

周宁芳,康志明,赖芬芬. 2012 年夏季华北降水和环流形势的低频振荡特征分析. 气象, 40(9):1106-1113.

2012 年夏季华北降水和环流形势的 低频振荡特征分析^{* 1}

周宁芳 康志明 赖芬芬

国家气象中心, 北京 100081

提 要: 对 2012 年夏季华北降水的低频振荡特征和相应的低频环流形势进行了分析, 结果表明: 2012 年华北夏季降水具有显著的 10~13 d 低频振荡周期, 振荡的演变和强降水有很好的对应关系, 强降水过程基本发生在振荡的波峰处。强降水发生前, 对流层低层在孟加拉湾地区首先出现低频反气旋式环流并逐渐加强, 菲律宾至我国南海地区的低频环流系统逐渐向西北方向传播, 中高纬西风带上有负低频高度距平东移, 其伴随西风槽加深东移。对流层上层伊朗高原低频气旋式环流减弱, 随后青藏高原东部低频反气旋式环流加强东移。强降水发生时, 来自西北太平洋的低频偏南风 and 西风槽东移携带的低频水汽, 为华北地区提供了充沛的低频水汽。同时对流层高层青藏高原的低频反气旋式环流东移控制我国中东部地区, 华北至东北地区为强烈的低频辐散中心, 上升运动加强, 为降水的发生提供动力条件。对流层各层低频系统的相互配合对华北强降水的发生和维持起到了重要作用。

关键词: 华北, 低频降水, 低频大气环流

中图分类号: P448

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.09.008

The Low Frequency Characteristics of Precipitation and Its Circulation over North China in Summer 2012

ZHOU Ningfang KANG Zhiming LAI Fenfen

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: The low frequency characteristics of summer rainfall over North China in 2012 and its associated low frequency circulations are studied. The results show that the summer rainfall over North China has a significant 10—13 d period. The evolution of the low frequency oscillation is well correlated to that of the severe rainfall, and such severe rain events usually take place on the peaks of the oscillation. At the same time, general circulation and impacting systems also have the low frequency characteristics. In the weak phase of the low frequency period, a low frequency anticyclone over the Bay of Bengal comes to intensify, and low frequency circulation systems over the Philippines and the South China Sea (SCS) propagate toward northwest gradually. Low frequency geopotential height anomalies over 500 hPa level propagate eastward, followed by a westerly trough at the high-mid latitude. In the upper atmosphere, a low frequency cyclone over Iranian Plateau is weak, while a low frequency anticyclone over the eastern Tibetan Plateau strengthens and propagates eastward. In the strong phase of the low frequency period, low frequency south wind from the western North Pacific and the westerly trough with low frequency supply abundant water vapor to the North China. In the upper atmosphere, the low frequency anticyclone controls the east-central part of China, favorable for the area from North China to the Northeast to become a divergence

* 中国气象局预报员专项(CMAYBY2013-085)资助

2013 年 8 月 10 日收稿; 2014 年 6 月 8 日收修定稿

第一作者: 周宁芳, 主要从事中期预报工作. Email: zhounf@cma.gov.cn

center. The upward motion strengthens, providing dynamic condition for precipitation. On the whole, the lower and upper low frequency circulations coordinating with each other result in severe rainfalls over North China.

Key words: North China, low frequency rainfall, low frequency circulation

引言

华北夏季降水量占全年降水量的 50% 以上,主要由几次暴雨造成,是我国降水集中程度最大的地区(“华北暴雨”编写组,1992)。自 20 世纪 60 年代开始,华北地区降水量呈现减少趋势(郝立生等,2010;2012),而 2010 年以来华北降水连续偏多,暴雨过程频发,降水强度增强,尤其是 2012 年 7 月 21—22 日京津冀地区的特大暴雨过程,降水持续时间长,降水强度大,属历史罕见。暴雨过程造成了城市交通拥堵、人员伤亡、城市渍涝,经济损失严重。针对这次极端降雨过程,利用多种常规和非常规资料已对降水过程的降水特点、中尺度系统以及天气形势特点进行了细致的研究(湛芸等,2012;孙军等,2012;方翀等,2012;周宁芳,2012)。

