

# 中高纬和低纬 10-30 天大气低频振荡对中国夏季降水的影响

郭子羿<sup>1</sup>, 黄乾<sup>1\*</sup>, 姚素香<sup>1</sup>

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, 南京 210044

\* 通讯作者: [huangq@nuist.edu.cn](mailto:huangq@nuist.edu.cn)

**摘要** 大气低频振荡与中国夏季降水及灾害性天气密切相关, 研究 10-30 天低频振荡对天气气候的影响具有重要意义。本文利用站点观测和 ERA5 再分析数据等, 研究了 1991-2020 年间中高纬和低纬 10-30 天低频振荡对中国夏季平均降水的影响及机理。由奇异值分解(SVD)分析得到, 中高纬 10-30 天振荡与长江-华南反位相降水分布有密切关系, 贝加尔湖以北振荡偏弱, 贝加尔湖以南振荡偏强时, 长江流域降水显著偏少, 南海至华南地区降水显著偏多; 低纬 10-30 天振荡的关键区则位于西北太平洋, 该区域振荡偏强时, 华南地区降水为显著正异常。中高纬 10-30 天振荡主要通过波流相互作用影响夏季副热带西风急流的平均位置, 使得急流附近次级环流的位置发生相应异常, 从而间接影响长江流域和南海至华南地区的降水多寡, 使其呈现异常的反位相分布; 区别于中高纬度的是, 低纬西北太平洋 10-30 天振荡通过向西-西北传播至华南地区, 直接引起华南地区的降水异常。

**关键词** 10-30 天大气低频振荡, 夏季平均降水, 副热带西风急流, 波流相互作用

文章编号 2023126B

中图分类号

文献标识码

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2402.23126

## Effects of 10-30-day Atmospheric Low Frequency Oscillations at Mid-High Latitudes and Low Latitudes on Summer Precipitation in China

Guo Ziyi<sup>1</sup>, Huang Qian<sup>1\*</sup>, Yao Suxiang<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education and Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

\* Correspondence: [huangq@nuist.edu.cn](mailto:huangq@nuist.edu.cn)

**Abstract** Atmospheric low frequency oscillations are closely related to summer precipitation and related catastrophic weather in China, and it is of great significance to study the effects of 10-30-day low frequency oscillations on weather and climate. In this paper, the effects and mechanisms of the 10-30-day oscillations at mid-high latitudes and low latitudes on the average

收稿日期 2024-04-01; 网络预出版日期

资助项目 国家自然科学基金重点项目: 41930969, 12241102, 42030612, 41775096

Funded by the National Natural Science Foundation of China (41930969, 12241102, 42030612, 41775096)

作者简介 郭子羿, 男, 1999 年 4 月出生, 硕士研究生, 主要从事大气季节内振荡研究, 邮箱: [18295132560@163.com](mailto:18295132560@163.com)

通讯作者 黄乾 [huangq@nuist.edu.cn](mailto:huangq@nuist.edu.cn)

summer precipitation in China during the period 1991-2020 are investigated by using station observations data and ERA5 reanalysis data, etc. According to the singular value decomposition(SVD) analysis, the 10-30-day oscillations at mid-high latitude are closely related to the spatial distribution of inverse-phase precipitation over Yangtze River and South China, When the 10-30-day oscillations in north of Lake Baikal are weak and the oscillations in south of Lake Baikal are strong, the precipitation exhibits a significant decrease in the Yangtze River basin while showing a notable increase from the South China Sea to South China; The key region of the low latitudes 10-30-day oscillations is located in the northwestern Pacific, where precipitation in southern China exhibits a significant positive anomaly during periods of strong oscillation within this region. The 10-30-day oscillations at mid-high latitudes mainly affect the mean position of the summer subtropical westerly jet stream through wave-current interactions, which makes the position of the secondary circulation near the jet stream to be anomalous, thus indirectly affecting the precipitation in the Yangtze River Basin and the South China Sea to South China, and making it show anomalous inverse-phase distributions; Distinguishing it from the mid-high latitudes, the 10-30-day oscillations at low latitudes over northwest Pacific propagate northwestward to southern China, directly inducing precipitation anomalies.

**Keywords** 10-30-day atmospheric low frequency oscillations, Mean summer precipitation, Subtropical westerly jet stream, Wave-current interaction

## 1 引言

大气低频振荡通常指时间尺度在 10 天以上、100 天以内的大气运动变化(Keshavamurty, 1972; Madden and Julian, 1971, 1972; 李崇银, 1993)。低纬度地区, 北半球夏季季节内振荡包括向东、东北传播的 30-90 天振荡以及向北、西北传播的 10-30 天振荡(Lee et al., 2013); 而对于中高纬度地区, 最新研究表明, 欧亚大陆夏季呈现东向和西向传播的 30-50 天振荡(Zhu and Yang, 2021) 以及东南向传播的 10-30 天振荡(Liu and Yang, 2023)。

