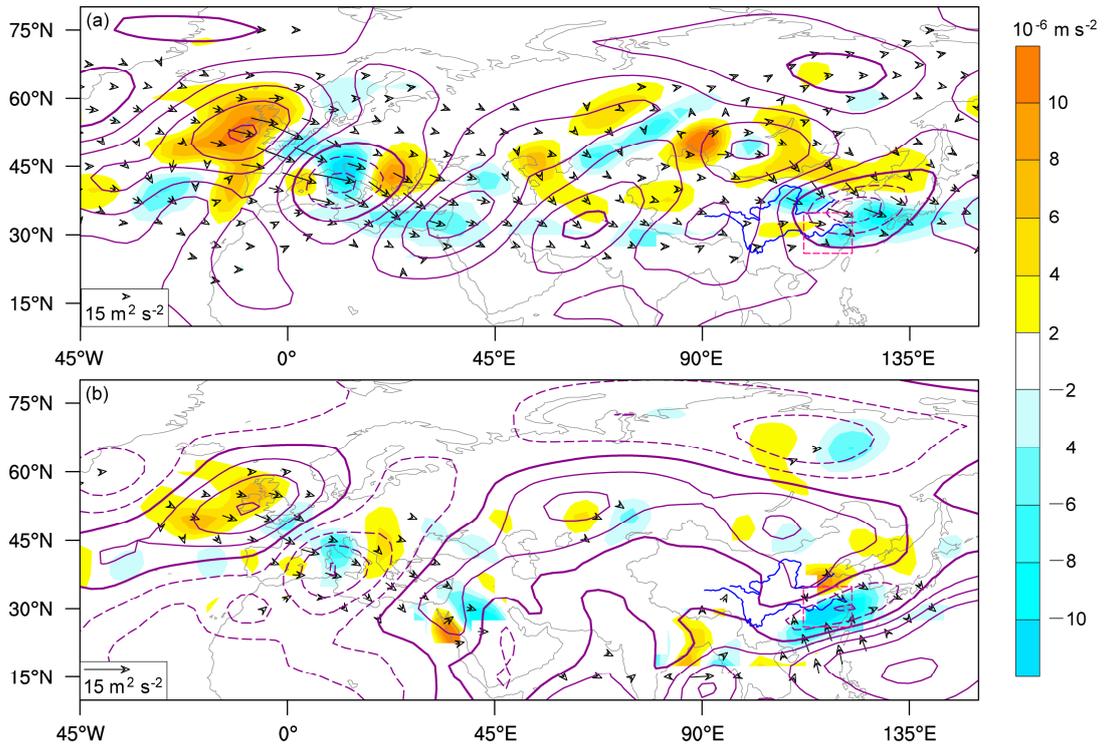


图3 江南型 PHREs 的 (a) 300 hPa 和 (b) 700 hPa 合成波作用通量 (箭头, 单位: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) 及其散度 (阴影, 单位: 10^{-6}m s^{-2})、流函数距平 (紫色等值线, 等值线的间隔为 $2 \times 10^6 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$, 粗实线为零线)

Fig. 3 Composite horizontal components of wave activity fluxes (arrows, units: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$), the divergence of wave activity fluxes (shadings, units: 10^{-6}m s^{-2}), and corresponding stream function anomalies (purple contours, isolines are drawn at $2 \times 10^6 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ interval, and zero lines are bold) associated with the PHREs in the southern portion of YHRV at (a) 300 hPa and (b) 700 hPa

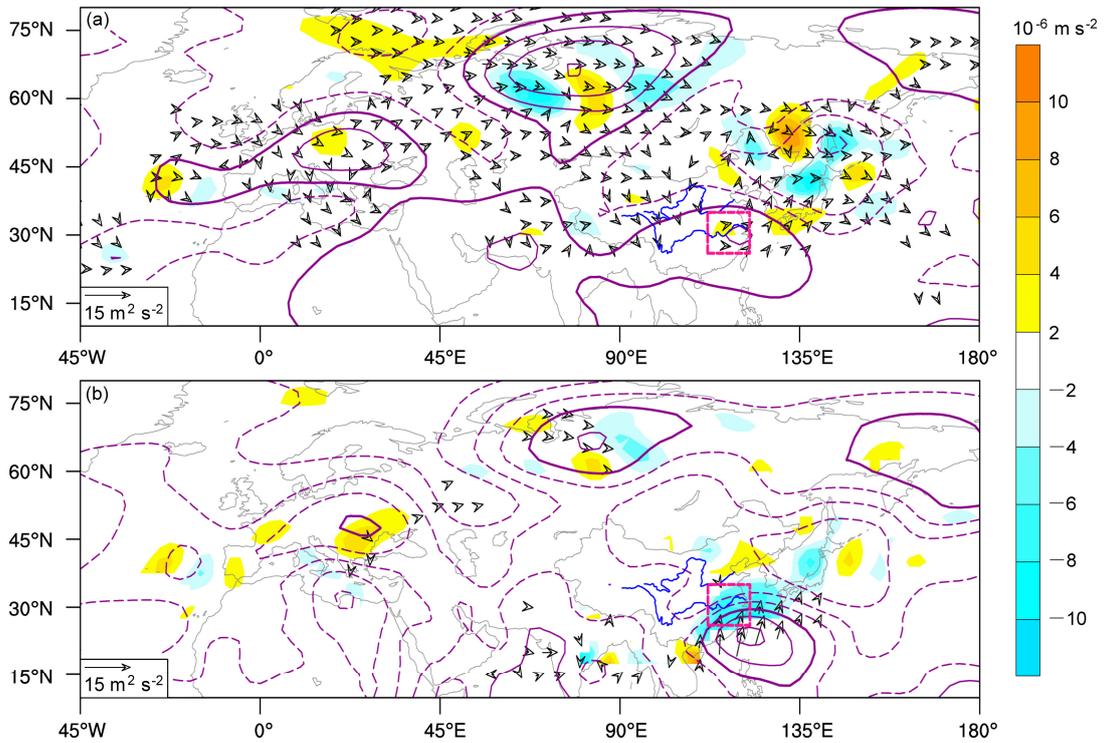


图4 同图3, 但为江北型

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for PHREs in the northern portion of YHRV

高度带状异常分布。沿纬向急流波导的波通量输送比江南型弱，而中低层的经向波导比江南型更强（图 5b）。江南型事件的干冷空气输送主要源于北大西洋和欧洲的西北路径，以及西伯利亚至鄂霍次克海的东北路径，而江北型事件中冷空气输送主要依赖于欧洲的西北路径输送。江南型事件的水汽输送主要源自印度半岛以南的热带印度洋的西南路径和来自印度尼西亚与中国南海的偏南路径；而江北型事件的水汽输送路径除如上两条外，还有来自西太平洋副热带高压西南侧的东南路径输送。Chen and Zhai (2014) 针对江淮地区的持续性过程