异常的大气环流是造成强降水过程的主要原因,而大气低频振荡对异常环流的形成和维持具有十分重要的作用。已有的研究(Lau et al,1998;李崇银等,2003)指出,大气低频振荡是中国东部降水的主要模态,我国东部洪涝很大程度上与大气低频有关(贾小龙等,2011;Jia et al,2011;占瑞芬等,2008)。国内学者对江淮流域(陆尔等,1996;毛江玉等,2005)、长江中下游地区(琚建华等,2005;王遵娅等,2008)以及华南地区(朱乾根等,2000;纪忠萍等,2012)的降水和主要影响系统的低频振荡及其传播特征进行了大量研究,而关于华北降水的研究多是针对其年际-年代际变化和相应大气环流演变特点以及物理成因的分析,或者是针对华北暴雨过程的天气学特点研究,而对于华北夏季降水的低频振荡的特征研究较少。有研究指出(Zhang et al,2001)分析了冬、春亚洲季风区赤道辐合带(ITCZ)的活动对华北夏季降水的影响,表明多雨年南北两个半球的低频振荡强度较大,范围较广,并不断由南向北传播,在华北夏季降水过程中起着重要的作用。因此,本文将针对 2012 年华北夏季降水和相应大气环流的低频特征进行详细分析,了解低频振荡对 2012 年夏季华北暴雨形成和维持中的重要性,进一步加深

对于华北地区暴雨的认识。

1 资料和方法

1.1 资料

本文使用的逐日降水资料来自国家气象信息中心提供的中国台站观测资料,再分析资料取自美国国家环境预报中心(NCEP)的逐日再分析资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。所有变量的气候态(常年值)均是 1981—2010 年平均值,距平场为原始值减去气候态。研究的华北区域是结合实际业务,选取包括山西、河北、山东大部 and 辽宁西部,共计 66 站(图 1),华北区域逐日降水是将这 66 站逐日降水求和并做 66 站平均之后所得。

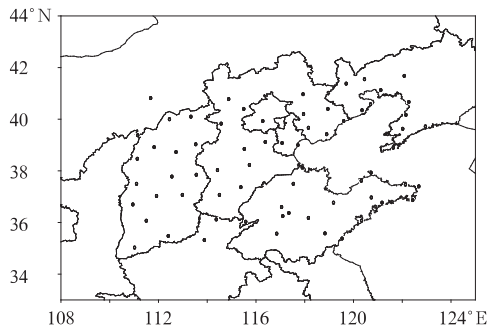


图 1 华北地区站点分布情况
Fig. 1 Distribution of observation stations in North China

1.2 Butterworth 滤波

文中对 2012 年夏季共计 92 d 的逐日资料均采用了 Butterworth 带通滤波器进行滤波,该方法在大气科学领域得到比较广泛的应用。

通常时间滤波器的输入和输出信号的关系为:

$$y_b(t) = a[x(t) - x(t - 2)] - b_1 y(t - 1) - b_2 y(t - 2) \\ t = 1, 2, \dots, N \quad (N \text{ 为序列长度}) \quad (1)$$

响应函数为:

$$R_B(f) = \left| \frac{a(1 - Z^2)}{1 + b_1 Z + b_2 Z^2} \right| \quad (2)$$

式中: $Z=e^{-2\pi f\Delta T}$, f 是频率。

$$\begin{aligned} a &= \frac{2q}{4+2q+p} \\ b_1 &= \frac{2(p-4)}{4+2q+p} \\ b_2 &= \frac{4-2q+p}{4+2q+p} \\ q &= 2 \left| \frac{\sin 2\pi f_1 \Delta T}{1+\cos 2\pi f_1 \Delta T} - \frac{\sin 2\pi f_2 \Delta T}{1+\cos 2\pi f_2 \Delta T} \right| \\ p &= \frac{4\sin 2\pi f_1 \Delta T \sin 2\pi \Delta T}{(1+\cos 2\pi f_1 \Delta T)(1+\cos 2\pi f_2 \Delta T)} \end{aligned}$$

本文中 ΔT 取为 1 d, 滤出 10~13 d 的信息, 其响应函数, 通过带中心约为 11 d。

2 2012 年华北夏季降水的低频特征

2012 年夏季华北地区降水自 6 月下旬开始明显增多, 6 月 28—29 日有一次大范围中到大雨过程, 7 月降水强度增大, 8—10 日有一次大范围的大到暴雨过程, 下旬降水最集中, 强度也最大, 21—22 日和 7 月 31 日至 8 月 2 日分别出现两次大到暴雨, 部分地区特大暴雨的强降水过程。7 月 26 日在部分地区(河北和天津)也出现大到暴雨过程, 但降雨范围较上述 4 次过程要小。对华北区域降水距平序列进行 Morlet 小波分析(Torrence et al, 1998)得到 2012 年华北地区夏季降水的主要周期特征(图 2), 可以看到除了显著的 2~6 d 天气尺度的周期之外, 在准双周的时间尺度上也存在显著周期, 典型周期为 10~13 d, 其在 7—8 月初最为显著。此外, 还存