大气低频振荡与大气环流持续性异常的形成和演变有着密切的联系(Fujinami and Yasunari, 2009; Yang et al., 2010; 李进等, 2016; 袁媛等, 2023), 并极易引发降水异常(庞玥等, 2013; 陈丹萍等, 2016; 魏蕾等, 2017; 董雪晗等, 2020; Du and Lu, 2022; Xia et al., 2023)。低纬度大气季节内低频振荡一般通过以下两种方式影响我国降水。首先是对流活动直接北传至副热带地区(杨辉和李崇银, 2005; 田佳等, 2023)。据建华等(2008)研究了东亚季风区大气季节内振荡的传播特征, 发现热带地区东传和西传的振荡信号于 120°E 处汇合加强后向副热带地区北传, 从而影响我国长江中下游地区大尺度降水。苏同华等(2017)指出, 在年循环背景下, 东亚-热带西北太平洋低频振荡的北传是造成夏季西北太平洋副热带高压(以下简称副高)两次北跳的重要原因之一, 副高的北跳又与我国不同地区汛期的开始与结束密切相关。第二种影响方式是赤道 MJO(Madden Julian Oscillation)不同位相通过对流加热激发 Rossby 波, 使得大气对其产生响应(Ding et al., 2023)。李文铠等(2014)围绕 MJO 影

响华南前汛期降水展开研究, 指出 MJO 活跃对流中心位于赤道印度洋时, 通过非绝热加热作用激发 Rossby 波并传至华南地区, 增强该地水汽供应, 对汛期降水起到促进作用。类似的, MJO 的湿位相(对流活跃位相)处于西太平洋位相时, 对流加热热源西北侧的南海-西北太平洋地区对流层低层由于 Rossby 响应产生异常气旋性环流, 促进南海夏季风的爆发(林爱兰等, 2016)。

中高纬度大气低频振荡水平结构更多地表现为 Rossby 低频波列, 有研究指出中高纬地区的低频振荡可借由 Rossby 波能量沿低频遥相关波列的频散, 引起我国降水地区的低频环流异常(Bueh, 2008; 苗芮等, 2017, 2019)。这种低频波列在亚欧大陆以东传和南传为主, 输送了稳定的冷空气。梁萍和丁一汇(2012)分析了东亚梅雨季节内振荡的气候特征, 认为中高纬度里海和鄂霍茨克海地区冷空气的东传及西南向输送共同作用于东亚梅雨区降水。同时, 中高纬 10-30 天低频波列的东南向传播使得冷空气频繁接触来自低纬的暖湿空气, 使得降水区域出现低层辐合高层辐散的环流配置, 促进上升运动的发展(孔晓宇, 2017; Ding et al., 2021)。

此外, 中纬度地区还可通过波流相互作用使得振荡对基本气流产生影响。杨宁等(2020)采用 Eliassen-Palm 通量(E-P 通量), 通过波流相互作用的角度, 研究了夏季沿亚洲副热带西风急流 Rossby 波与我国降水异常的关系, 发现在异常丰梅年梅雨季, 波流相互作用偏强, E-P 通量辐散增强, 瞬变扰动反馈加强了急流强度, 对应江淮地区降水异常偏多。另外, 瞬变扰动动能与大气平均环流动能的转换中心位置发生移动时, 副高北侧纬向西风急流和我国夏季降水中心的位置以及雨带的演变均会相应改变(王晨宇等, 2021; Wang and Yao, 2021)。

在不同纬度低频振荡的共同作用下, 东亚夏季降水也表现为显著的 10-30 天和 30-60 天低频振荡特征, 暴雨和持续性暴雨常出现于振荡的波峰时刻(李崇银和周亚萍, 1995; 曹鑫, 2012; 周宁芳等, 2014; Sun et al., 2016; Li et al., 2015, 2019; 李靖怡等, 2020)。在典型的洪涝年份, 如 1991、1998、2016 以及 2020 年等, 往往存在高强度、多频次的低频振荡过程, 导致多次暴雨, 从而增强夏季平均降水(陆尔和丁一汇, 1996; 周兵和文继芬, 2007; 占瑞芬等, 2008; 黄桢等, 2020; 刘芸芸等, 2020; 陈蔚等, 2023)。在持续性暴雨频发的长江中下游和华南地区, 有研究进一步指出, 10-30 天低频振荡对于持续性暴雨以及总降水的贡献明显强于其他尺度(Qiu et al., 2022; Xia et al., 2023)。

综合以上现状, 中国夏季降水异常与不同纬度的大气低频振荡现象存在着密切联系, 尤其是 10-30 天低频振荡。然而目前相关的研究更加集中于特定地区及特定系统与低频振荡的关联, 或者是针对典型天气气候过程个例分析振荡的影响作用, 而有关中高纬和低纬地区的

10-30 天低频振荡对于中国夏季平均降水的不同影响还有待深入研究。由此本研究利用观测资料及再分析资料，通过统计诊断的方法，探究不同纬度 10-30 天大气低频振荡对中国夏季平均降水的影响过程和物理机制。

## 2 资料和方法

### 2.1 资料

本文采用的资料包括：欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的 ERA5 逐小时再分析资料处理成的日平均数据，水平分辨率为  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ （Hersbach et al., 2023），选取其中的经向风、纬向风、垂直速度等资料；美国国家海洋和大气管理局（NOAA）系列卫星观测的日平均向外长波辐射（Outgoing Longwave Radiation, OLR）资料，水平分辨率为  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ （Liebmann et al., 1996）；中国 2479 个气象观测站点的逐日降水数据（<http://data.cma.cn/data/> [2023-12-17]）；研究采用的数据时段为 1991-2020 年每年的夏季（6-8 月）。