根据阻塞高压的类型分为双阻型和单阻型，并给出了环流模型图，他们主要考虑了南亚高压，高纬度阻塞高压、西风急流和西太平洋副热带高压的作用。

3 PHREs 的能量转换和不同尺度系统的相互作用

能量的转换在暴雨系统的发生发展中有重要的作用，但我们对 PHREs 中不同尺度系统之间的能量转换过程仍不清楚？基于汪汇洁等 (2014) 对江淮流域 PHREs 的挑选个例和分类，Zhang et al. (2017b) 利用基于时间尺度分离的能量收支方程

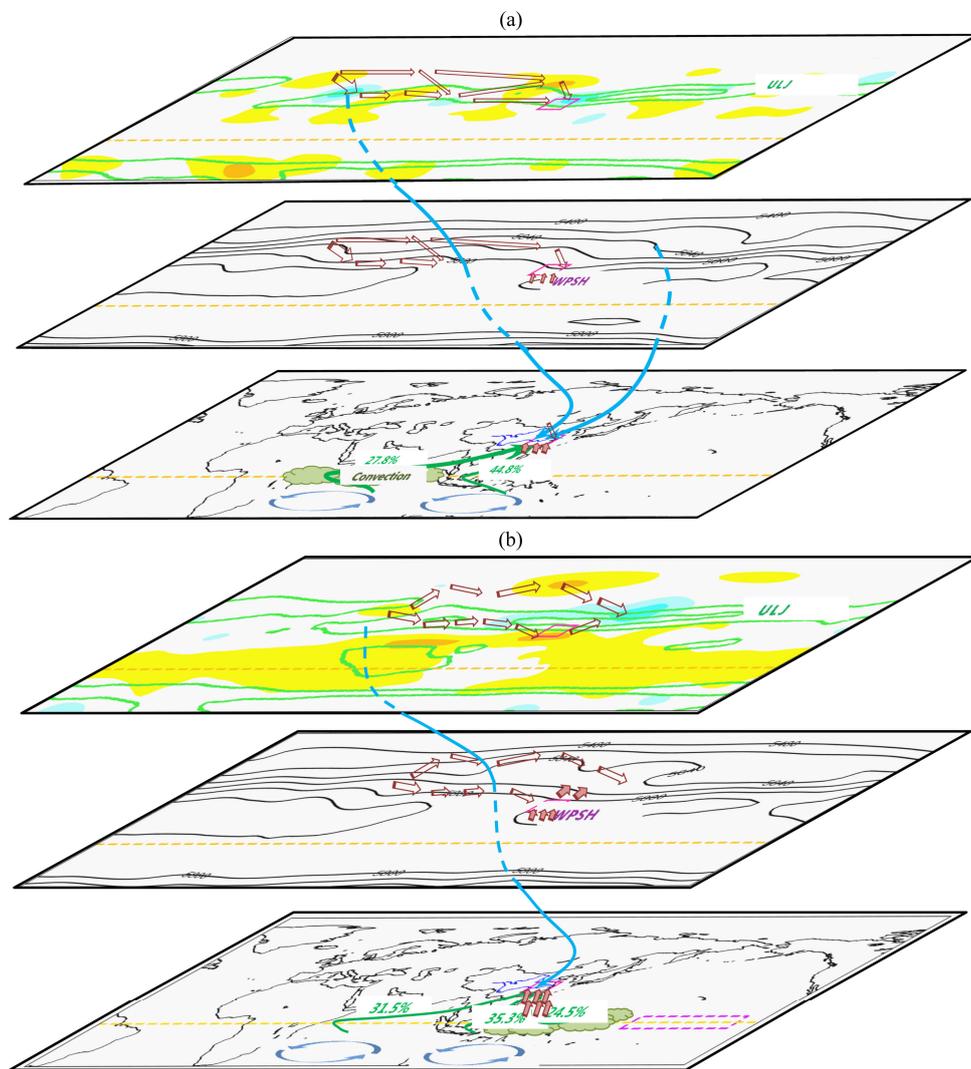


图 5 江淮地区 (a) 江南型和 (b) 江北型 PHREs 的多尺度天气学概念模型图。(a、b) 中上层为 200 hPa 上的位势高度距平 (阴影: 黄色和蓝色分别代表正值和负值; 单位: gpm) 和高空急流 (绿色实线, 风速 $\geq 25 \text{ m s}^{-1}$); 中层为 500 hPa 的位势高度 (黑色实线, 单位: gpm); 下层为对流层低层的水汽 (绿色粗实线) 和冷空气 (蓝色粗线) 的路径。粗粉色箭头为 Rossby 波列能量频散的路径

Fig. 5 Multi-scale schematic model for PHREs (a) in the southern portion of YHRV and (b) in the northern portion of YHRV. In (a, b), upper panel: the anomaly of geopotential height at 200 hPa (shadings, yellow and blue represent positive and negative values respectively) and upper-level jet (green line, wind speed $\geq 25 \text{ m s}^{-1}$); middle panel: geopotential height at 500 hPa (black solid lines, units: gpm); lower panel: the lower troposphere water vapor (green solid line) and cold air (blue line) paths. The bold pink arrow is the path of energy dispersion of the Rossby wave train

(Murakami, 2011) 深入探讨了江淮流域 PHREs 能够持续发生的原因 (图 6)。该研究将原始的气象要素分成了次天气尺度扰动场和背景场, 扰动场的能量大值区主要位于对流层的中低层 (图略), 与降水的直接接触系统如切变线、低涡等系统相对应。类似于沿江型 PHREs 的环流特征, 沿江型的能量特征也介于江南型和江北型之间, 是一个混合

的状态, 因此不再赘述。在 PHREs 的过程中, 直接引发强降水的扰动场和其背景场之间存在显著的相互作用, 整体而言, 江北型和江南型 PHREs 中都存在显著的动能降尺度级串, 也就是由背景场的动能 (K_M) 经过相互作用动能 (K_I) 将能量传递给扰动场的动能 (K_T)。这条动能的降尺度能量路径在整层的积分中有所表现 (图 6 的第一行), 在