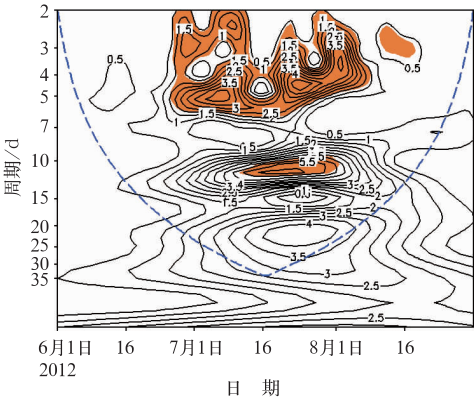


图 2 2012 年夏季降水距平的小波分析 (阴影区为通过 0.05 显著性水平检验)

Fig. 2 Wavelet analysis of precipitation anomalies in North China in summer 2012 (Areas above 0.05 significance level are shaded)

在 20~25 d 的振荡周期, 但没有通过 0.05 显著性水平检验。

图 3 是 2012 年夏季华北区域平均降水量的逐日变化和 10~13 d 以及 20~25 d 的带通滤波后的时间序列。从图中可见 10~13 d 的振荡从 7 月初开始明显增强, 8 月中旬开始减弱, 振荡的演变和降水有很好的对应关系, 几次强降水过程基本都发生在振荡的波峰处。此外还可以看到, 降水集中且降水强度大的 6 月下旬至 8 月上旬, 20~25 d 振荡幅度要弱于 10~13 d 振荡, 其随时间的演变和降水的关系不如 10~13 d 那样显著, 只是在 7 月 4—5 和 26 日两次降水过程时 20~25 d 振荡处于正位相, 而 10~13 d 的振荡是位于负位相, 表明 20~25 d 的振荡在这两次相对较弱的降水过程中起到一定作用。

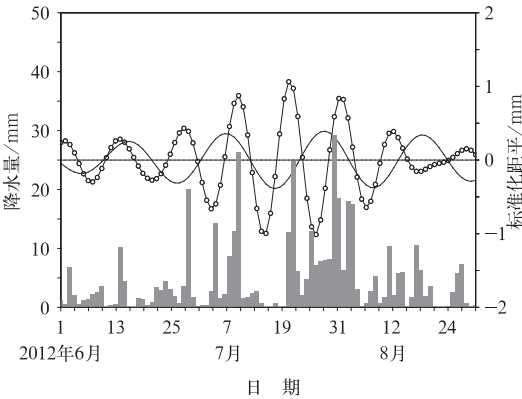


图 3 2012 年夏季 6—8 月华北降水序列时间演变(单位:mm)

(柱状表示实际降水, 空心圆实线表示 10~13 d 滤波后降水, 实线表示 20~25 d 滤波后降水)
Fig. 3 Time series of precipitation in North China in summer 2012 (unit:mm)
(Bar is for daily precipitation, hollow circle line is 10~13 d filtered precipitation, and black line is the 20~25 d filtered precipitation)

鉴于 10~13 d 低频振荡和强降水的关系更为密切, 因此下文仅针对 10~13 d 低频环流形势的演变特征和机理进行分析。

3 低频振荡的传播特征

华北夏季降水涉及不同纬度的天气系统以及它们的相互作用, 下面对对流层低层和高层相应的低频环流的传播特征进行分析。

3.1 200 hPa 高空急流传播

东亚高空西风急流是影响整个东亚地区天气、气候异常的重要系统之一,我国大部地区的降水都与高空西风急流的变化密切相关。图 4 是 35°~45°N 平均的 200 hPa 纬向风(U_{200})距平的时间-经度剖面图,反映了高空西风急流的纬向传播特点。图 4a 是未作滤波的 U_{200} 距平,可以看到华北降水强度较大的 6 月下旬和 7 月在 105°~120°E 均对应 U 分量距平正值,表明高空急流较常年同期偏强。从正值中心的传播看,可以看到 4 次能量从上游地区向东传播的过程,分别对应 4 次强降水过程。图 4b 是 10~13 d 滤波后的 U_{200} ,可以看到 6 月下旬至 7 月底有 4 次来自上游的低频西风的东传,时间上对应 4 次强降水过程,表明低频西风加强了华北上空的高空西风急流,使得高空急流较常年偏强,尤其是图 4a 中 7 月 20 日前后, U_{200} 在 105°E 附近的距平达到 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,较常年同期明显偏强。

