

夏季青藏高原大气热源准双周振荡及其传播途径

钟珊珊^①, 贾巧^{①*}, 王美蓉^①, 赵丹^②^① 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气候与环境变化国际合作联合实验室, 江苏 南京 210044;^② 93117 部队, 江苏 南京 210018

* 联系人, E-mail: 1733871945@qq.com

2019-08-15 收稿, 2019-10-09 接受

国家自然科学基金资助项目(41775047; 41875076); 国家重点研发计划项目(2018YFC1505803)

摘要 采用 1979—2017 年 NCEP/NCAR 逐日再分析资料估算大气热源, 研究夏季青藏高原大气热源准双周振荡(Quasi-BiWeekly Oscillation, QBWO) 的特征及传播途径。结果表明: 青藏高原及其周边的大气热源 QBWO 的前两个主模态, 即荷载中心在高原东南部的全区一致型和高原东南-西北反位相变化的偶极型, 呈现了高原夏季大气热源 QBWO 自东向西传播过程中所处的两种不同状态。这主要是由于在中纬度地区对流层中上层, 低频大气环流的活动表现为大的异常气旋和反气旋环流从我国东北经青藏高原至西亚的自东向西的传播, 当移近高原时迅速增强, 当西移离开高原时明显减弱。在此过程中, 青藏高原及其周边、孟加拉湾以及印度半岛等地区的降水都发生了异常变化。

关键词
青藏高原;
大气热源;
准双周振荡;
传播途径

大量研究显示, 大气低频振荡即季节内时间尺度的变率具有全球性特征(Krishnamurti and Gadgi, 1985; 李崇银, 1991; Kikuchi and Wang, 2009), 并且在亚洲季风区异常活跃(庞玥等, 2013; Yang et al., 2014; Wang and Duan, 2015; Wang et al., 2018)。而青藏高原(以下统称高原)作为亚洲季风系统的重要组成部分, 是大气季节内振荡的活跃区及源地(刘炜等, 2012; Wang and Duan, 2015), 其上空大气的季节内振荡对东亚地区风场(Krishnamurti and Gadgi, 1985), 非绝热加热场(Luo and Yanai, 1984; 王群, 2015), 降水场(Liu et al., 2014)等多种气象要素场均有显著影响。甚至和南亚高压(王黎娟和葛静, 2016)、西太平洋副热带高压(巩远发等, 2006)、高原低涡(谢安等, 1989; Zhang et al., 2014; 李国平等, 2016)等天气系统的变化有密切联系。许多研究发现高原大气低频振荡主要存在 3 个周期: 10~20 d 的准双周振荡、7~9 d 和 30 d 以上的振荡(周兵等, 2000; 彭玉萍等, 2012; Hu et al., 2016; Wang et

al., 2018)。王黎娟和葛静(2016)分析了 1983—2012 年夏季高原东部大气热源低频振荡特征, 发现 10~20 d 振荡显著的年数远远多于 30~60 d 振荡显著的年数。同时 Wang and Duan(2015)指出, 在 1979—2011 年的高原降水场中, 大气热源准双周振荡(Quasi-BiWeekly Oscillation, QBWO) 每年均显著存在, 且对低频降水的方差贡献非常大, 甚至在个别年份超过了 50%。并且大气低频振荡在延伸期预报中有着重要的作用, 因此研究高原大气 QBWO 是非常必要的。

据前人研究, 高原东西部地形差异大, 夏季高原大气热源和水汽等气候变量存在显著不同的分布特征, 从而导致局地的云量及降水也有很大的区别(Chen et al., 2015)。同时高原南部又是亚洲夏季风的重要组成部分, 对高原大气热源及亚洲夏季风的低频振荡有显著影响(Wang and Duan, 2015)。故高原大气热源及其低频振荡存在不同的空间分布, 但目前关于高原大气热源低频振荡的研究多集

引用格式: 钟珊珊, 贾巧, 王美蓉, 等. 2020. 夏季青藏高原大气热源准双周振荡及其传播途径[J]. 大气科学学报, 43(3): 495-505.

Zhong S S, Jia Q, Wang M R et al. 2020. Quasi-biweekly oscillation of summer atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and its propagation pathways[J]. Trans Atmos Sci, 43(3): 495-505. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20190815001. (in Chinese).

中在高原东部(王黎娟和葛静,2016; Yang and Li, 2017)或南部(Yang et al. 2017)从高原全区的角度分析其大气热源低频振荡空间分布特征的研究并不多。有研究指出,低纬北传的低频信号可促使高原大气低频振荡产生和增强(王跃男等,2009),而高纬南传的低频信号也可影响高原(谢安等,1989)。此外,源自赤道西太平洋的低频信号,可向西北方向传播,经孟加拉湾和印度西北部,北上抵达高原,最后东移至东亚地区(Wang and Duan, 2015; Yang et al. 2017)。而高原本身作为低频振荡的源地也可激发沿亚欧大陆东海岸向东北方向传播的波列,其频散效应可影响到更远的东太平洋以及北美地区的大气环流。

可见,关于高原大气热源低频振荡的原因及传播途径目前还没有统一的结论。因此,本文将探讨夏季(6—8月)高原大气热源的低频振荡的时空演变规律,揭示高原大气热源低频振荡的传播途径,以期进一步理解高原大气热源低频振荡的物理机理以及对我国东部降水的可能影响,为提高我国汛期的季节内预测提供理论参考。

1 资料和方法

采用的资料有:1)1979—2017年美国气象环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)逐日

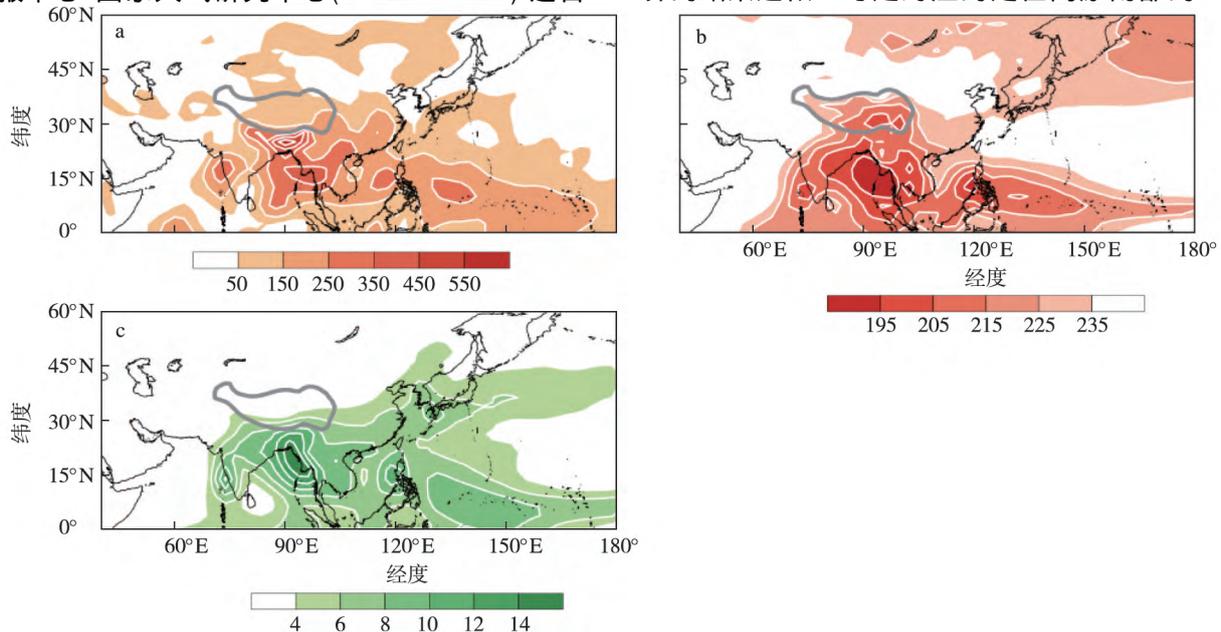


图1 1979—2017年夏季大气热源 $\langle Q_1 \rangle$ (a;单位: $W \cdot m^{-2}$)、OLR(b;单位: $W \cdot m^{-2}$)和降水(c;单位: mm)的空间分布(灰色粗实线表示3000 m地形等高线)