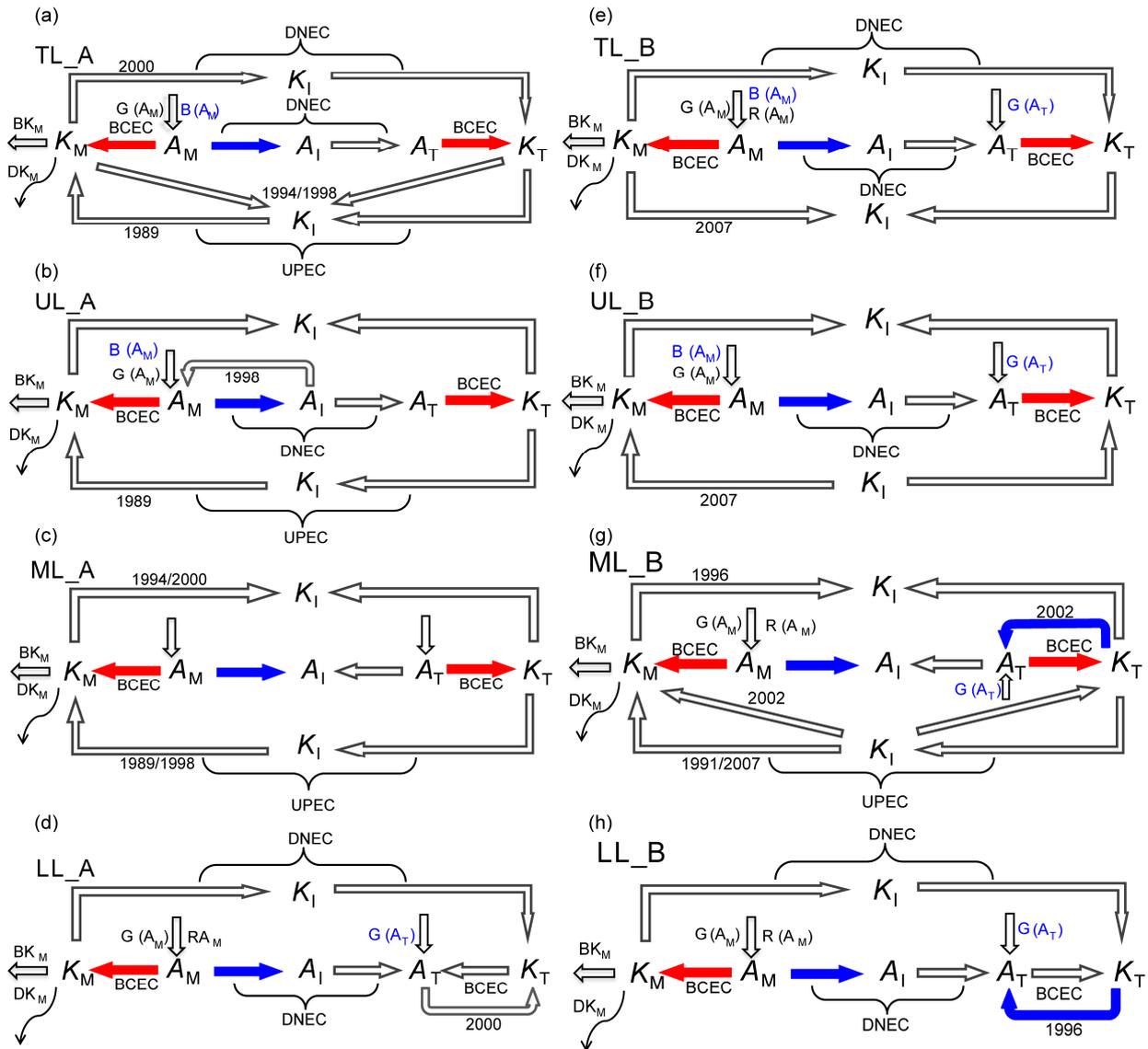


图 6 江南型 (左列) 和江北型 (右列) PHREs (a、e) 所有层次、(b、f) 高层、(c、g) 中层和 (d、h) 低层的能量转换图。 A_M 、 A_I 和 A_T 分别是有效位能的时间平均项、相互作用项和扰动项; K_M 、 K_I 和 K_T 分别是动能的时间平均项、相互作用项和扰动项。 G_{A_M} 和 G_{A_T} 是 A_M 和 A_T 的非绝热生消率。 DK_M 代表 K_M 的耗散率, $B(X)$ 是与能量 X 有关的三维输送。 $R(A_M)$ 代表热量的垂直输送。 BCEC 代表斜压能量转换, DNEC 代表降尺度能量级串, UPEC 是升尺度能量级串。 引自 Zhang et al. (2017b)

Fig. 6 Main energy paths in different levels for PHREs in the southern portion of YHRV (left column; TL_A, UL_A, ML_A and LL_A mean the energy paths integrated over all levels, upper levels, middle levels and lower levels, respectively) and PHREs in the northern portion of YHRV (right column; TL_B, UL_B, ML_B and LL_B mean the energy paths integrated over all levels, upper levels, middle levels and lower levels, respectively). A_M , A_I and A_T are the time-average, interaction and perturbation APE; K_M , K_I and K_T are the time-average, interaction and perturbation KE. G_{A_M} and G_{A_T} are the diabatic generation or extinction of A_M and A_T . DK_M denotes the dissipation of K_M . $B(X)$ is the three-dimensional transport associated with energy 'X'. $R(A_M)$ represents the vertical transport of heat. BCEC is baroclinic energy conversion; DNEC means the downscaled energy cascade and UPEC is the upscaled energy cascade. Cited from Zhang et al. (2017b)

低层则最显著(图 6 的第四行)。降尺度的动能级串是扰动场动能维持的最重要能量来源。江北型和江南型 PHREs 之间的差异也是很显著的:就整层大气而言,江北型 PHREs 动能的降尺度级串过程特征更为明显,这可能是该型次天气尺度系统更强的一个原因;对流层低层次天气尺度系统能量的转换过程中,江南型主要为次天气尺度动能向有效位能的斜压转换,而江北型则主要是次天气尺度有效位能的斜压释放过程,这表明江北型更具有经典斜压锋面降水的特征。江南型的背景场动能、有效位能以及斜压能量转换过程都较江北型强;而江北型的次天气尺度扰动场动能、有效位能以及斜压能量转换都较江南型强。在持续性暴雨过程中,也存在升尺度的动能级串,也就是扰动场对背景场的反馈,主要位于对流层中层(图 6 的第三行),但其强度比背景场的斜压能量转换项小两个量级,这表明,单次的暴雨过程对于背景场的反馈作用不显著,但是多次暴雨的累加效果,扰动场可能对背景场有显著的影响。综合上述,给出了江河流域 PHREs 的三维能量概念图(图 7)。江南型发生时其低层切变线位于江南,中层短波槽偏南偏西,使得江南地区位于槽前,高层急流较强位置偏南,位于降水区略偏北的位置。江北型的低层切变线位置偏北位于江北,中层短波槽偏东偏北,高空急流偏北,较江南型为弱。两类暴雨均存在显著的有效位能和动能的降尺度级串,不同之处在于江北型存在扰动有效位能的释放,这使得江北型的扰动能量更大,而江南型对流层低层的次天气尺度系统的主要能量来源是降尺度的动能级串,有扰动动能向扰动有效位能的转换,即存在冷上升暖下沉的环流,这种间接热力环流削弱了扰动流的能量,是不利于持续性降水维持的。这与观测也是相符的,江北型中涡旋活跃(扰动强),江南型涡旋活动不活跃。江北(南)型主要为暖(冷)空气的相对更活跃造成的有效位能释放(制造)。江南和江北两型不同斜压能量转换的存在,可能预示了这两类降水能量性质的不同,江北型更像经典的锋面斜压性降水而江南型则是另一种主要靠背景场供给能量的降水。