3.2 850 hPa 经向风传播特点

低空急流加强也是华北降水发生、发展的重要条件之一,比较 105°~122.5°E 平均 850 hPa 经向风(V_{850})距平的经向传播特点可以反映出低空急流的南北传播特点。从图 5a 中没有滤波的 V_{850} 传播可以发现自6月中旬至8月上旬主要有3次明显的

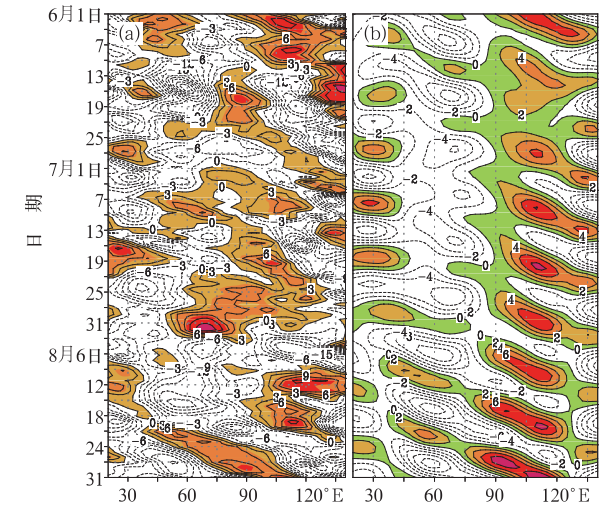


图 4 35°~45°N 平均的 200 hPa U 分量
时间-经度剖面图(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
(a)距平值, (b)10~13 d 滤波后距平值
Fig. 4 Time-longitude cross sections of the mean zonal wind at 200 hPa over 35°–45°N (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
(a) daily anomaly, (b) 10–13 d filtered anomaly

南风从低纬度加强向北传播的过程,分别对应 3 个多雨时段。在低纬度南风加强北送的同时,华北地区的几次强降水过程中都伴有来自 35°N 以北地区的南风加强。从 10~13 d 滤波的风场距平来看(图 5b),存在明显的准双周振荡从低纬度向高纬传播的过程,其强度在 7 月中旬后明显增强,传播的范围

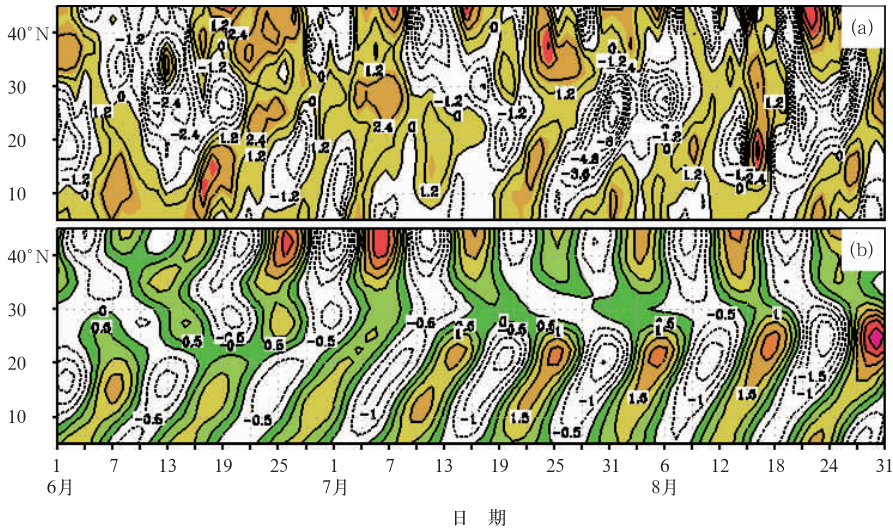


图 5 105°~122.5°E 平均的 850 hPa V 风时间-纬度剖面图(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
(a)距平值, (b)10~13 d 滤波后距平值
Fig. 5 Time-latitude cross sections of the mean meridional wind at 850 hPa over 105°–122.5°E (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
(a) daily anomaly, (b) 10–13 d filtered anomaly

逐渐向北推进,但是从4次强降水过程看,并不是每次过程都伴有相应的低频传播过程,例如7月21日前后和31日前后的强降水过程中10~13 d振荡均表现为低频北风,因此可以说明这两次过程直接来自 $105^{\circ}\sim 122.5^{\circ}\text{E}$ 低纬度的低频振荡的水汽贡献不是主要和直接的。

有研究(梁萍等,2007)指出,来自西太平洋和中高纬西风带的水汽变化及其异常对华北暴雨的产生有重要影响。因此进一步分析 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 平均的850 hPa V风距平的纬向传播(图6),图中可以清楚看到,4次强降水过程都伴有西风东传,且在华北地区增强。从10~13 d滤波后的 V_{850} (图6b)可以看到,除了强度较明显的自西向东传播之外,6月14日、6月28—29日及8月2日前后的降水过程中同时存在自东向西传播的过程,表明 35°N 以北地区的南风加强不仅是西风带槽前偏南风增强造成,来自西北太平洋的偏南风增强也同样起到一定作用。