Fig.1 Distributions of (a) atmospheric heat source $\langle Q_1 \rangle$ (units: $W \cdot m^{-2}$), (b) OLR (units: $W \cdot m^{-2}$) and (c) precipitation (units: mm) in summer from 1979 to 2017 (The gray thick solid line indicates the 3000 m terrain contour)

再分析资料,水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,包括风场、温度和位势高度等,垂直方向共17层。2)1979—2017年美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的逐日向外长波辐射(OLR),水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。3)1997—2017年GPCP(Global Precipitation Climatology Project)逐日全球降水估计场,水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。

大气视热源 $\langle Q_1 \rangle$ 采用倒算法(Yanai et al., 1992)进行计算,该方法被广泛地应用于大气热源的研究(钟珊珊等,2009; Zhong et al. 2013, 2020; 姚秀萍等,2019)。本文通过3个步骤提取低频振荡信号:1)所有的逐日资料去除年循环;2)经5 d滑动平均去除天气尺度信号;3)采用Lanczos滤波器提取10~20 d的低频信号(姚菊香等,2012)。此外,还采用了功率谱分析、经验正交函数分解(EOF)等统计诊断方法,以及North检验、Student's t 检验等检验方法。

2 夏季高原大气热源的气候态

图1a为1979—2017年夏季整层大气热源 $\langle Q_1 \rangle$ 的水平分布,可见,夏季高原上空表现为热源,在其南部有一大值区,中心值达 $630 W \cdot m^{-2}$,这与Yang et al.(2017)利用欧洲中心逐日再分析资料计算的结果近似。与之对应的是在高原南部的OLR

低值区,即强对流区(图 1b),以及高原南坡迎风面的降水强值区(图 1c)。由于夏季风从热带地区带来充沛的水汽,在高原南坡汇聚抬升,产生较强的上升运动,伴随着降水和凝结潜热的释放。潜热加热是夏季高原大气热源的主要贡献因子(钟珊珊等, 2009; 何金海等, 2011),因而,在高原南坡大气热源大值区基本与对流大值区以及降水区相对应。此外,在印度半岛西北沿岸、中南半岛西部至孟加拉湾东北部、菲律宾群岛附近,各中心位置和范围也匹配较好,因而,基于 NCEP/NCAR 资料计算的大气视热源的分布基本合理可信。

3 夏季高原准双周大气热源的时空分布特征

何金海等(2011)指出,虽然整层大气热源最强中心不在高原上,但就单位厚度的最大加热率来说,高原与孟加拉湾上空的加热强度是相当的,故为了研究高原及周边区域的大气热源低频振荡特征,本文不同于 Yang et al.(2017)的只选择研究高原南部(79.5°~100.5°E, 25.5°~31.5°N),而是选择高原及周边区域(70°~105°E, 25°~40°N)进行分析。由夏季高原 $\langle Q_1 \rangle$ 的平均功率谱分析(图 2)可以看出,显著的峰点主要存在于 10~20 d 的波段。而 1979—2017 年逐年夏季的 $\langle Q_1 \rangle$ 的功率谱分析结果(图略)也显示,基本每一年都存在 10~20 d 的低频振荡周期,并通过了 95% 的置信度检验。可见,夏季青藏高原大气热源季节内振荡的主周期为 10~20 d 的 QBWO,这与彭玉萍等(2012)、Wang and Duan(2015)和 Hu et al.(2016)的结论一致。因而,本文将重点讨论高原 $\langle Q_1 \rangle > 10 \sim 20$ d 的 QBWO,文中所有的资料都经过 10~20 d 的滤波处理。

夏季高原及周边大气热源(经 10~20 d 滤波)

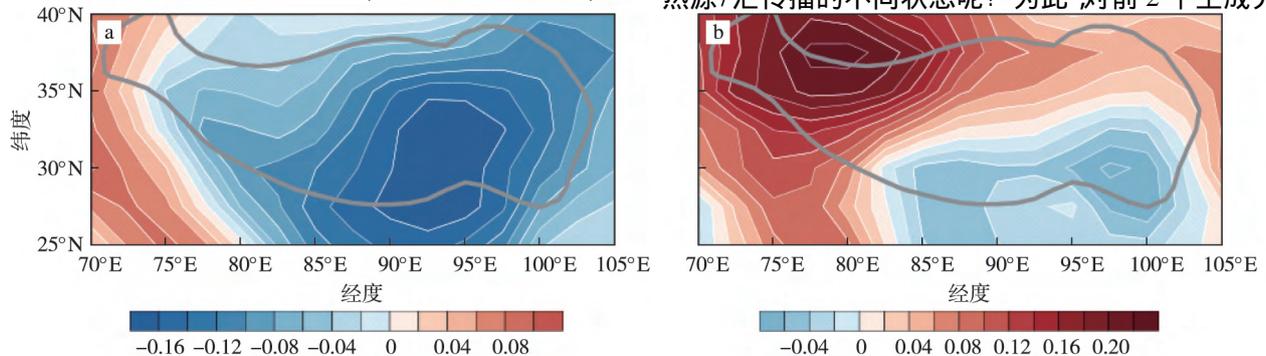


图 3 1979—2017 年夏季高原大气热源(经 10~20 d 滤波)的 EOF 分析:(a) EOF1;(b) EOF2

Fig.3 (a) EOF1 and (b) EOF2 of atmospheric heat source(filtered for 10—20 d) over the Tibetan Plateau in summer during 1979—2017

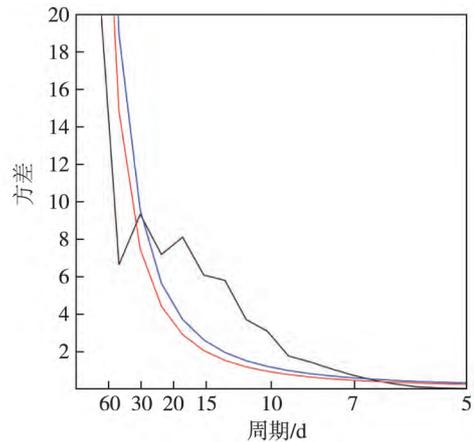


图 2 1979—2017 年夏季高原及周边区域逐日 $\langle Q_1 \rangle$ 的平均功率谱分析(单位: $W \cdot m^{-2}$; 红线、蓝线分别代表红噪声、95%置信度水平)

Fig.2 The averaged power spectrum analysis of the daily $\langle Q_1 \rangle$ over the Tibetan Plateau and its surrounding areas in the summer of 1979—2017 (units: $W \cdot m^{-2}$; Red and blue lines represent red noise and 95% confidence level, respectively)