利用同样的方法, Fu et al. (2016a) 对于 2010 年两例 PHREs 的研究结果进一步佐证了对流层中低层动能的降尺度能量级串是持续性暴雨维持的最重要原因,他们还发现了对流层中层和高层的另外两条主要能量路径,其中,对流层高层有效位能的降尺

度能量级串,也就是背景场的有效位能(A_M)经过相互作用有效位能(A_I)将能量传递给扰动场的有效位能(A_T),通过扰动流的斜压能量转换得以释放,维持了高层风场扰动,这使得暴雨区有利的高低空环流配置得以维持,从而有利于暴雨事件的持续。

为了进一步验证采用时间尺度分离方法的研究结果, Fu et al. (2015, 2016b) 分别对 2010 年一例由长生命史中尺度涡旋造成的 PHREs 和 2016 年一例典型的江淮流域 PHREs 进行了模拟,并采用基于空间尺度分离的能量收支方法(Kucharski and Thorpe, 2000)对暴雨过程的能量转换进行了深入分析。研究表明,扰动场与背景场在降水期间有着显著的相互作用,对流高层,动能和有效位能同时存在降尺度的能量级串,有利于扰动场的维持,此外,扰动场的斜压能量转换有利于扰动动能的维持;在对流层中层,动能和有效位能同时存在升尺度的能量级串,这与 Zhang et al. (2017b) 的结果类似。对流层的低层,有效位能和动能的降尺度级串均很显著,从背景场获得能量时,中尺度涡旋得以发展维持,背景场的能量供给切断时,中尺度涡旋减弱消亡(图 8)。扰动动能的维持除了来自平均流直接的降尺度级串外,还有扰动流的斜压转换作用。正是此两个因子的协同作用才使得扰动流长时间维持并不断触发降水,这可能是此次降水持续的主要原因。扰动场对于其背景场存在一定的反馈,但就强度而言,其比背景场主要的演变项小 1~2 个量级,因此,背景场的演变主要由其自身特征决定。

4 青藏高原东部对流系统东移对江淮流域 PHREs 的影响

Zhang et al. (2002) 提出的形成长江流域大范围、长时间暴雨的四个系统中有来自青藏高原中尺度对流系统的影响,但青藏高原中尺度对流系统很少能直接东移到江淮流域造成暴雨,其具体的影响过程是什么呢? 我们一系列的研究显示青藏高原中尺度对流系统对江淮流域 PHREs 的影响是通过青藏高原和二级地形的作用、西南涡、二级地形以东涡旋(包括梅雨锋涡旋)以及活跃的中尺度对流来实现的。

地形对降雨的日变化有显著影响(Chen et al., 2010; Chen et al., 2013, 2014; 宇如聪等, 2014), 针对整个夏季的降水日变化研究结果表明(宇如聪等, 2014), 青藏高原大部分地区是下午和午夜峰

值，西南地区多在午夜达到降水峰值，长江中上游地区的降水多出现在清晨，中东部地区清晨、午后双峰并存。针对不同降水事件的日变化研究表明，持续性降水（时长大于 6 h）以层状云特性为

主，降水峰值大多位于午夜后至清晨，而局地短时降水（时长小于 3 h）以对流降水为主，峰值时间则多出现在下午至午夜前。Zhang et al. (2014a) 的研究也表明青藏高原东坡的午后对流有明显的东

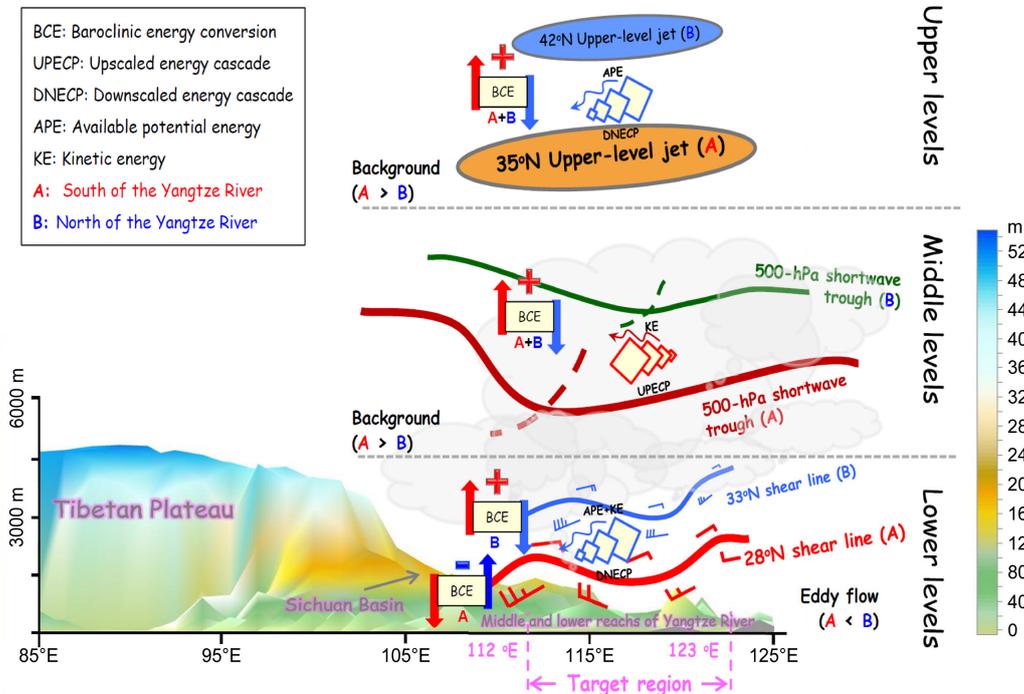


图 7 江南和江北型持续性降水过程能量转换概念图，A 代表江南型，B 代表江北型；KE 为动能，APE 为有效位能；BCE 为斜压能量转换，正号代表有效位能释放，负号代表有效位能制造；UPECP 为升尺度能量级串，DNECP 为降尺度能量级串，background 为背景场，eddy 为扰动场，大于号和小于号代表了江南型和江北型能量的相对强弱

Fig. 7 The schematic illustration of PHREs in the northern portion of YHRV (type B) and in the southern portion of YHRV (type A), where KE is the kinetic energy, APE is the available potential energy, BCE is the baroclinic energy conversion (plus/minus signs represent release/production of APE), UPECP is the upscaled energy cascade process, and DNECP is the downscaled energy cascade process. '<' and '>' in the parentheses following 'background' and 'eddy' show the comparisons between type A and type B of the energy values of background and eddy fields, respectively