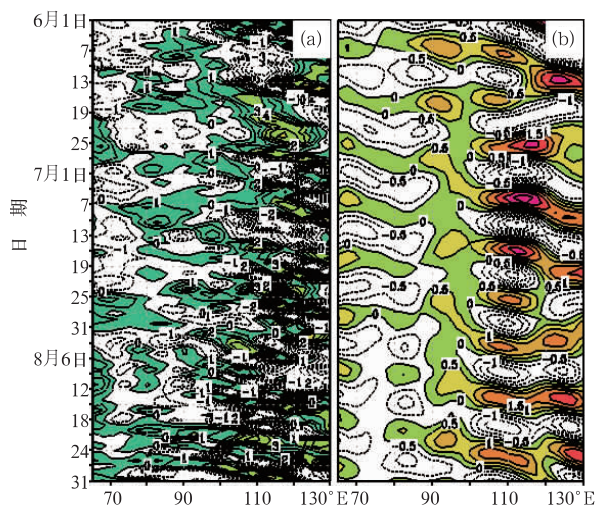


图6 同图4,但为850 hPa纬向风

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for the mean zonal wind at 850 hPa

4 华北暴雨伴随的低频大气环流时间演变

下文将针对2012年华北10~13 d低频降水和相应环流形势的演变特征和机理进行进一步分析。从图3中可以看到2012年华北暴雨集中在6月下旬至8月初,此期间有4个完整的10~13 d低频循环,且低频振荡的幅度较其他时段显著偏强,因此将该时段一个振荡周期划分为6个位相,其中第一位

相是10~13 d低频强度最弱的位相,对应华北降水较弱,第四位相是低频强度最强的位相,其时间和华北的4次暴雨过程时间基本一致,第二、三和五、六位相是低频振荡由弱(强)变强(弱)的位相,这6个位相包含了低频降水的整个周期。

根据华北降水10~13 d振荡的6个不同位相合成4次低频循环的850 hPa低频距平风场和整层低频水汽距平场可以看到(图7),华北地区在第一位相时为一个反气旋式环流控制,水汽含量较常年偏少。随着华北低频降水从弱位相变为强位相,可以看到首先是孟加拉湾地区由南风异常变为低频反气旋式环流,2位相开始我国南海至菲律宾以东的低频系统逐渐向西北方向传播,南海至台湾地区第一位相时的低频反气旋式环流在第四位相时已变为低频气旋环流,该气旋环流东侧的西南风异常可以将来自孟加拉湾和南海的异常暖湿水汽输送到更加偏北的东部海域。与此同时,中高纬低频环流调整,西北太平洋的低频气旋式环流逐渐北抬,其南侧低频偏东风和南海的低频气旋北侧的东南风异常汇合,华北地区变为低频南风异常影响。此外来自孟加拉湾北部的低频西南风和来自西亚的低频西风异常在西北地区东部汇合,使得华北暴雨前,西北地区东部的低频水汽也较常年明显偏多。华北降水最强的第四位相时,西北地区东部至华北一带为低频水汽偏多区。表明来自西部的低频水汽输送对于华北强降水的发生有一定的贡献。随着降水低频振荡逐渐减弱,孟加拉湾的低频反气旋首先减弱,南海的低频气旋继续西移,强度减弱,西北太平洋的低频反气旋式环流重新建立,华北地区重新处于低频偏北风异常的控制,水汽含量减小,因此降水强度减弱。分析中可以发现,孟加拉湾地区低频系统的变化要早于其他低频系统的变化,具有一定先兆性意义。

中高纬大气环流对华北的夏季降水有直接的影响,图8是根据华北降水10~13 d低频位相合成的500 hPa高度场和低频高度距平场,用来解释中高纬环流和副热带高压的低频活动演变,可以看到第一位相时我国中高纬是较平直的纬向环流,高纬度大部地区都是正的低频高度距平。华北地区受一个弱脊影响,其上游新疆北部有一个低频高度负距平中心,随着这个低频中心东移增强,伴随一个西风槽的东移加深。同时位于东北地区的高空槽东移至西北太平洋面后,东亚槽加深,东段副热带高压强度减弱,西段副热带高压和西风带高压脊“打通”,使得我