的 EOF 分析结果(图 3)显示,前两个模态的方差贡献分别为 18.10% 和 10.84%,并通过 North 检验。第一模态 EOF1 的空间分布,除高原以西小部分地区为正荷载区,高原境内基本为全区一致的负荷载区,其中心区位于高原东南部。第二模态 EOF2 的空间分布则表现为高原东南部和西北部的反位相变化,西北为正荷载区,东南为较弱的负荷载区,呈东南-西北偶极型。Wang and Duan(2015)由亚洲夏季风区 $\langle Q_1 \rangle$ 的 10~20 d 低频分量 EOF 分析的前两个模态,揭示了赤道西太平洋的 QBWO 信号经孟加拉湾、青藏高原最终影响中国东部的逆时针传播途径。那么,图 3 中的这两个主模态是否反映了高原低频热源/汇传播的不同状态呢?为此,对前 2 个主成分

序列(PC1和PC2)做超前和滞后相关分析,结果如图4所示。

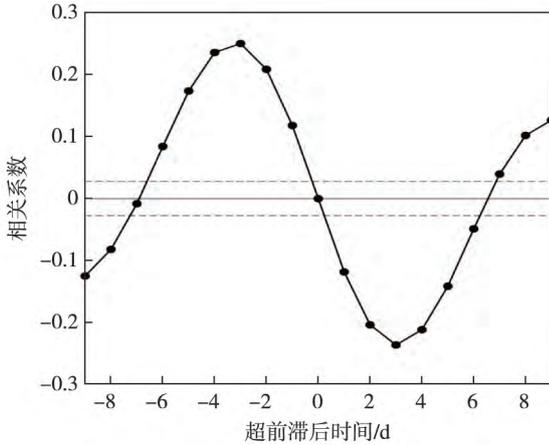


图4 1979—2017年PC1和PC2的超前滞后相关(虚线表示95%置信度水平;横轴正值表示PC1超前PC2,负值表示PC1滞后PC2)

Fig.4 Lead-lag correlation between PC1 and PC2 from 1979 to 2017 (Dashed line represents 95% confidence level. The positive value of the horizontal axis indicates that PC1 is ahead of PC2, and the negative value indicates that PC1 is behind PC2)

图4中当PC1超前PC2 3 d时(约1/4个循环周期),二者为最大负相关,相关系数为-0.24;当PC1滞后PC2 3 d时,二者为最大正相关,相关系数为0.25。由此可见,EOF1和EOF2可能反映的是青藏高原及其周边大气低频热源传播的循环周期中所处的不同状态,整个循环周期约为12 d。下面将采用位相合成的方法来进一步验证这种传播关系。

参考 Matthews(2000)的方法,将在某一时刻 t 的QBWO用二维空间矢量 $Z(t)$ 来表示:

$$Z(t) = [PC1(t) \quad PC2(t)]; \quad (1)$$

$$A(t) = [PC1^2(t) + PC2^2(t)]^{1/2}; \quad (2)$$

$$\alpha(t) = \tan^{-1} \left[\frac{PC2(t)}{PC1(t)} \right]. \quad (3)$$

其中: $A(t)$ 为QBWO的振幅; $\alpha(t)$ 为PC1和PC2两者之间的位相角,范围为 $[-\pi, \pi]$ 。根据 $\alpha(t)$,将每一个QBWO循环周期划分为8个位相,相邻位相之间 $\alpha(t)$ 的变化为 $\pi/4$ 。图5显示了PC1和PC2随位相角 $\alpha(t)$ 变化的关系。定义PC1振幅达正的最大值时位相角为0,此时,PC2振幅为0,3 d后(即位相角 $\pi/2$ 处)PC2的振幅达到负的最大值,PC1的振幅变为0。

为便于揭示高原大气热源QBWO随位相的演变特征,将10~20 d的大气热源低频分量分别投影

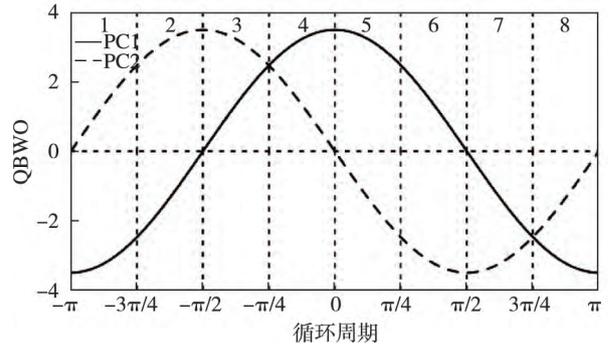


图5 一个QBWO循环周期内PC1和PC2随时间变化示意(顶部数字1~8代表1~8位相)

Fig.5 Schematic diagram of temporal variations of PC1 and PC2 in a QBWO cycle (The top numbers 1 to 8 in the figure indicate phases 1 to 8)

在1~8位相上,再对每个位相进行合成分析。具体方法如下:在 $[-\pi, \pi]$ 范围内,根据 $\alpha(t)$ 的大小,并结合PC1和PC2的符号和大小,将其分别投影到8个位相中(如图6)。本文侧重选取活跃的QBWO事件进行位相合成分析,选取标准为 $I_{PC1}^2 + I_{PC2}^2 \geq 1$,即图6中红色圆外的点。基于图6中PC在各位相的分布,下文分别对各物理量的低频场进行合成分析。

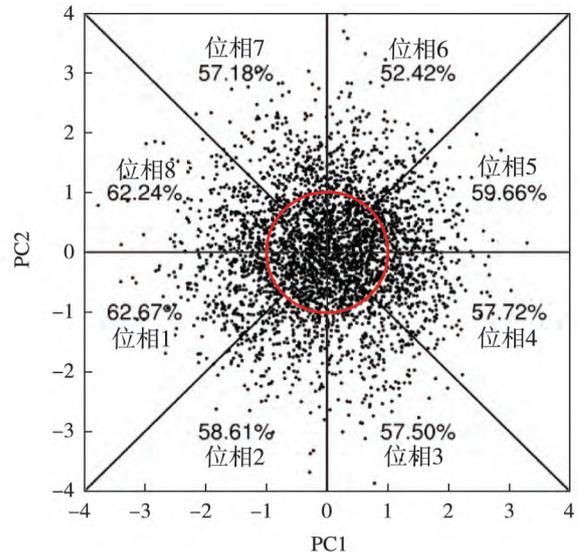


图6 PC1和PC2在各位相中的分布(红色实线圆外为 $I_{PC1}^2 + I_{PC2}^2 \geq 1$ 的点,即QBWO活跃事件,百分数为QBWO活跃事件在各位相出现的比例)

Fig.6 Distribution of PC1 and PC2 in each phase (Points outside the red solid line circle ($I_{PC1}^2 + I_{PC2}^2 \geq 1$) represent active QBWO events. Percentages are the ratios of active QBWO events in each phase)