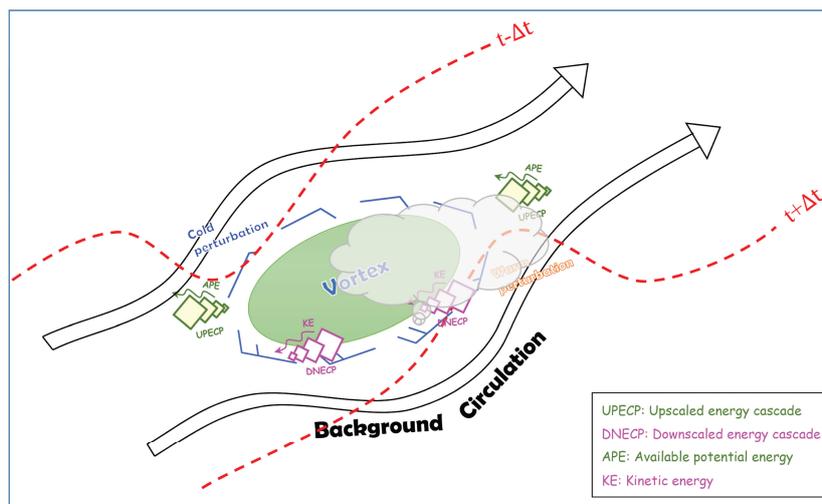


图 8 江淮流域低涡发展期与其背景场相互作用的概念图。黑色的空心曲线箭头代表了背景流场，红色的虚线代表了温度场，绿色的椭圆和蓝色风向杆标出了低涡的位置；KE 为动能，APE 为有效位能，UPECP 为升尺度能量级串，DNECP 为降尺度能量级串

Fig. 8 Schematic illustration of interaction between the YHRV vortex and its background circulation during the developing stage, where the black open curved arrows show the stream field of the background circulation, the red dashed lines are the temperature, the green ellipse with blue wind barbs shows the vortex, KE is the kinetic energy, APE is the available potential energy, UPECP is the upscaled energy cascade process, and DNECP is the downscaled energy cascade process

传特征, 四川盆地和二级地形东侧的平原地区降水峰值都在晚上或凌晨。但在暖季平均图上, 在 115°E 以东的地区只有午后的峰值。

青藏高原东部及其以东地区暖季降水系统的东传和日变化特征在不同环流背景下有所不同。在对暖季降水日变化研究的基础上, Zhang et al. (2017a) 将梅雨期 (6 月 15 日至 7 月 15 日) 分为梅雨日前期、梅雨日和梅雨日后期, 发现三个阶段的降水日变化特征显著不同。梅雨日时段, 降水量有明显日变化的地区为青藏高原东部 (图 9), 四川盆地和江淮平原地区, 青藏高原东部的降水在下午增强并持续到凌晨, 降水的峰值于午夜至凌晨东传至四川盆地, 次日早上东传到二级地形 (113°E), 梅雨日江淮地区梅雨锋上的降水系统也有东传特征, 主要的强降水时段在早上。研究表明我国东部地区的风场和 3 个山地—平原热力环流 (MPS) 都有明显的日变化特征, 但梅雨日时段的日变化特征比另两个时段强。青藏高原和四川盆地地区, 降水的日变化主要受地形热力环流影响, 而江淮流域降

水的日变化特征, 主要受大尺度环流控制, MPS 环流在有利的环流背景下加强降水及其日变化特征。

由于再分析资料时间分辨率为 6 h, 无法对日变化过程进行详细分析。Zhang et al. (2014b) 选取 2007 年典型降雨过程利用中尺度数值模式 WRF 进行了半理想试验。观测和模拟的雨带有两个强降雨中心和两个涡旋, 西部为西南涡及涡旋东部的降水中心, 东部为梅雨锋上强降水中心和涡旋。四川盆地和东部大别山地区也是暖季我国涡旋多发的地区 (张敬萍等, 2015)。两个降水中心都有午后的弱降水峰值和凌晨的强降水峰值。午后至傍晚青藏高原东部对流系统活跃, 降水量达到峰值。四川盆地在夜晚初期到次日凌晨, 由于夜间 MPS 环流 (S1) 上升支的作用造成降水量增强 (图 10)。我国东部淮河流域梅雨锋上降水的峰值出现在夜晚后期至次日清晨, 与夜间 MPS 环流 (S2) 的上升支有关。高原东部与四川盆地地区间形成的 MPS 环流圈的上升支夜间出现在四川盆地地区上空, 上升支的扰动使得涡度方程的倾斜项正贡献增强, 西南低涡有

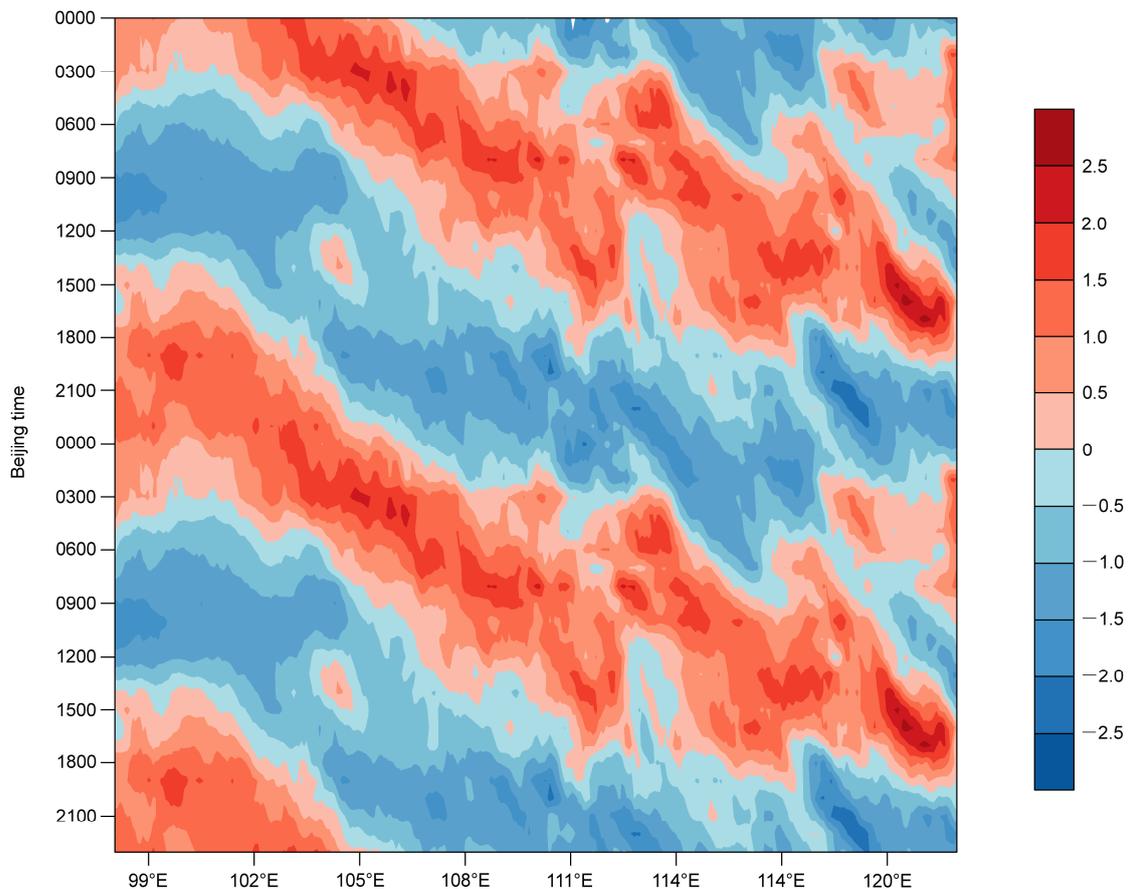


图 9 2003~2010 年梅雨日经向平均 ($27^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$) 的标准化后的降水偏差的时间—经度剖面 (横坐标为经度, 纵坐标为北京时。引自 Zhang et al. (2017a))
Fig. 9 Time-longitude cross sections of normalized precipitation anomalies averaged between $27^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ during typical Meiyu period (the abscissa is longitude and the ordinate is Beijing time). Cited from Zhang et al. (2017a)