国中高纬度调整为两脊一槽型,有利于华北暴雨的产生,这与李崇银等(1992)的研究结果较一致。第四位相时,华北地区正处于来自新疆北部西风槽前,槽后携带的冷空气和槽前暖湿气体交汇与华北地区,造成明显的降水天气过程。随着西风带高空槽东移减弱,华北地区再次为一个弱脊控制。

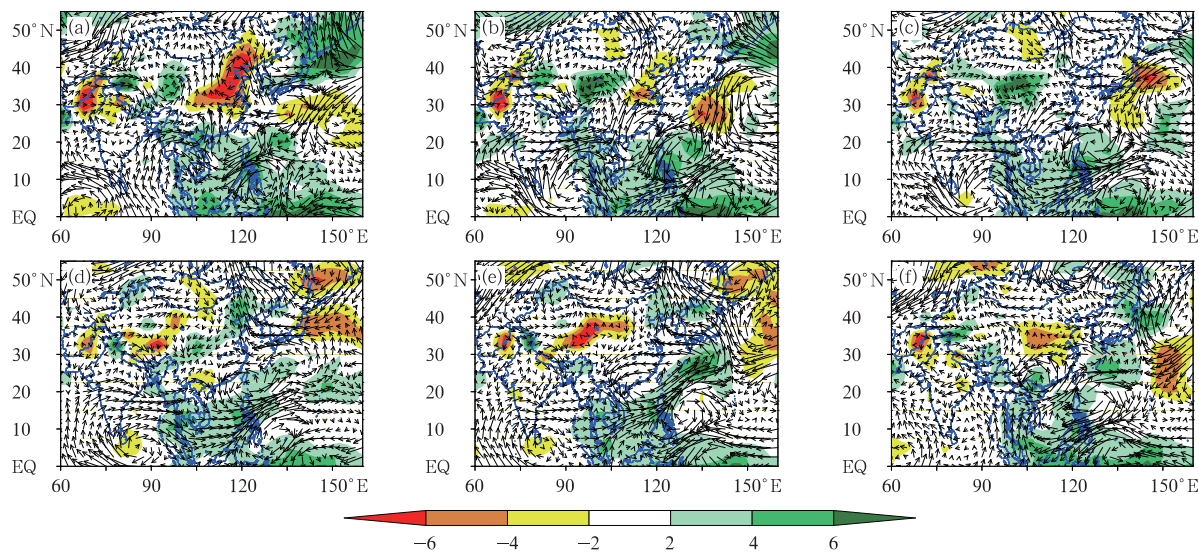


图 7 2012 年夏季华北降水 10~13 d 低频振荡的 6 个位相合成的 850 hPa 低频距平风场和整层(1000~300 hPa)低频水汽含量距平场(填色,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

(a)第一相位,(b)第二相位,(c)第三相位,(d)第四相位,(e)第五相位,(f)第六相位

Fig. 7 850 hPa low frequency wind anomalies and low frequency water vapor anomalies vertically integrated from 1000 to 300 hPa (shaded, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) during the six phases based on 10–13 d filtered precipitation in North China in summer 2012

(a) the first phase, (b) the second phase, (c) the third phase, (d) the fourth phase, (e) the fifth phase, (f) the sixth phase