4 夏季高原大气热源准双周振荡的传播及其相应的环流特征

基于上文中 PC1 和 PC2 的位相分布,低频大气热源和 OLR 场在 8 个位相中的合成分析结果如图 7 所示。

在第 1 位相(图 7a),高原及其周边至华北平原均为正异常热源所控制,中心值位于高原东南部以及高原南坡。从黑海、里海、咸海,直至孟加拉湾东北海域,则呈西北-东南走向的负异常热源。在第 2 位相(图 7b),正异常热源区开始向西偏北方向移动,异常中心移至高原西北部,范围收缩强度减弱。同时,负异常热源相西北方向聚合,中心在黑海、里海附近。到第 3 位相(图 7c),正热源的主体继续向西,抵达高原西北部至咸海,而负热源在欧洲南部进一步减弱。此时,高原的东南及南坡附近迅速转为负热源。高原的东北方向蒙古高原附近开始出现负热源。第 4 位相(图 7d),正热源主体全部移出高原,强度减弱明显,并与孟加拉湾地区的正热源连成西北-东南方向的正热源带。负热源在高原东北方向,贝加尔湖以南的区域,强度增强范围扩大并向西抵达高原东部,与高原东南及南坡增强的负热源汇合。

第 5 位相(图 7e),负热源自东向西移动,高原及其周边至华北平原均为负异常热源所控制。呈西北-东南走向的正异常热源向西北方向收缩。这与第 1 位相情形基本相反。接下来的第 6—7 位相(图 7f—g),高原上的负热源持续向西偏北方向移动,中心经高原西北部,最后逐渐移出高原(第 8 位相,图 7h)。高原东南及南坡在负热源移至高原西部的同时,快速转为正热源,高原东北方向贝加尔湖以南的正热源出现并向高原东部扩展增强(第 7—8 位相)。至此,完成与 1~4 位相反位相的变化过程,形成完整的循环,周期约为 12 d。

由此可见,源自贝加尔湖以南区域的异常热源自东向西移动,在移近和进入高原东部时其强度和范围都明显增强,与高原东南和南坡的异常热源合并为一体,然后向高原西北方向移动,当其西移出高原,其强度和范围便逐渐减弱消失;孟加拉湾附近也是低频热源的活跃中心,并随位相演变向西北方向传播。整个过程中,在低纬度,OLR 的异常中心与热源异常中心的匹配较好,而中纬度二者的中心并未完全吻合,这主要是由于热带地区潜热加热是大气热源的主要贡献因子,而对于中纬度潜热加热只

是非绝热加热的一部分,感热加热的贡献也不可忽视,情况更为复杂。

与上述青藏高原大气热源的 QBWO 自东向西的传播活动相对应的,对流层上层 200 hPa 低频环流随位相的演变特征,如图 8 所示,表现为中纬度大的异常气旋和反气旋自东亚经青藏高原至西亚路径上的传播与更替,异常环流中心主要集中在 $30^{\circ} \sim 45^{\circ} \text{N}$ 。

第 1 位相(图 8a),高原主体被异常气旋性环流(C1)控制,其中心在高原西北部,C1 以西为一个异常反气旋性环流(A1),中心在黑海至里海的南部地区。第 2 位相(图 8b),A1 西移减弱,C1 中心也向西移动到高原西北角,高原西部地区仍受异常气旋性环流控制。此时,在贝加尔湖以南,我国东北至高原东北地区新生成一个异常反气旋性环流(A2),其中心在黄土高原地区。第 3 位相(图 8c),A1 继续西移并逐渐减弱消失,C1 异常环流中心离开高原,在其西移的过程中,C1 受紧随其后的 A2 的挤压而变形,向东南方向伸出一狭长的气旋式切变,该区域从中南半岛北部一直延伸到印度半岛北部。第 4 位相(图 8d),C1 主体西移离开高原,中心位于伊朗高原上空,强度迅速减弱,其底部东南方向的狭长切变线也相应向西北收缩,控制伊朗高原南部-印度半岛北部-孟加拉湾北部上空,此时 A2 中心位于高原东北地区,其异常环流基本控制了整个高原。

第 5—8 位相(图 8e—h),C1 西移减弱消失,A2 中心从高原东北部快速西移至高原西北部,高原东北方向又有新的异常气旋性环流(C2)生成。伴随着 A2 的西移,C2 逐渐控制高原,完成一个循环周期。

对流层中层 500 hPa 位势高度场和风场的位相合成的演变(图 9),与 200 hPa 相类似,异常环流中心基本一一对应,呈准相当正压结构。基于 PC1 和 PC2 的合成位相所对应的夏季 200 hPa 和 500 hPa 准双周位势高度场沿 $35^{\circ} \sim 45^{\circ} \text{N}$ 平均的位相-经度剖面(图 10),清楚地再现中纬度 QBWO 信号自东向西的移动,并且对流层中上层的异常信号基本一致,呈准相当正压结构。

夏季青藏高原准双周大气热源在自东向西的传播过程中,高原及其周边地区的降水也发生异常的变化,图 11 是相应的降水合成场。第 1 位相,由于高原上空为气旋性环流异常 C1(图 8a 图 9a),这将加大高原的加热气泵效应,热源异常增强。高原东部处于异常的东南风和西南风形成的气旋式切变的

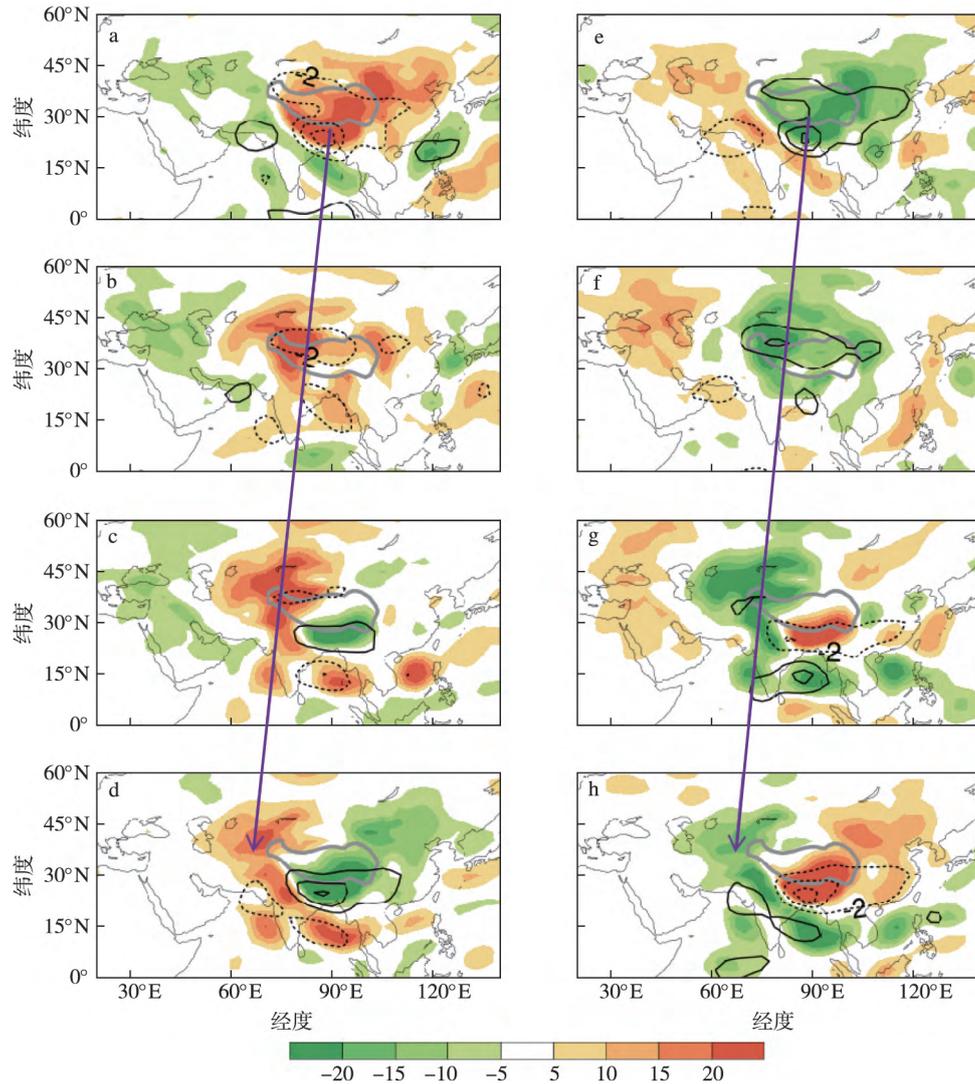


图7 1979—2017年夏季准双周大气热源(阴影区;单位: $W \cdot m^{-2}$)和OLR场(等值线;单位: $W \cdot m^{-2}$)随1~8位相(a—h)的演变(阴影区和等值线均达95%的置信水平;紫色长箭头表示QBWO信号传播的方向)