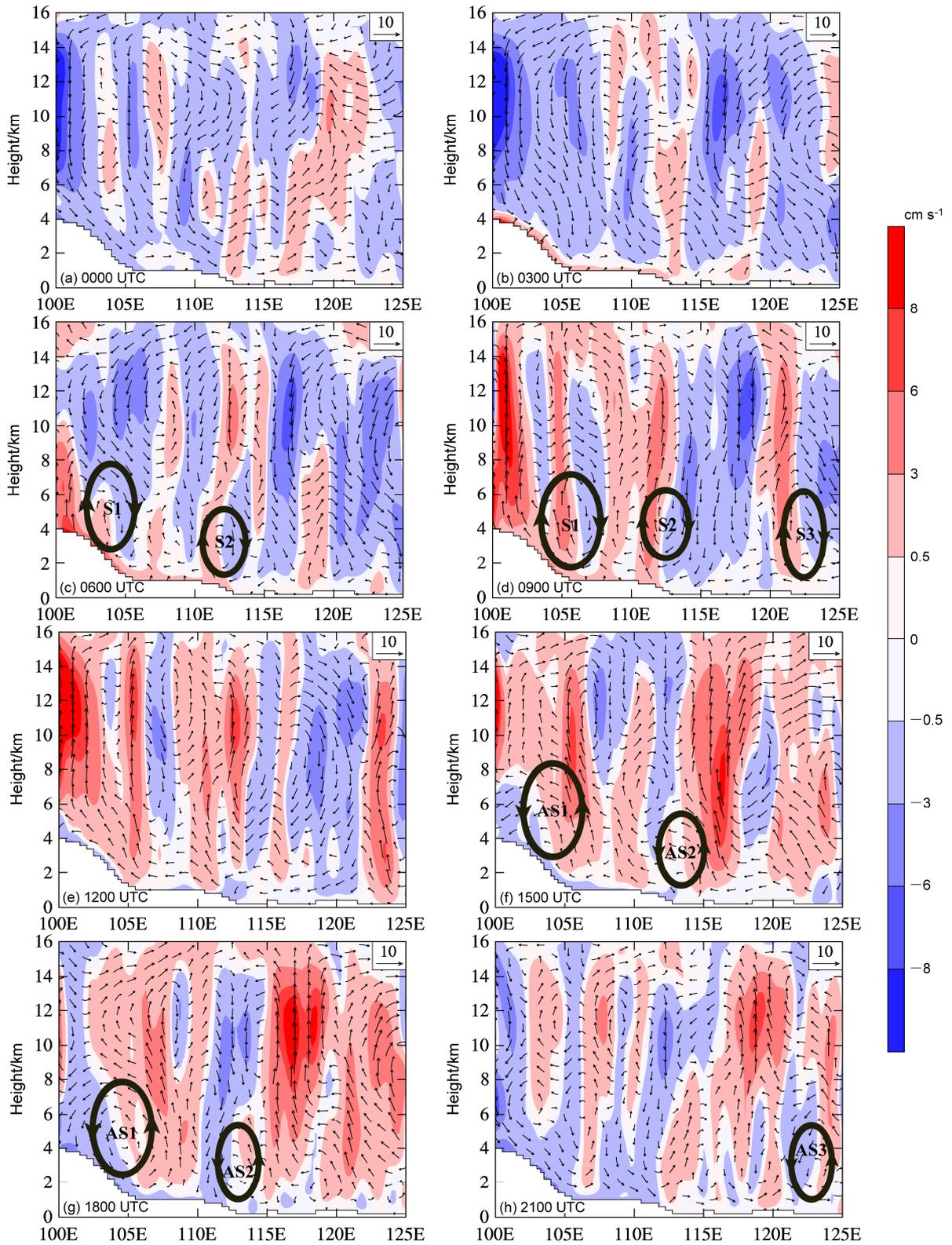


图 10 扰动风场(扰动纬向风和扰动垂直风 $\times 100$ 的合成)和垂直运动(填色, 单位: cm s^{-1})日变化的高度—经度剖面: (a) 00:00; (b) 03:00; (c) 06:00; (d) 09:00; (e) 12:00; (f) 15:00; (g) 18:00; (h) 21:00。时间均为协调世界时, 底部白色区域表示地形, 黑色圆圈表示 MPS 环流。引自 Zhang et al. (2014b)

Fig. 10 Height-longitude cross section of diurnal evolution of the perturbation of vertical velocity (colored areas, units: cm s^{-1}) and vectors of anomalous zonal wind and anomalous vertical velocity ($\times 100$) at three-hour intervals for the final seven-day simulation at (a) 0000 UTC, (b) 0300 UTC, (c) 0600 UTC, (d) 0900 UTC, (e) 1200 UTC, (f) 1500 UTC, (g) 1800 UTC and (h) 2100 UTC. The bottom white (unshaded) areas represent the topography, and the black circles indicate the MPS (Mountain Plain solenoid) circulations. Cited from Zhang et al. (2014b)