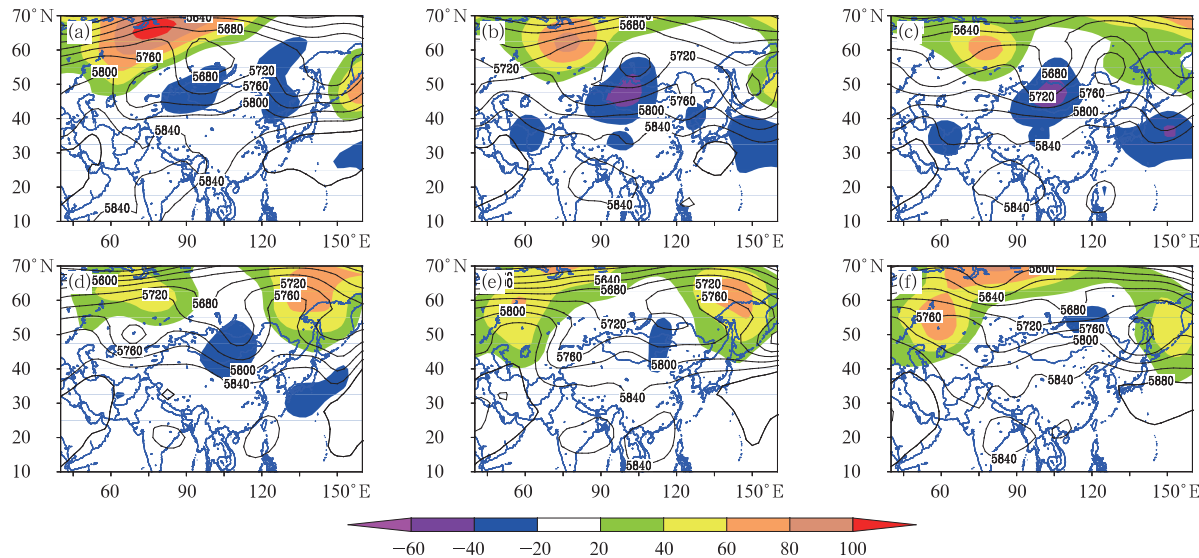


图 8 同图 7,但为 500 hPa 位势高度场(单位:gpm)和低频高度距平场(填色,单位:gpm)

Fig. 8 As in Fig. 7, but for 500 hPa geopotential height and low frequency geopotential height anomalies (shaded, unit: gpm)

图9是200 hPa低频风场距平以及相应低频散度距平场的合成图,从第一位相可以看到,伊朗高原上空为低频气旋式环流,中南半岛北部至青藏高原东部为弱的低频反气旋式环流,华北—黄淮—东北上空为低频气旋式环流,华北大部地区高空为偏强的低频偏北风,低频辐散较常年偏弱;随着10~13 d降水低频强度由弱变强,伊朗高原上空的低频气旋环流减弱消失,青藏高原东部的低频反气旋式环流加强,位置有所东移,华北上空的低频气旋式环流异常东移减弱,华北地区上空的低频西风异常加强,低

频散度显著增大。在第四位相时,华北至东北地区低频散度值达到最大,高空非常强的辐散环境有利于低层辐合加强。随着降水低频强度减弱,青藏高原东部的低频反气旋式环流继续东移减弱,伊朗高原上空再次出现低频气旋式环流。由此可以说明,青藏高原东部反气旋式低频环流的加强东移,使得高空急流的位置北抬,东亚高空急流加强,造成强烈的高空辐散,为华北地区的降水提供很好的动力条件,而伊朗高原上空的低频气旋式环流的建立和消失提前其他系统的变化,具有一定的预报指示意义。

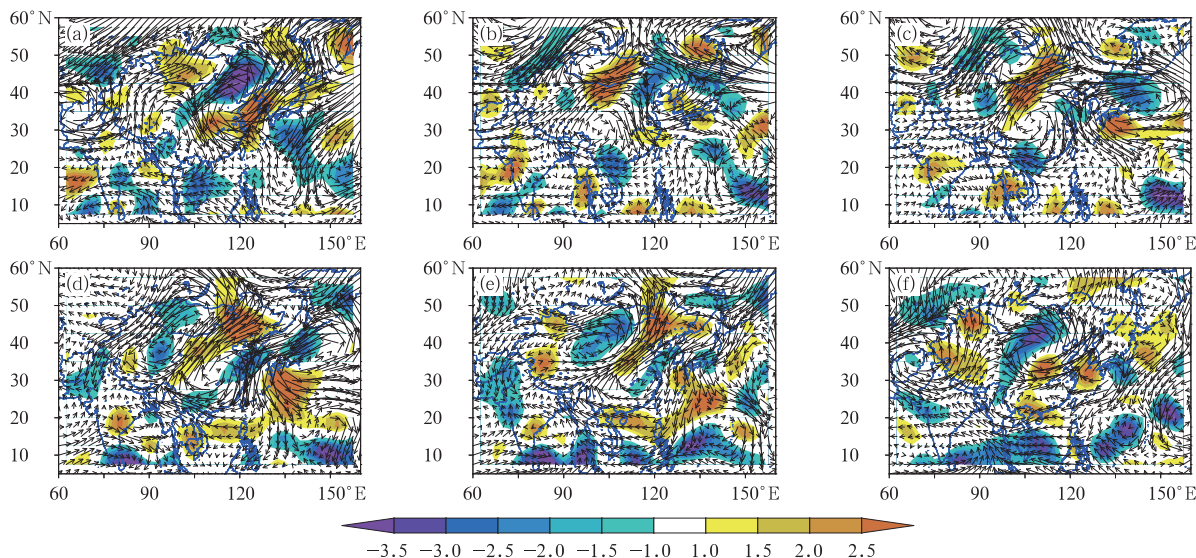


图9 同图7,但为200 hPa低频风场(矢线)和低频散度场(填色,单位: 10^{-6} s^{-1})

Fig. 9 As in Fig. 7, but for low frequency wind anomalies of 200 hPa level (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence fields (shaded, unit: 10^{-6} s^{-1})