### 2.2 统计诊断方法

本文利用奇异值分解（Singular Value Decomposition, SVD）方法分析了不同纬度的 10-30 天低频振荡与中国夏季降水的相关关系。利用 Lanczos 带通滤波（Duchon, 1979）提取 10-30 天尺度信号。参考 Hoskins and Hodges（2002）、李华凝等（2018）和王晨宇等（2021）的研究，以经过 10-30 天滤波的经向风的均方差来表征 10-30 天振荡强度。

E 矢量是可描述瞬变波动对平均流强迫作用的 E-P 通量的水平分量（Trenberth, 1986），可以作为描述瞬变扰动对平均环流动力强迫作用的指标量，其辐散对西风气流有加速作用，其辐合对西风气流有减速作用，其中 E 矢量的纬向分量公式如下：

$$E = \left( \frac{1}{2} (v'^2 - u'^2), -u'v' \right)$$

其中的  $u$ 、 $v$  表示水平风速的纬向分量与经向分量，撇号表示经过 10-30 天的滤波。

## 3 中高纬和低纬 10-30 天大气低频振荡与中国夏季平均降水的联系

中国地处东亚季风区，夏季降水与西太平洋副热带高压、南亚高压、副热带西风急流以及中高纬度西风带等系统密切相关，为揭示 10-30 天低频振荡与中国夏季降水的时空关系，参考 Wang and Yao（2021）的做法，选取中国夏季降水作为左气象场，考虑包含上述天气系统的东亚季风区（ $5^{\circ}\text{N} \sim 70^{\circ}\text{N}$ ,  $70^{\circ}\text{E} \sim 140^{\circ}\text{E}$ ），以 10-30 天滤波的经向风均方差表征其振荡的强度，并以此作为右气象场进行 SVD 分析。图 1 分别给出了降水与对流层高层（300hPa, 图 1a, b, c）、中层（500hPa, 图 1d, e, f）以及低层（850hPa, 图 1g, h, i）10-30 天振荡强度的 SVD 第一模态，其解释协方差分别为 27.94%、24.50%、23.94%，各层的时间系数序列表现



出振荡强度与降水的显著相关性，相关系数分别为 0.81、0.85 及 0.86，并且反映出时间系数存在明显的年际差异。同时，对流层高低层振荡与降水相关关系的形态分布较为一致，又以中高层较为稳定。其中，中高纬地区存在两个明显的振荡显著区域，而低纬南海及菲律宾地区虽然存在正（负）相关区域，但在对流层中低层并没有通过显著性检验。因此在第一模态中，重点考虑中高纬度地区 10-30 天低频振荡与中国夏季降水的联系。根据 300hPa 振荡强度显著区域划分了两个振荡关键区，分别为：区域 I: 53°N~66°N, 77°E~113°E; 区域 II: 32°N~48°N, 72°E~119°E。结果表明，长江流域和华南区域降水呈现异常的反相分布，区域 I 的 10-30 天低频振荡偏弱（区域 II 振荡偏强）时，华南降水呈增多型，长江流域降水呈减少型。