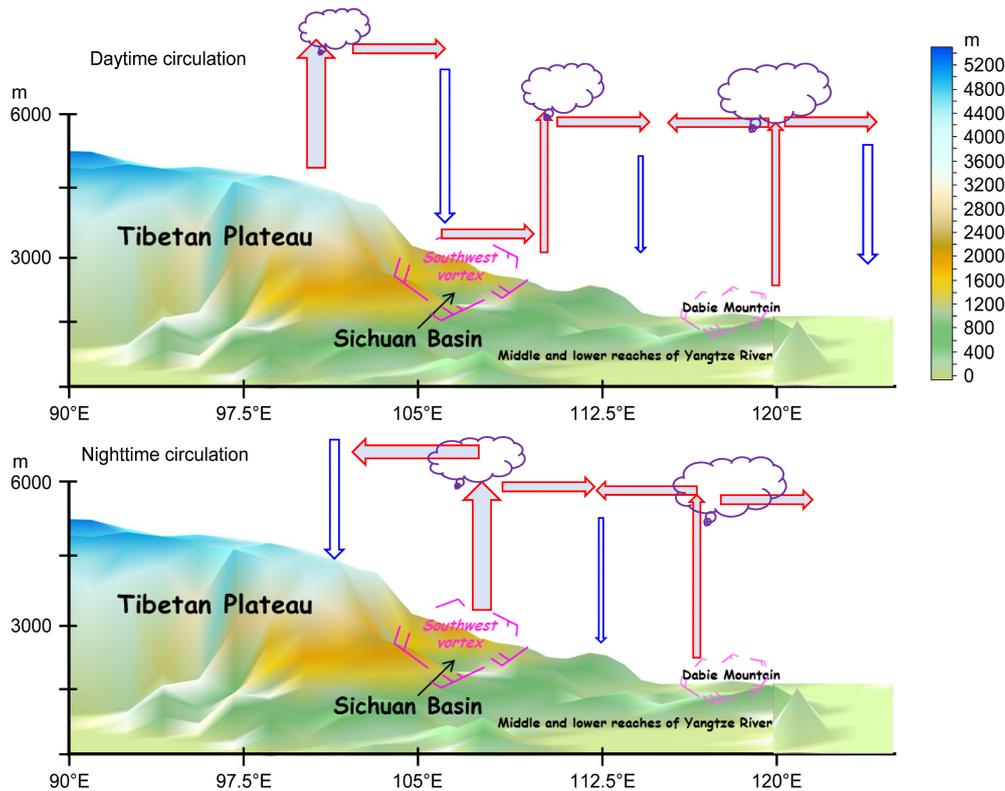


图 11 江淮流域梅雨期 PHREs 过程的地形影响示意图: (a) 日间环流; (b) 夜间环流。箭头表示垂直环流, 风向杆表示在四川盆地和江淮地区的涡旋环流

Fig. 11 The schematic model for topographic effects on PHREs over the YHRV: (a) Daytime circulation; (b) nighttime circulation. The arrow represents the vertical circulation, and the wind bars represents the vortex in Sichuan basin and the YHRV

所增强, 降水也达到夜间峰值, 并且向其东北方向伸展, 从而增强梅雨锋上的气旋式切变, 与二级地形东部—其东部平原的 MPS 环流上升支的共同作用, 促使梅雨锋上涡旋形成和发展。西南低涡大部分在四川盆地中活动, 只有少数能东移出盆地 (张敬萍等, 2015), 但西南低涡的对流或者气旋性切变的东移影响二级地形及其以东地区的对流活动 (Zhang et al., 2017a)。由此可见, 青藏高原东部对流系统的东移影响梅雨锋降雨是由一些天气系统配合和活跃的结果, 包括青藏高原和四川盆地、二级地形和东部平原的 MPS 环流, 西南涡、二级地形以东涡旋和对流系统的共同影响 (图 11)。

5 结论和讨论

本文对江淮流域 PHREs 多尺度物理模型和形成机理方面的研究成果进行了总结, 在 Zhang et al. (2002) 提出的我国江淮流域持续性暴雨的天气学模型基础上, 建立了江南型和江北型 PHREs 的多尺度物理模型, 并从天气尺度和次天气尺度之间的

能量转化演变角度揭示了不同尺度系统相互作用的物理图像。主要的进展有以下三个方面:

从欧亚大陆 Rossby 波列能量频散的角度揭示了江淮流域持续降雨过程中中纬度系统槽脊稳定的机制, 定量分析了冷暖空气的源地和输送路径。通过地形作用以及对流、涡旋活动等一系列研究发现青藏高原和四川盆地, 二级地形和东部平原形成的热力环流影响降雨的日变化, 加强了夜间降雨过程。青藏高原东部对流系统的东移影响江淮流域降雨是由一些天气系统配合和活跃的结果, 包括青藏高原和四川盆地、二级地形和东部平原的热力环流, 西南涡、二级地形以东涡旋和对流系统的共同影响。对能量转换的定量分析给出了持续稳定环流下不同尺度系统相互作用的特征。背景场的能量是次天气尺度系统发生发展维持的主要来源, 对流层低层存在显著的有效位能和动能的降尺度级串, 有利于扰动的维持。对流层中层有升尺度的能量级串过程, 这表明扰动场对背景场有反馈。

本文对江淮流域 PHREs 的多尺度物理模型、

能量转换和青藏高原东部对流系统如何东移影响下游地区涡旋和对流的活动进行了总结, 但针对江淮流域 PHREs 仍有不少问题需要开展深入研究: 哪些中高纬度系统会影响降雨持续性? 其持续稳定的机理是什么? 在持续稳定的环流背景下中尺度系统的活动特征如何? 本文总结了天气尺度和次天气尺度系统之间能量转换的研究结果, 而影响持续性事件的因子非常多, 将来应针对多尺度相互作用中的 Rossby 波源位置、波列如何影响天气系统以及中尺度系统对天气尺度或更大尺度系统的能量反馈等多个方面开展深入的研究。

参考文献 (References)