Fig.7 Evolution of quasi biweekly atmospheric heat source(shaded areas; units: $W \cdot m^{-2}$) and OLR field(contours; units: $W \cdot m^{-2}$) with (a—h) 1—8 phases in the summer of 1979—2017(Shaded areas and contours are statistically significant at 95% confident level. Purple long arrow indicates the direction of QBWO signal propagation)

控制下,水汽辐合上升运动增强,降水异常偏多(图11a)。高原南坡、孟加拉湾东部-中南半岛西部沿岸,均在C1底部的异常偏西气流控制下,致使西南季风增强,降水异常偏多。江南受A2底部异常偏东北气流影响(图9b),西南季风被削弱,水汽输送减少,降水异常偏少。

第2位相,随着C1西移(图9b),高原上相应的大气热源以及降水区西移(图11b)。第3位相,由于高原东部A2靠近并控制高原东部(图9c),高原东部转为负热源(图7c),此时高原南坡由偏西风转为偏东风,削弱了西南暖湿气流的输送,阻碍了水汽

和热量在高原南坡辐合,因而出现降水负异常和负热源(图11c)。而C1受到A2挤压变形,在东南方向延伸出一狭长的偏东风和偏西风的气旋式切变区,沿切变线附近,对应着印度半岛北部至孟加拉湾附近的西北-东南走向的降水异常带(图11c)。第4位相,随着C1减弱西移至伊朗高原,其东南向延伸的气旋性切变相应地减弱并向西北方向收缩,孟加拉湾的异常降水中心向西北移至印度半岛北部附近。高原受A2控制,全境为大气负热源,高原东部也开始出现降水负异常。第5位相,C1减弱消失,A2在高原上达到最强,相应的负热源范围最大,强

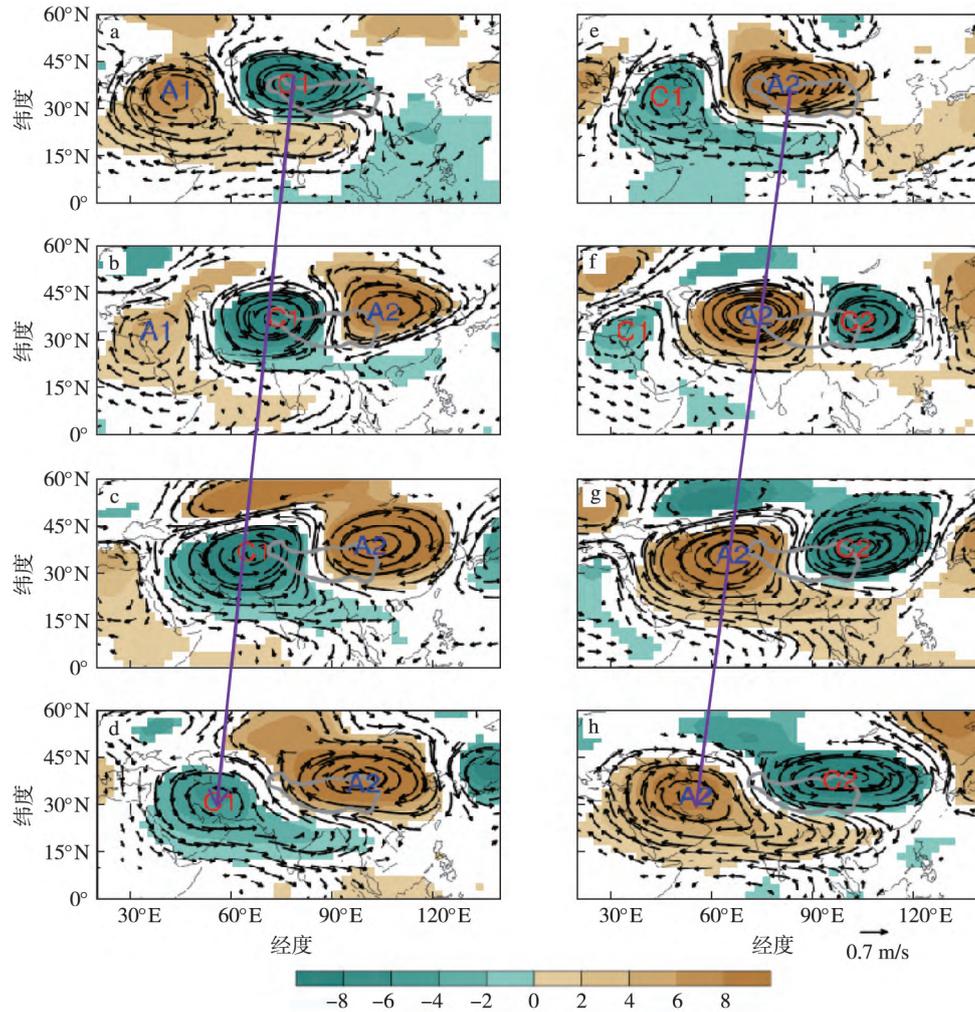


图8 1979—2017年夏季200 hPa准双周风场(箭头;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和位势高度场(阴影区;单位:gpm)随1~8位相(a—h)的演变(箭头和阴影区均达95%的置信度水平;图中字母A和C分别代表反气旋和气旋)

Fig.8 Evolution of quasi biweekly wind field (arrows; units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and geopotential height field (shaded areas; units: gpm) at 200 hPa with (a—h) 1—8 phases in the summer of 1979—2017 (Arrows and shaded areas are statistically significant at 95% confident level. The letters A and C in the figure represent anticyclone and cyclone, respectively)

度最强,高原东部出现负降水异常中心。随着A2取代C1,自西向东移动,相应的降水异常和大气热源异常也完成一次更替(第6—8位相)。

5 结论和讨论

采用1979—2017年NCEP/NCAR逐日再分析资料估算了青藏高原及其周边大气热源,确定了其季节内振荡的主周期为10~20 d的QBWO,并探讨了QBWO传播规律及其可能原因,结论如下:

夏季高原及其周边地区准双周大气热源存在两个主要模态:第一模态基本表现为全区一致型,荷载中心位于高原东南部,第二模态表现为高原东南-西

北反位相的偶极型。这两个主模态实际反映了高原大气热源自东向西传播过程所处的不同状态。源自蒙古高原至华北地区的异常热源自东向西移动,在移近和途经高原时强度和范围都明显增强,当其西移出高原,便逐渐减弱消失。这主要是由于中纬度地区对流层的中上层,低频环流的活动表现为大的异常气旋和反气旋环流从我国东北经青藏高原至西亚的自东向西的传播,当移近高原时迅速增强,当西移离开高原时,其强度明显减弱。在此过程中,高原及其周边、孟加拉湾以及印度半岛等地区的降水都发生异常的变化。

影响青藏高原大气热源的季节内振荡的原因是

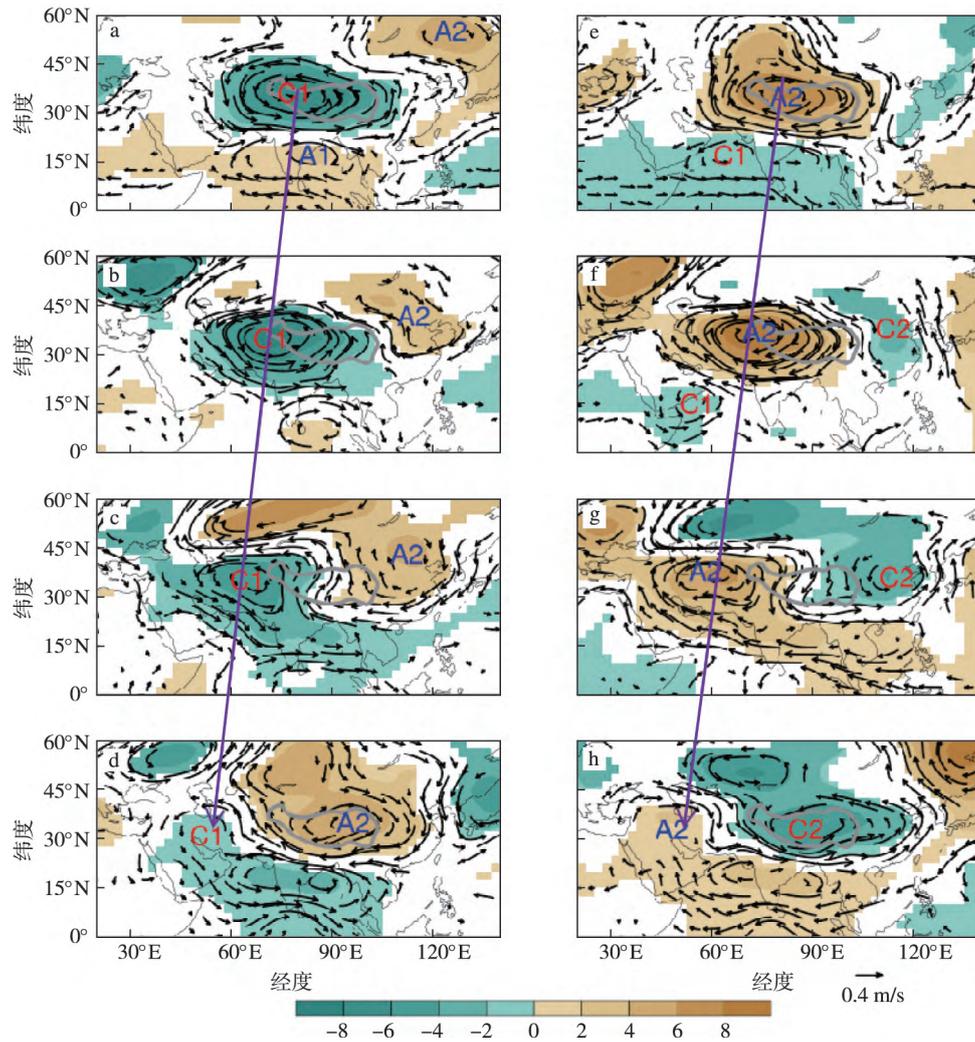


图9 1979—2017年夏季500 hPa准双周风场(箭矢;单位: $m \cdot s^{-1}$)和位势高度场(阴影区;单位: gpm)随1~8位相(a—h)的演变(箭矢和阴影区均达95%的置信水平;图中字母A和C分别代表反气旋和气旋)

Fig.9 Evolution of quasi biweekly wind field (arrows; units: $m \cdot s^{-1}$) and geopotential height field (shaded areas; units: gpm) at 500 hPa with (a—h) 1—8 phases in the summer of 1979—2017 (Arrows and shaded areas are statistically significant at 95% confident level. The letters A and C in the figure represent anticyclone and cyclone, respectively)

多方面的,有来自低纬洋面的(Wang and Duan, 2015; Yang et al. 2017),中纬度 Rossby 波列的扰动(Hu et al. 2016),高原下垫面(如雪盖、植被)以及降水等等。本文 QBWO 信号在移近和到达高原上空增强,这可能与高原大地型的放大效应有关,其地形的抬升作用,导致该区的信号会被进一步扩大。高原热力作用的低频振荡可以通过下游传播或者改

变相应的环流场,较强影响了北半球夏季季风区的洪涝和发展,因而重新认识高原大气热源的低频振荡以及影响因子是非常有必要的。

此外,不同的资料估算的大气热源的结果存在差别, Zhong et al. (2020) 采用 JRA55 估算的大气热源的 QBWO 的传播,与本文 NCEP 资料的结果在低纬度地区的差别较大。

参考文献(References)

Chen J H, Wu X Q, Yin Y et al. 2015. Characteristics of heat sources and clouds over Eastern China and the Tibetan Plateau in boreal summer [J]. *J Climate*, 28(18): 7279-7296.
 巩远发, 许美玲, 何金海, 等. 2006. 夏季青藏高原东部降水变化与副热带高压带活动的研究 [J]. *气象学报*, 64(1): 90-99. Gong Y F, Xu M L,

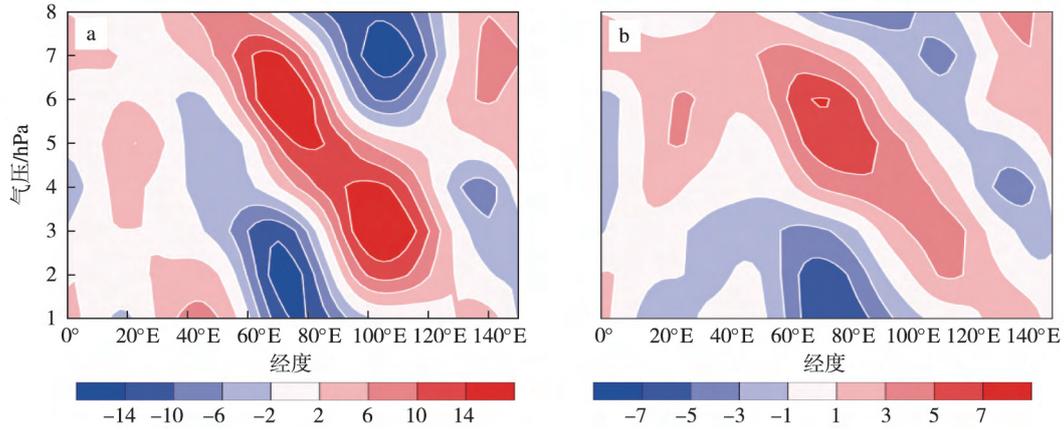


图 10 1979—2017 年夏季准双周位势高度场沿 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 平均的位相-经度剖面(单位: gpm): (a) 200 hPa; (b) 500 hPa