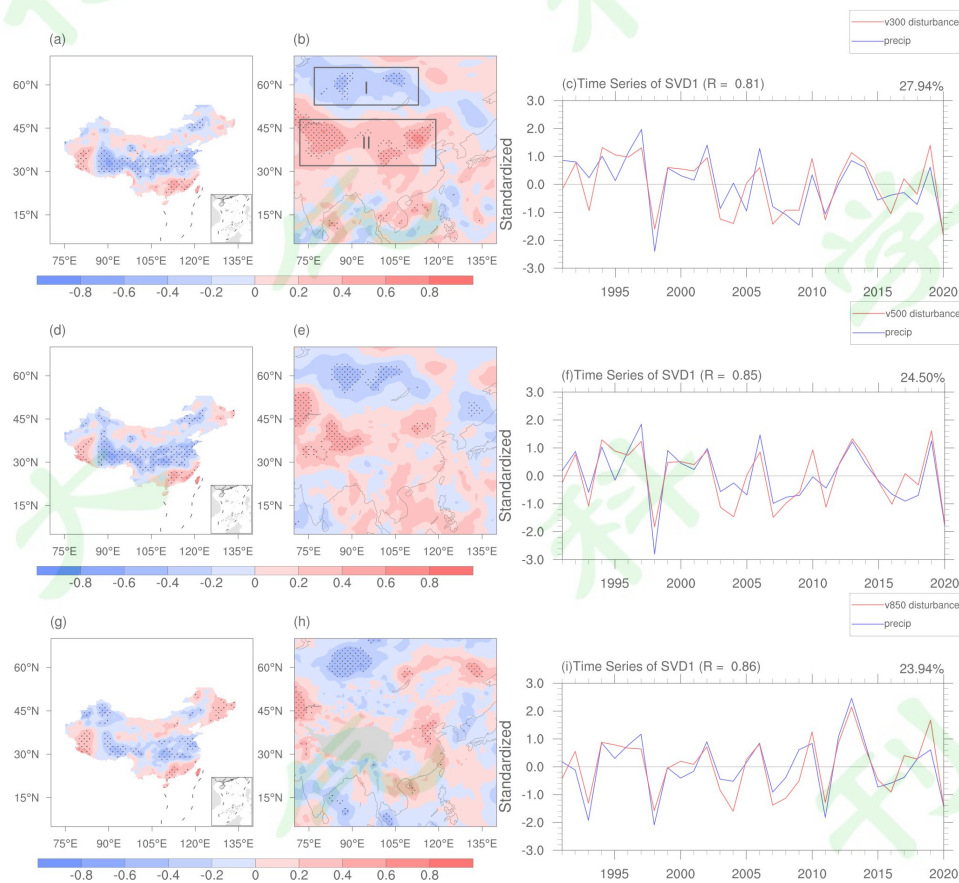
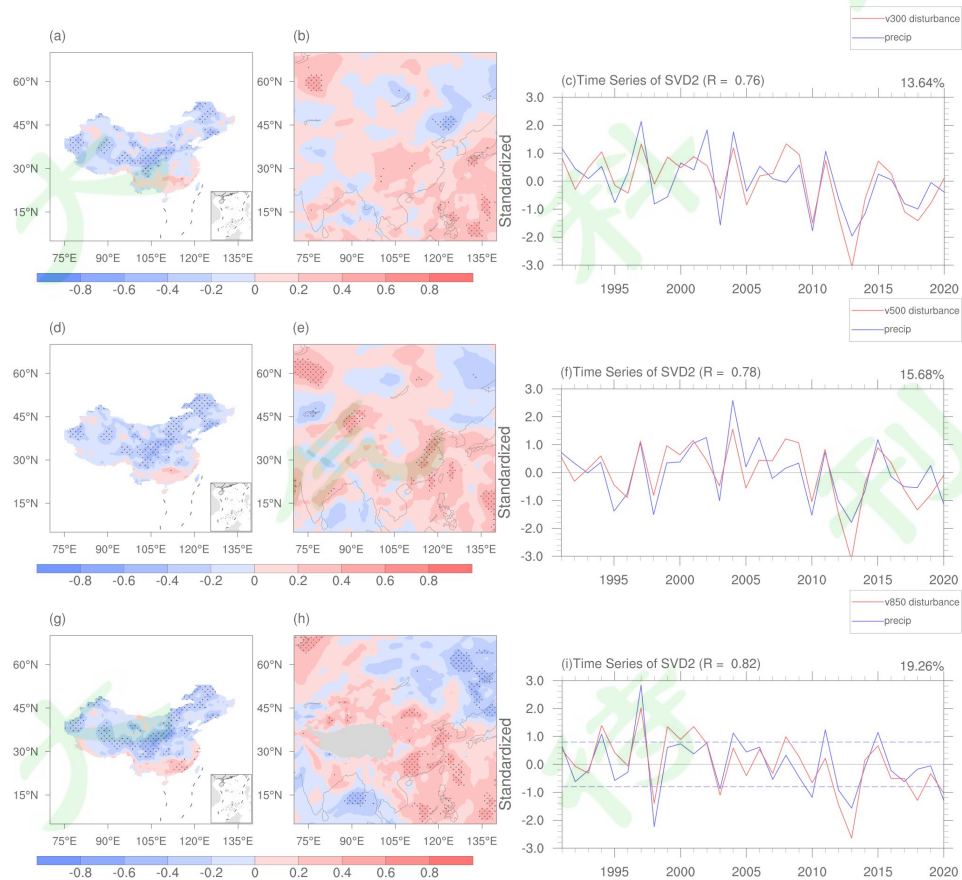


图 1 中国夏季降水与 10-30 天尺度经向风均方差的 SVD 分析第一模态 (a, b, c 表示中国降水与 300hPa 经向风均方差的结果，其中 a 为降水，b 为经向风均方差，c 为时间系数；d, e, f 以及 g, h, i 同 a, b, c, 但分别表示中国降水与 500hPa 经向风均方差以及中国降水与 850hPa 经向风均方差的结果。图中 R 为相关系数，百分数为解释协方差。打点区域表示通过 95% 的显著性检验)

Fig. 1 First mode of SVD analysis of summer precipitation in China and 10-30-day scale meridional wind mean variance (a, b, c denote the results of precipitation in China and 300hPa meridional wind mean variance, where a is precipitation, b is meridional wind mean variance, and c is the time coefficient; d, e, f, and g, h, i are the same as a, b, c, but for the results of precipitation in China and 500hPa meridional wind mean variance, and precipitation in China and 850hPa meridional wind mean variance. R is the correlation coefficient, the percentage is the explained covariance. Dotted area indicates passing the 95% significance test)

SVD 分析第二模态结果如图 2 所示，其解释协方差分别为 850hPa（图 2g, h, i）19.26%、500hPa（图 2d, e, f）15.68%、300hPa（图 2a, b, c）13.64%，各层的时间系数序列同样表现出振荡强度与降水的显著相关性，相关系数分别为 0.82、0.78 及 0.76，并且也存在明显的年际差异。同样的，第二模态对流层高低层振荡与降水相关关系的形态分布较为一致，但以对流层低层更为显著。其中，低纬度地区存在明显的振荡显著区域，而中高纬地区虽然存在正（负）相关区域，但在对流层中高层并未全部通过显著性检验且相关区域较为局地。因此在第二模态中，重点考虑低纬度地区 10-30 天低频振荡与中国夏季降水的联系。由 10-30 天尺度 OLR 的均方差（图 2j 填色）与 SVD850hPa 第二模态降水序列和 850hPa 振荡强度的一元线性回归系数分布（图 2j 等值线）进一步明确低纬振荡关键区的位置。其中回归系数的大值中心位于低纬西北太平洋处，范围较大，但 10-30 天 OLR 均方差的强中心则位于 140°E 以内，即振荡在此范围内较为活跃。结合对流活动中心进行考虑，低纬振荡显著区域位于西北太平洋 140°E 附近，尤其是其以西区域。该地区 10-30 天振荡与夏季降水的联系表现为关键区内振荡增强时，华南降水呈正异常，即振荡与华南降水呈正相关，而华南降水与其以北地区降水呈现反相分布。