- Chen G X, Sha W M, Sawada M, et al. 2013. Influence of summer monsoon diurnal cycle on moisture transport and precipitation over eastern China [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (8): 3163–3177, doi:10.1002/jgrd.50337.
- Chen G X, Yoshida R, Sha W M, et al. 2014. Convective instability associated with the eastward-propagating rainfall episodes over eastern China during the warm season [J]. *J. Climate*, 27 (6): 2331–2339, doi:10.1175/JCLI-D-13-00443.1.
- Chen H M, Yu R C, Li J, et al. 2010. Why nocturnal long-duration rainfall presents an eastward-delayed diurnal phase of rainfall down the Yangtze River valley [J]. *J. Climate*, 23 (4): 905–917, doi:10.1175/2009JCLI3187.1.
- Chen Y, Zhai P M. 2013. Persistent extreme precipitation events in China during 1951–2010 [J]. *Climate Res.*, 57 (2): 143–155, doi:10.3354/cr01171.
- Chen Y, Zhai P M. 2014. Two types of typical circulation pattern for persistent extreme precipitation in central-eastern China [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 140 (682): 1467–1478, doi:10.1002/qj.2231.
- 丁一汇. 1993. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究 [M]. 北京: 气象出版社, 254–255. Ding Yihui. 1993. Study on the Lasting Heavy Rainfalls Over the Yangtze-Huaihe River Basin in 1991 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 254–255.
- Fu S M, Li W L, Ling J. 2015. On the evolution of a long-lived mesoscale vortex over the Yangtze River basin: Geometric features and interactions among systems of different scales [J]. *J. Geophys. Res.*, 120 (23): 11889–11917, doi:10.1002/2015JD023700.
- Fu S M, Wang H J, Sun J H, et al. 2016a. Energy budgets on the interactions between the mean and eddy flows during a persistent heavy rainfall event over the Yangtze River valley in summer 2010 [J]. *J. Meteor. Res.*, 30 (4): 513–527, doi:10.1007/s13351-016-5121-3.
- Fu S M, Sun J H, Ling J, et al. 2016b. Scale interactions in sustaining persistent torrential rainfall events during the Mei-yu season [J]. *J. Geophys. Res.*, 121 (21): 12856–12876, doi:10.1002/2016JD025446.
- Hui P H, Fang J. 2016a. Comparison of the multi-scale features in two persistent heavy rainfall events in the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *J. Meteor. Res.*, 30 (4): 528–546, doi:10.1007/s13351-016-6028-8.
- Hui P H, Fang J. 2016b. Impact of multi-scale oscillations at high and low latitudes on two persistent heavy rainfall events in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *J. Meteor. Res.*, 30 (5): 662–677, doi:10.1007/s13351-016-6082-2.
- Kucharski F, Thorpe A J. 2000. Local energetics of an idealized baroclinic wave using extended exergy [J]. *J. Atmos. Sci.*, 57 (19): 3272–3284, doi:10.1175/1520-0469(2000)057<3272:LEOAIB>2.0.CO;2.
- 李明刚, 管兆勇, 梅士龙. 2016. 夏季长江中下游地区降水持续性年(代)际变异及其与环流和 Rossby 波活动的联系 [J]. *大气科学*, 40 (6): 1199–1214. Li Minggang, Guan Zhaoyong, Mei Shilong. 2016. Interannual and interdecadal variations of summer rainfall duration over the middle and lower reaches of the Yangtze River in association with anomalous circulation and Rossby wave activities [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40 (6): 1199–1214, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.15257.
- Murakami S. 2011. Atmospheric local energetics and energy interactions between mean and eddy fields. Part I: Theory [J]. *J. Atmos. Sci.*, 68 (4): 760–768, doi:10.1175/2010JAS3664.1.
- 齐艳军, 张人禾, Li T. 2016. 1998 年夏季长江流域大气季节内振荡的结构演变及其对降水的影响 [J]. *大气科学*, 40 (3): 451–462. Qi Yanjun, Zhang Renhe, Li T. 2016. Structure and evolution characteristics of atmospheric intraseasonal oscillation and its impact on the summer rainfall over the Yangtze River basin in 1998 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40 (3): 451–462, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1507.15107.
- 孙建华, 汪汇洁, 卫捷, 等. 2016. 江淮区域持续性暴雨过程的水汽源地和输送特征 [J]. *气象学报*, 74 (4): 542–555. Sun Jianhua, Wang Huijie, Wei Jie, et al. 2016. The sources and transportation of water vapor in persistent heavy rainfall events in the Yangtze-Huaihe River valley [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 74 (4): 542–555, doi:10.11676/qxxb2016.047.
- 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄, 等. 2001. 1998 年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究 [M]. 北京: 气象出版社, 183–184. Tao Shiyan, Ni Yunqi, Zhao Sixiong, et al. 2001. The Study on Formation Mechanism and Forecasting of Heavy Rainfall in the Summer 1998 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 183–184.
- 陶诗言, 张小玲, 张顺利. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨灾害研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1–192. Tao Shiyan, Zhang Xiaoling, Zhang Shunli. 2004. A Study on the Disaster of Heavy Rainfalls Over the Yangtze River Basin in the Meiyu Period (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–192.
- 汪汇洁. 2014. 我国南方暖季持续性暴雨的多尺度特征及机理研究 [D]. 中国科学院大学博士学位论文, 1–141. Wang Huijie. 2014. Study on multi-scale characteristics and development mechanisms of persistent heavy rainfall during warm season in southern China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Chinese Academy of Sciences, 1–141.
- 汪汇洁, 孙建华, 卫捷, 等. 2014. 近 30 年我国南方区域持续性暴雨过程的分类研究 [J]. *气候与环境研究*, 19 (6): 713–725. Wang Huijie, Sun Jianhua, Wei Jie, et al. 2014. Classification of persistent heavy rainfall events over southern China during recent 30 years [J]. *Climatic*

- Environ. Res. (in Chinese), 19 (6): 713–725, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13143.
- 王淑莉, 徐祥德, 康红文, 等. 2016. 应用谱逼近方法模拟 2008 年初南方持续性降水过程及其水汽通道周期特征分析 [J]. 大气科学, 40 (3): 476–488. Wang Shuli, Xu Xiangde, Kang Hongwen, et al. 2016. Simulation of continuous rainfall over South China in early 2008 with the spectral nudging method and the periodicity characteristics of the water vapor channel [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (3): 476–488, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1507.14332.
- 宇如聪, 李建, 陈昊明, 等. 2014. 中国大陆降水日变化研究进展 [J]. 气象学报, 72 (5): 948–968. Yu Rucong, Li Jian, Chen Haoming, et al. 2014. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 72 (5): 948–968, doi:10.11676/qxxb2014.047.
- 张敬萍, 傅慎明, 孙建华, 等. 2015. 夏季长江流域两类中尺度涡旋的统计与合成研究 [J]. 气候与环境研究, 20 (3): 319–336. Zhang Jingping, Fu Shenming, Sun Jianhua, et al. 2015. A statistical and compositional study on the two types of mesoscale vortices over the Yangtze River basin [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 20 (3): 319–336, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14164.
- 张庆云, 王会军, 林朝晖, 等. 2004. 中国天气气候异常成因研究——2003 年 [M]. 北京: 气象出版社, 166–170. Zhang Qingyun, Wang Huijun, Lin Zhaohui, et al. 2004. The Mechanism of Abnormal Weather and Climate in China—2003 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 166–170.
- Zhang S L, Tao S Y, Zhang Q Y, et al. 2002. Large and meso- α scale characteristics of intense rainfall in the mid- and lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Sci. Bull., 47(9): 779–786, doi:10.1360/02tb9176.
- Zhang Y C, Zhang F Q, Sun J H. 2014a. Comparison of the diurnal variations of warm-season precipitation for East Asia vs. North America downstream of the Tibetan Plateau vs. The Rocky Mountains [J]. Atmos. Chem. Phys., 14 (19): 10741–10759, doi:10.5194/acp-14-10741-2014.
- Zhang Y C, Sun J H, Fu S M. 2014b. Impacts of diurnal variation of mountain-plain solenoid circulations on precipitation and vortices east of the Tibetan Plateau during the Mei-yu season [J]. Adv. Atmos. Sci., 31 (1): 139–153, doi:10.1007/s00376-013-2052-0.
- Zhang Y C, Sun J H. 2017a. Comparison of the diurnal variations of precipitation east of the Tibetan Plateau among sub-periods of Meiyu season [J]. Meteor. Atmos. Phys., 129: 539–554, doi:10.1007/s00703-016-0484-7.
- Zhang Y C, Sun J H, Fu S M. 2017b. Main energy paths and energy cascade processes of the two types of persistent heavy rainfall events over the Yangtze River–Huaihe River basin [J]. Adv. Atmos. Sci., 34 (2): 129–143, doi:10.1007/s00376-016-6117-8.
- 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华, 等. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究 [M]. 北京: 气象出版社, 281–282. Zhao Sixiong, Tao Zuyun, Sun Jianhua, et al. 2004. Study on Mechanism of Formation and Development of Heavy Rainfalls on Meiyu Front in Yangtze River (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 281–282.