Fig.10 Phase-longitude profile of the quasi biweekly geopotential height field along $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ in the summer of 1979—2017 (units: gpm): (a) 200 hPa; (b) 500 hPa

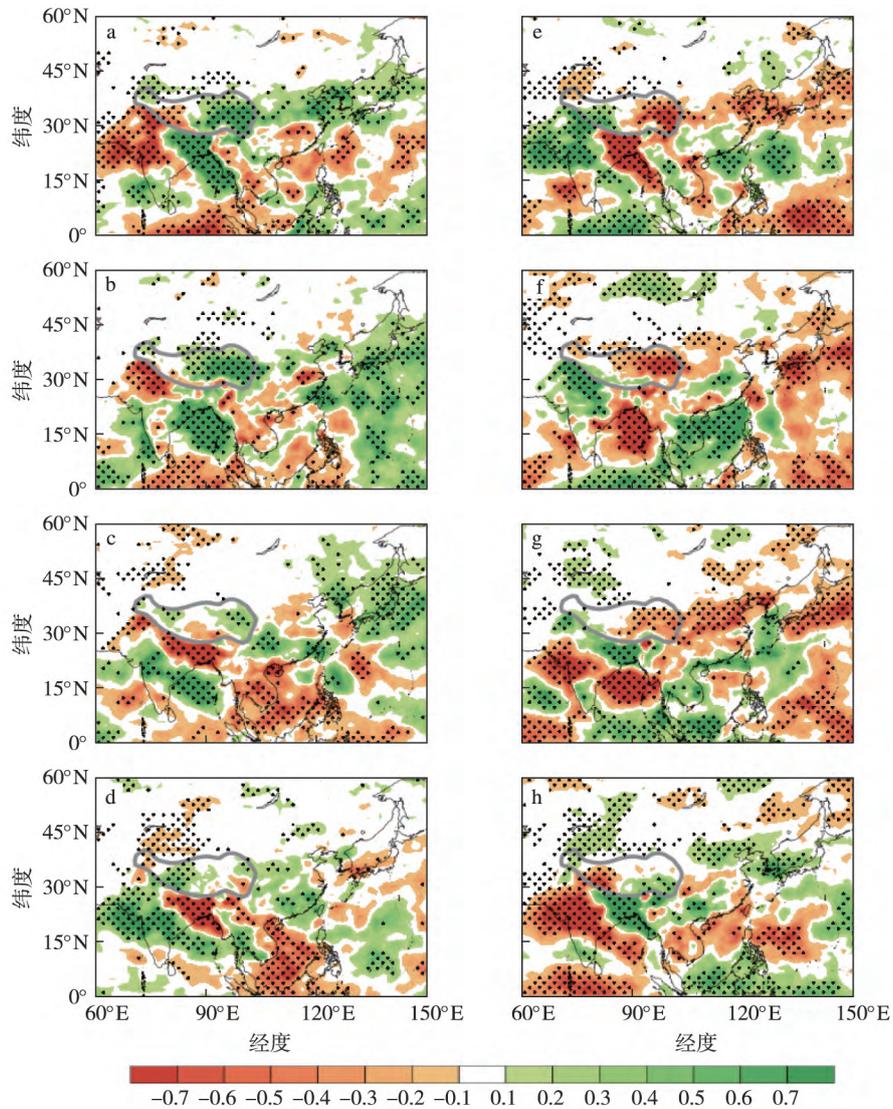


图 11 1997—2017 年夏季准双周降水场随 1~8 位相(a—h)的演变(单位: mm; 打点区域达 95% 的置信水平)

Fig.11 Evolution of quasi biweekly precipitation field (units: mm) with (a—h) 1—8 phases in the summer of 1997—2017 (Dotted areas are statistically significant at 95% confident level)

- He J H et al. 2006. On the relationship between the eastern Tibetan plateau rainfall and subtropical high shift in summer [J]. *Acta Meteorol Sin* ,64(1): 90-99. (in Chinese) .
- 何金海 徐海明 钟珊珊 等 2011. 高原大气热源特征及其影响和可能机制 [M]. 北京: 气象出版社. He J H ,Xu H M ,Zhong S S ,et al. 2011. Characteristics of atmospheric heat sources over the Tibetan Plateau and their effects and possible mechanisms [M]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese) .
- Hu W T ,Duan A M ,Li Y et al. 2016. The intraseasonal oscillation of eastern Tibetan Plateau precipitation in response to the summer Eurasian wave train [J]. *J Climate* ,29(20): 7215-7230.
- Kikuchi K ,Wang B 2009. Global perspective of the quasi-biweekly oscillation [J]. *J Climate* ,22(6): 1340-1359.
- Krishnamurti T N ,Gadgil S 1985. On the structure of the 30 to 50 day mode over the globe during FGGE [J]. *Tellus A* ,37A(4): 336-360.
- 李崇银 1991. 30~60 天大气振荡的全球特征 [J]. *大气科学* ,15(3): 66-76. Li C Y 1991. Global characteristics of 30-60 day atmospheric oscillation [J]. *Chin J Atmos Sci* ,15(3): 66-76. (in Chinese) .
- 李国平 卢会国 黄楚惠 等 2016. 青藏高原夏季地面热源的气候特征及其对高原低涡生成的影响 [J]. *大气科学* ,40(1): 131-141. Li G P ,Lu H G ,Huang C H et al. 2016. A climatology of the surface heat source on the Tibetan Plateau in summer and its impacts on the formation of the Tibetan Plateau vortex [J]. *Chin J Atmos Sci* ,40(1): 131-141. (in Chinese) .
- Liu H B ,Yang J ,Zhang D L et al. 2014. Roles of synoptic to quasi-biweekly disturbances in generating the summer 2003 heavy rainfall in East China [J]. *Mon Wea Rev* ,142(2): 886-904.
- 刘伟 周顺武 杨双艳 2012. 青藏高原大气低频振荡研究进展 [J]. *干旱气象* ,30(1): 107-113 ,129. Liu W ,Zhou S W ,Yang S Y 2012. Progress in research on low frequency oscillation over the Tibetan Plateau [J]. *Arid Meteorol* ,30(1): 107-113 ,129. (in Chinese) .
- Luo H B ,Yanai M 1984. The large-scale circulation and heat sources over the Tibetan Plateau and surrounding areas during the early summer of 1979. Part II: heat and moisture budgets [J]. *Mon Wea Rev* ,112(5): 966-989.
- Matthews A J 2000. Propagation mechanisms for the Madden-Julian oscillation [J]. *Quart J Roy Meteor Soc* ,126(569): 2637-2651.
- 庞玥 王黎娟 于波 2013. 江淮流域梅雨期降水与 10~30 d 低频振荡的联系 [J]. *大气科学学报* ,36(6): 742-750. Pang Y ,Wang L J ,Yu B 2013. The relationship between 10-30 d low-frequency oscillation and the rainfall over Changjiang-Huaihe River Valley during Meiyu period [J]. *Trans Atmos Sci* ,36(6): 742-750. (in Chinese) .
- 彭玉萍 何金海 陈隆勋 等 2012. 1981—2000 年夏季青藏高原大气热源低频振荡特征及其影响 [J]. *热带气象学报* ,28(3): 330-338. Peng Y P ,He J H ,Chen L X et al. 2012. A study on the characteristics and effect of the low-frequency oscillation of the atmospheric heat source over the eastern Tibetan Plateau from 1981 to 2000 [J]. *J Trop Meteor* ,28(3): 330-338. (in Chinese) .
- 王黎娟 葛静 2016. 夏季青藏高原大气热源低频振荡与南亚高压东西振荡的关系 [J]. *大气科学* ,40(4): 853-863. Wang L J ,Ge J 2016. Relationship between low-frequency oscillations of atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and longitudinal oscillations of the south Asia high in the summer [J]. *Chin J Atmos Sci* ,40(4): 853-863. (in Chinese) .
- Wang M R ,Duan A M 2015. Quasi-biweekly oscillation over the Tibetan Plateau and its link with the Asian summer monsoon [J]. *J Climate* ,28(12): 4921-4940.
- Wang M R ,Wang J ,Duan A M et al. 2018. Coupling of the quasi-biweekly oscillation of the Tibetan Plateau summer monsoon with the arctic oscillation [J]. *Geophys Res Lett* ,45(15): 7756-7764.
- 王群 周文君 张福颖 等 2015. 南亚高压位置与中南半岛和青藏高原热源变化的关系 [J]. *大气科学学报* ,38(5): 716-720. Wang Q ,Zang W J ,Zang F Y et al. 2015. Relationship between South Asia High's position and changes of heat sources over Indo-China Peninsula and Tibetan Plateau [J]. *Trans Atmos Sci* ,38(5): 716-720. (in Chinese) .
- 王跃男 陈隆勋 何金海 等 2009. 夏季青藏高原热源低频振荡对我国东部降水的影响 [J]. *应用气象学报* ,20(4): 419-427. Wang Y N ,Chen L X ,He J H et al. 2009. Effect of summer heat source low-frequency oscillation over the Tibetan Plateau on precipitation in Eastern China [J]. *J Appl Meteor Sci* ,20(4): 419-427. (in Chinese) .
- 谢安 叶谦 陈隆勋 1989. 青藏高原及其附近地区大气周期振荡在 OLR 资料上的反映 [J]. *气象学报* ,47(3): 272-278. Xie A ,Ye Q ,Chen L X , 1989. The atmospheric oscillations over the Tibetan Plateau and surrounding areas as revealed from olr data [J]. *Acta Meteorol Sin* ,47(3): 272-278. (in Chinese) .
- Yanai M ,Li C F ,Song Z S 1992. Seasonal heating of the Tibetan Plateau and its effects on the evolution of the Asian summer monsoon [J]. *J Meteor Soc Japan* ,70(1B): 319-351.
- Yang J ,Bao Q ,Wang B et al. 2014. Distinct quasi-biweekly features of the subtropical East Asian monsoon during early and late summers [J]. *Clim Dyn* ,42(5/6): 1469-1486.
- Yang J ,Bao Q ,Wang B et al. 2017. Characterizing two types of transient intraseasonal oscillations in the Eastern Tibetan Plateau summer rainfall [J]. *Clim Dyn* ,48(5/6): 1749-1768.
- Yang S Y ,Li T 2017. Causes of intraseasonal diabatic heating variability over and near the Tibetan Plateau in boreal summer [J]. *Clim Dyn* ,49(7/8): 2385-2406.
- 姚菊香 李丽平 罗璇 等 2012. 提取准双周和准一月低频振荡的 Lanczos 滤波器及其应用 [J]. *大气科学学报* ,35(2): 221-228. Yao J X ,Li L P ,Luo X et al. 2012. Lanczos filter suitable for filtering quasi-two-week and quasi-one-month oscillations and its applications [J]. *Trans Atmos Sci* ,35(2): 221-228. (in Chinese) .