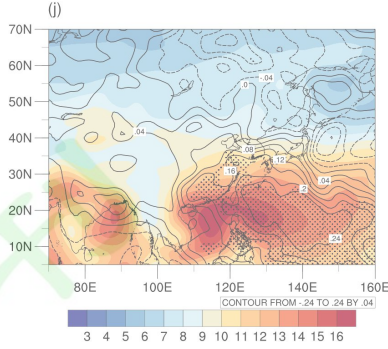


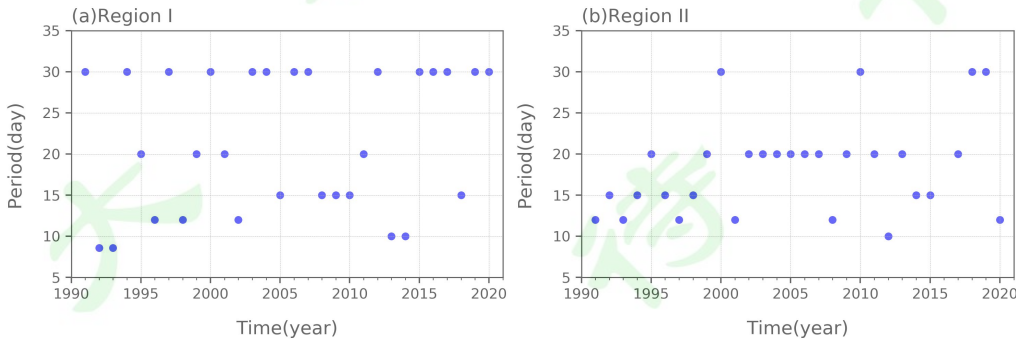
图 2 a~i 同图 1，但为 SVD 第二模态结果；j. 10-30 天尺度 OLR 的均方差（填色，单位  $\text{W/m}^2$ ）和 SVD 第二模态降水序列（图 i 中蓝色序列）与 10-30 天尺度 850hPa 经向风均方差的一元线性回归系数分布（等值线，单位  $\text{m/s}$ ），打点区域表示回归系数通过 95% 的显著性检验

Fig. 2 a~i Same as Fig. 1, but for SVD second mode results; j. Mean variance of 10-30-day scale OLR(shadings, units  $\text{W/m}^2$ ) and distribution of single variable linear regression coefficients of the SVD 850hPa second mode precipitation series(the blue series in fig. i) on the mean variance of 850hPa 10-30-day scale meridional wind(contours, units  $\text{m/s}$ ), dotted area indicates passing the 95% significance test

## 4 中高纬和低纬 10-30 天振荡影响中国夏季平均降水的物理过程

### 4.1 中高纬 10-30 天振荡的影响

根据 SVD 第一模态结果，分别对区域 I（图 3a）和区域 II（图 3b）的 300hPa 经向风场（未滤波）进行功率谱分析，并挑选出每一年的显著周期，结果显示两个区域通过置信度为 90% 红噪音检验的功率谱最大值对应的周期多集中于 10-30 天范围内，表明二者均具有明显的 10-30 天低频振荡周期。由此进一步分析振荡关键区域 I 和 II 的 300hPa 10-30 天尺度经向风均方差标准化距平的逐年演变特征（图 3c、d），发现两个关键区域振荡强度均具有明显的年际差异，且两者显示出一定的负相关性，但并未通过显著性检验，相关系数仅为 -0.26。选取标准化距平大于 0.8 的年份为振荡强年，小于 -0.8 的年份为振荡弱年，强年与弱年各选取 5 年，年份如表 1 和表 2 所示。从选取的强弱年份可以看到，20 个特征年中，仅有 5 个年份重合。因此需要进一步明确这两个区域振荡异常与我国夏季降水的关联程度。



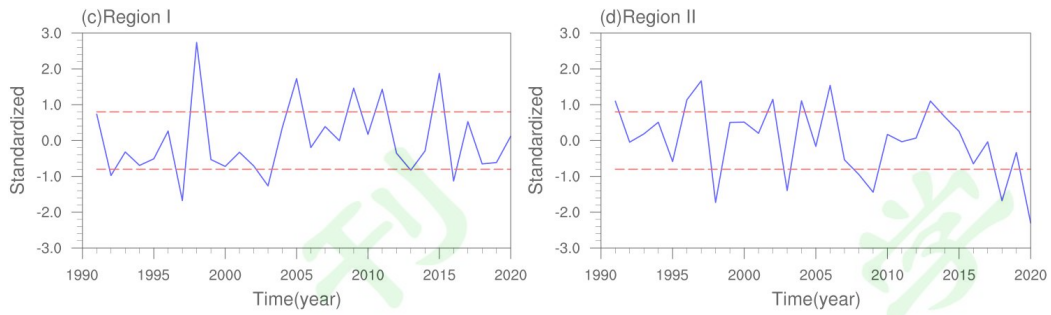


图 3 a. 区域 I 300hPa 经向风显著周期分布（散点为每年通过 90%置信水平红噪音检验的功率谱最大值对应的周期）；b 同 a，但为区域 II；c. 区域 I 经 10-30 天滤波的 300hPa 经向风均方差标准化时间序列；d 同 c，但为区域 II