5 结 论

本文对2012年华北夏季降水的低频振荡特征及其相应的低频大气环流进行了分析,结果表明:

(1) 2012年华北夏季降水存在显著的10~13 d低频振荡周期,振荡的演变和降水有很好的对应关系,大的降水过程基本发生在振荡的波峰处。

(2) 对流层中低层直接来自南海的低频南风对华北降水的贡献不是直接的。低频强降水发生前,首先在孟加拉湾地区的低频反气旋出现并逐渐加强,随之菲律宾至我国南海地区的低频环流系统逐渐向西北方向传播。同时由于和中高纬度低频系统的相互作用,东段西北太平洋副热带高压的强度减

弱,日本海地区高压脊发展,来自西太平洋的低频西南风和西段高压底部的低频东南气流汇合加强,华北地区变为受低频南风异常影响。同时,35°N以北西风槽前的低频偏南风东传,携带多路低频水汽为华北强降水的发生提供充沛的水汽条件。

(3) 伴随每次华北强降水过程,中高纬低频高度距平大值中心东移,西风槽在河套地区加深,并继续东移至华北地区,中高纬环流形势由较平直纬向环流调整为两脊一槽型。对流层上层位于伊朗高原的低频气旋式环流减弱,随后青藏高原东部的低频反气旋加强东移,使得东侧高空急流加强,位置明显北抬,华北大部正好位于高空低频辐散大值区附近,这种强烈的低频辐散场为华北降雨的提供一定的动力抬升条件。

参考文献

湛芸, 孙军, 徐珺, 等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (一)观测分析及思考. 气象, 38(10):1255-1266.

方翀, 毛冬艳, 张小雯, 等. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析. 气象, 38(10):1278-1287.

郝立生, 丁一汇. 2012. 华北降水变化研究进展. 地理科学进展, 31(5):593-601.

郝立生 闵锦忠 顾光芹. 2010. 华北夏季降水减少与北半球大气环流异常的关系. 大气科学学报, 33(4):420-426.

“华北暴雨”编写组. 1992. 华北暴雨. 北京:气象出版社, 182.

纪忠萍, 谷德军. 2012. 广东省前汛期暴雨与 500hPa 关键区准双周振荡. 应用气象学报, 21(6):671-684.

贾小龙, 梁潇云. 2011. 热带 MJO 对 2009 年 11 月我国东部大范围雨雪天气的可能影响. 热带气象学报, 27(5):639-648.

据建华, 赵尔旭. 2005. 东亚夏季风区的低频振荡对长江中下游旱涝的影响. 热带气象学报, 21(2):163-171.

李崇银. 1992. 华北地区汛期降水的一个分析研究. 气象学报, 50(1):41-49.

李崇银, 龙振夏, 穆明权. 2003. 大气季节内振荡及其重要作用. 大气科学, 27(4):518-535.

梁萍, 何金海, 陈隆勋, 等. 2007. 华北夏季强降水的水汽来源. 高原气象, 26(3):460-465.

陆尔, 丁一汇. 1996. 1991 年江淮特大暴雨与东亚大气低频振荡. 气

象学报, 54(6):730-736.

毛江玉, 吴国雄. 2005. 1991 年江淮梅雨与副热带高压的低频振荡. 气象学报, 63(5):762-770.

孙军, 湛芸, 杨舒楠, 等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (二)极端性降水成因初探及思考. 气象, 38(10):1267-1277.

王遵娅, 丁一汇. 2008. 夏季长江中下游旱涝年季节内振荡气候特征. 应用气象学报, 19(6):710-715.

占瑞芬, 孙国武, 赵兵科, 等. 2008. 中国东部副热带夏季风降水的准双周振荡及其可能维持机制. 高原气象, 27(Suppl):98-108.

周宁芳. 2012. 2012 年 7 月大气环流和天气分析. 气象, 38(10):1307-1312.

朱乾根, 徐国强. 2000. 1998 年夏季中国南部低频降水特征与南海低频夏季风活动. 气象学报, 20(3):239-248.

Jia X L, Chen L J, Ren F M, et al. 2011. Impacts of the MJO on winter rainfall and circulation in China. Adv Atmos Sci, 28(3):521-533.

Lau K M, Yang G J, Shen S H. 1998. Seasonal and intraseasonal climatology of summer monsoon over East Asia. Mon Wea Rev, 116(1):18-37.

Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to Wavelet Analysis. Bull Ame Meteor Soc, 79(1):61-78.

Zhang Suping, Jiang Shangcheng. 2001. Possible influence of ITCZ in Asian monsoon regions on rainy season anomaly of North China. Adv Atm Sci, 18(5):1018-1028.