- 姚秀萍,张硕,闫丽朱. 2019. 青藏高原大气热源及其影响的研究进展[J]. 大气科学学报, 42(5): 641-651. Yao X P, Zang S, Yan L Z. 2019. Research progress on the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and its influence[J]. Trans Atmos Sci, 42(5): 641-651. (in Chinese).
- Zhang P F, Li G P, Fu X, et al. 2014. Clustering of Tibetan Plateau vortices by 10—30-day intraseasonal oscillation[J]. Mon Wea Rev, 142(1): 290-300.
- 钟珊珊,何金海,管兆勇 等. 2009. 1961—2001 年青藏高原大气热源的气候特征[J]. 气象学报, 67(3): 407-416. Zhong S S, He J H, Guan Z Y, et al. 2009. Climatic characteristics of the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau during 1961—2001[J]. Acta Meteorol Sin, 67(3): 407-416. (in Chinese).
- Zhong S S, Wu Z W, He J H. 2013. Comparisons of the thermal effects of the Tibetan Plateau with NCEP-I and ERA-40 reanalysis data[J]. Atmosphere-Ocean, 51(1): 75-87.
- Zhong S S, Jia Q, Zhu Z W, et al. 2020. Two propagation pathways of the boreal summer quasi-biweekly oscillation of the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau[J]. Atmosphere-Ocean, 58(1): 60-78.
- 周兵,何金海,徐海明. 2000. 青藏高原气象要素场低频特征及其与夏季区域降水的关系[J]. 大气科学学报, 23(1): 93-100. Zhou B, He J H, Xu H M. 2000. LFO characteristics of meteorological elements over Tibetan Plateau and the relations with regional summer rainfall[J]. Trans Atmos Sci, 23(1): 93-100. (in Chinese).

Quasi-biweekly oscillation of summer atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and its propagation pathways

ZHONG Shanshan¹, JIA Qiao¹, WANG Meirong¹, ZHAO Dan²

¹Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME) / Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD) / Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

²Army 93117 of PLA, Nanjing 210018, China

Intra-seasonal Oscillation (ISO) with a time scale between 10 and 90 days is one of the most significant climatic phenomena. Abundant observation researches have proved that the ISO of diabatic heating over the Tibetan Plateau (TP) is active, which is not only affected by the low-frequency activity from mid- and high-latitude, but is also affected more significantly by the inter-seasonal thermal forcing of tropics. It is more likely to be an important source of predictability for intra-seasonal prediction. Therefore, it is necessary to understand the ISO of the TP's thermodynamic effect and its propagation. Based on the daily reanalysis data of NCEP/NCAR from 1979 to 2017, the atmospheric heat source is estimated. The characteristics and propagation pathway of Quasi-BiWeekly Oscillation (QBWO) of the atmospheric heat source over the TP in summer are investigated. Results show that the first two leading modes of the quasi-biweekly atmospheric heat source over the TP and its surrounding areas, i.e. the uniform pattern with the load center in the southeast of the TP and the dipole pattern with the southeast-northwest antiphase change in the TP, reflect two different states of QBWO of the atmospheric heat source over the TP during its propagation from east to west in summer. This is mainly because in the middle and upper troposphere of the mid-latitude area, the activities of the quasi-biweekly atmospheric circulation are shown as the propagation of large anomalous cyclones and anticyclones from Northeast China to West Asia from east to west through the TP. When they move near the TP, they increase rapidly, and when they move away from the TP in the west, they decrease obviously. In addition, QBWO of the heat source over the TP modulates the precipitation anomalies in the TP and its surrounding areas, the Bay of Bengal and the Indian Peninsula. However, the further study is needed to explain the physical mechanism of the precipitation anomalies caused by thermodynamic effect from the TP.

Tibetan Plateau; atmospheric heat source; Quasi-Biweekly Oscillation; propagation pathway

doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20190815001

(责任编辑: 张福颖)