Fig. 3 a. Significant periodic distribution of 300hPa meridional wind in region I (scatter represents the period corresponding to the maximum power spectrum value exceeding the red noise test at a 90% confidence level in each year); b is the same as a, but for region II; c. Standardized time series of 300hPa meridional wind mean variance filtered for 10-30-day in region I; d is the same as c, but for region II

表 1 区域 I 振荡强弱年选取

Table 1 The strong/weak year selection of oscillations in region I

|      |      | 年份   |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|
| 振荡强年 | 1998 | 2005 | 2009 | 2011 | 2015 |
| 振荡弱年 | 1992 | 1997 | 2003 | 2013 | 2016 |

表 2 区域 II 振荡强弱年选取

Table 2 The strong/weak year selection of oscillations in region II

|      |      | 年份   |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|
| 振荡强年 | 1991 | 1997 | 2002 | 2006 | 2013 |
| 振荡弱年 | 1998 | 2003 | 2009 | 2018 | 2020 |

进一步对两个区域振荡强年与弱年的向外长波辐射（OLR）异常与中国夏季平均降水异常进行合成分析。如图 4 所示，区域 I 和区域 II 的结果均表明：长江流域和华南至南海的 OLR 异常呈反位相分布。区域 I 振荡偏强时（图 4a, c），长江流域 OLR 为负异常，对流活跃，降水偏多，华南地区 OLR 为正异常，降水偏少，并且在更大范围可以看到，最大的对流抑制中心位于南海到菲律宾附近，振荡偏弱的结果基本相反（图 4b）。而区域 II 振荡增强时（图 4e, g），长江流域 OLR 为正异常，对流抑制，降水偏少，华南地区 OLR 为负异常，降水偏多，对流活跃中心位于南海到菲律宾附近，同样的，振荡减弱时结果基本相反（图 4f）。对比两个区域的结果，区域 II 的长江-南海 OLR 及降水反位相空间分布特征明显更为显著与清晰。同时，区域 II 振荡强度与长江流域和华南地区夏季降水呈现相反的相关关系（图 4h），与上述结果相对应，同样相较于区域 I（图 4d）更为显著。



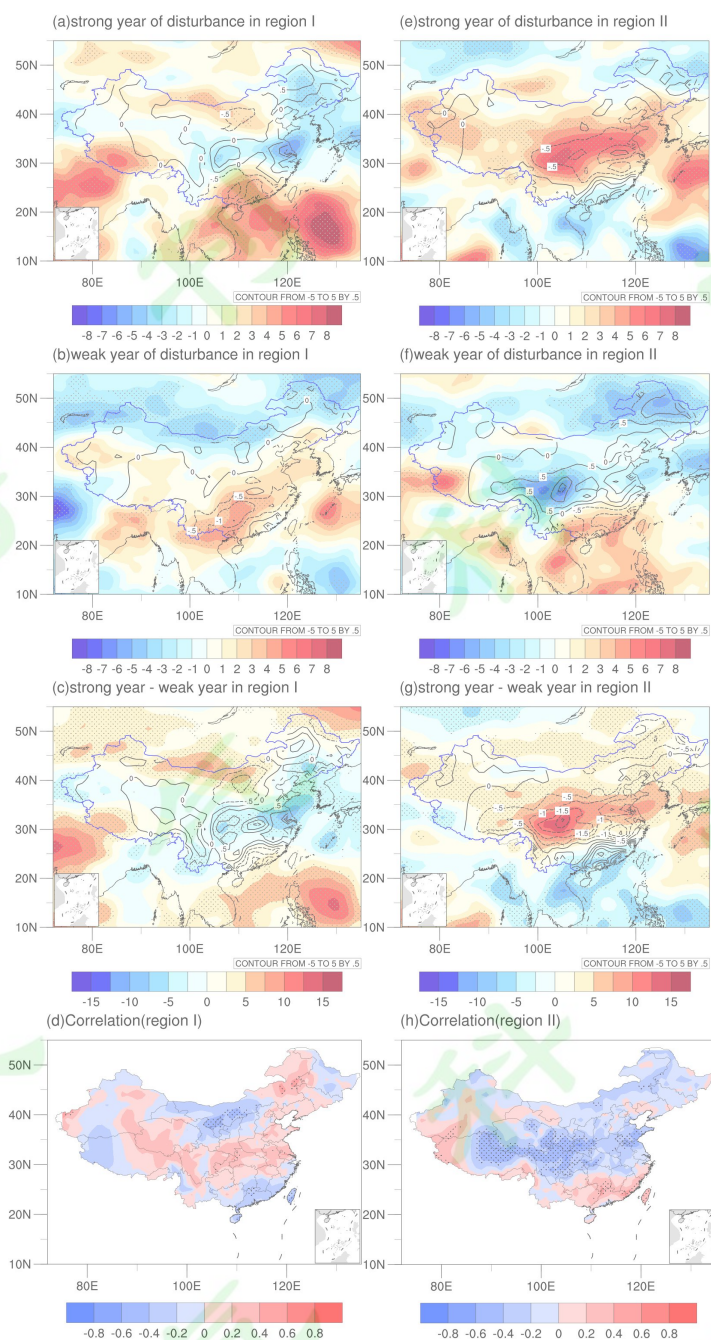


图 4 a. 区域 I 振荡强年 OLR 异常（填色，单位  $W/m^2$ ）和中国夏季平均降水异常（等值线，单位  $mm$ ）；b 同 a，但为振荡弱年；c 同 a，但为振荡强弱年之差；e, f, g 同 a, b, c，但为区域 II；d. 区域 I 300hPa 经向风均方差与中国夏季降水的相关关系；h 同 d，但为区域 II，打点区域表示通过 95% 的显著性检验

Fig. 4 a. OLR anomaly of the strong year of disturbance (shadings, units  $W/m^2$ ) and summer average precipitation anomaly in China (contours, units  $mm$ ) in region I; b is the same as a, but for the weak year of disturbance; c is the same as a, but for the difference between the strong year and weak year; e, f, g are the same as a, b, c, but for region II; d. The correlation between mean variance of 300hPa meridional wind in region I and summer precipitation in China; h is the same as d, but for region II, dotted areas indicate passing 95% significance test

进一步分析中高纬 10-30 天低频振荡对于降水随时间演变的影响，图 5a、b 所示为沿中国东部  $105^{\circ}E \sim 120^{\circ}E$  平均的降水异常时间-纬度剖面图，区域 I 振荡偏强与偏弱年相比（图

5a)，雨带更集中于长江流域，其主要异常表现为7月中旬以后的持续性正异常。区域II振荡偏强年和偏弱年相比（图5b），雨带则聚集于华南区域，主要表现为7-8月的正异常，长江流域则表现为明显的负异常。与降水相对应，7月中旬之后区域I振荡强弱年垂直速度的异常（图5c）在长江流域以上升运动为主，而区域II振荡强弱年垂直速度的异常（图5d）7-8月间在长江流域则以下沉运动为主，华南地区以上升运动为主，并且区域II垂直速度异常和降水异常之间的对应关系表现较区域I更为清晰。

值得注意的是，无论是区域I振荡异常年，还是区域II振荡异常年，中高纬10-30天振荡均具有自北向南传播的信号，但是并未通过直接传播到华南及其以南地区进而影响降水的异常，那么是否存在其他间接过程影响降水的分布呢？

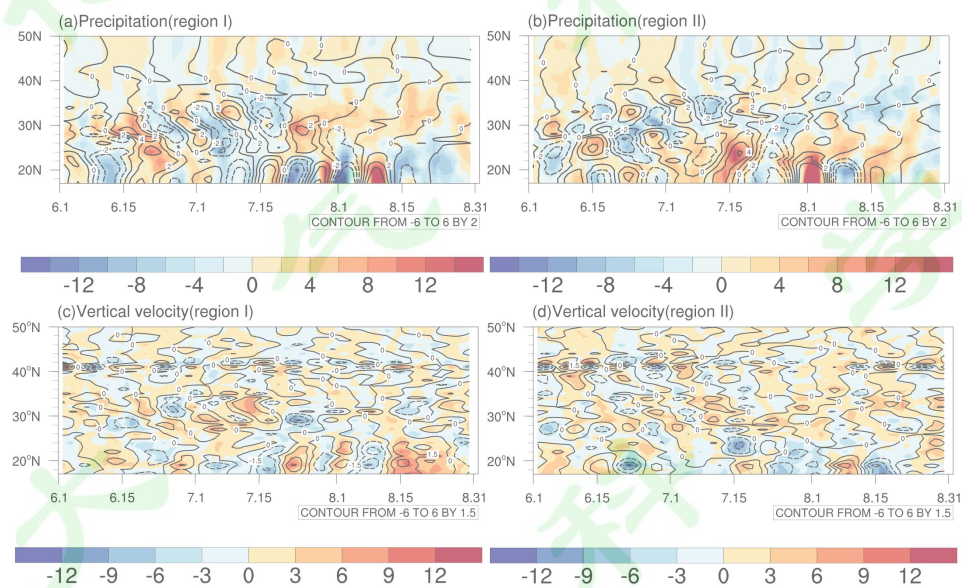


图5 a. 区域I振荡强弱年沿105°E~120°E平均的降水（填色，单位mm）及10-30天低频降水（等值线，单位mm）差值的时间-纬度剖面图；b同a，但为区域II；c. 区域I振荡强弱年沿105°E~120°E平均的垂直速度（填色，单位0.01Pa/s）及10-30天低频垂直速度（等值线，单位0.01Pa/s）差值的时间-纬度剖面图；d同c，但为区域II

Fig. 5 a. Time-latitude profile of the difference between the average precipitation(shadings, units mm) and 10-30-day precipitation(contours, units mm) along 105°E~120°E in the strong and weak year of oscillations in region I; b is the same as a, but for region II; c. Time-latitude profile of the difference between the average vertical velocity(shadings, units 0.01Pa/s) and 10-30-day vertical velocity(contours, units 0.01Pa/s) along 105°E~120°E in the strong and weak year of oscillations in region I; d is the same as c, but for region II

结合前文分析，区域II相较于区域I，其振荡强弱年OLR及对应夏季降水的空间分布特征更加清晰，同时，区域II振荡强度与夏季降水的相关关系相较于区域I更加显著，其垂直速度异常与降水异常的对应关系也更加清晰，因此以下研究选取区域II作为主要研究对象。此外，中高纬度地区10-30天振荡强度与降水异常的相关关系在对流层中高层较为稳定，而中高层的振荡异常往往通过波流相互作用与纬向平均气流的异常紧密联系，因此分别对区

域 II 振荡强弱年的 300hPa 纬向风异常分布进行了合成分析。结果显示,在振荡强年(图 6a),夏季副热带西风急流存在位置的异常偏北,而在振荡弱年(图 6b),夏季副热带西风急流的位置则相对强年异常偏强与偏南,这说明中高纬 10-30 天低频振荡可能与急流的强度与位置存在着密切联系。

为了分析振荡与急流的关系,计算了沿 72°E~119°E (区域 II 经度范围) 平均的振荡强弱年的 E 矢量散度差异(图 6c),结果表明,振荡增强时,中纬度地区存在 E 矢量的辐合,抑制了西风强度,而高纬度地区存在 E 矢量的辐散,对西风具有加速作用。一般情况下,在经向振荡较强时,纬向基本气流较弱,这是因为较大的经向热量输送,导致南北热力差异减小,从而导致西风偏弱。由此进一步对比振荡强弱年的 10-30 天振荡强度(10-30 天尺度经向风的均方差)以及纬向风的差异,如图 6d 所示,当中纬度地区振荡偏强(基本对应区域 II 位置,45°N 以南),而高纬振荡较弱时,高纬地区由异常西风控制,中纬度地区则为东风异常,在该环流背景下,中高纬 10-30 天振荡容易通过上述波流间的相互作用,造成东亚西风急流位置的异常偏北。

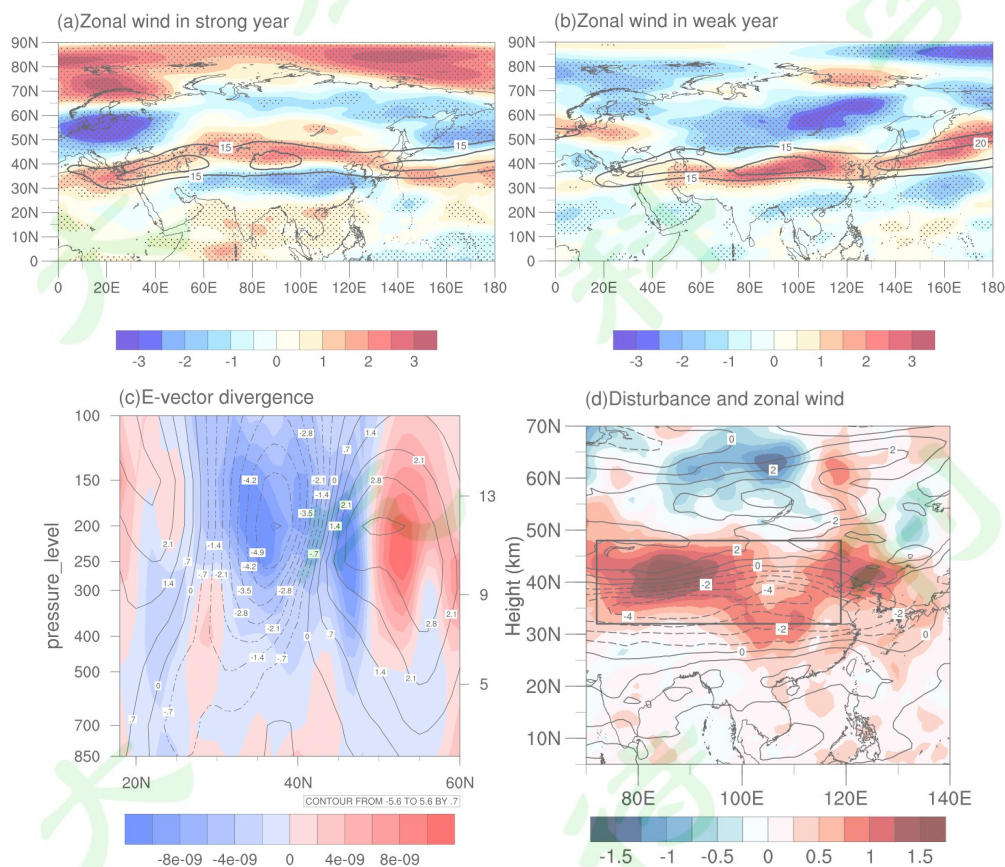


图 6 a, b. 区域 II 振荡强 (a)、弱 (b) 年 300hPa 纬向风与气候态的差值 (填色, 单位 m/s, 等值线为纬向风, 仅绘制了大于 15m/s 的等值线; 打点区域表示通过 95% 的显著性检验); c. 沿 72°E~119°E 平均的振荡强弱年 E 矢量散度 (填色, 单位  $\text{m/s}^2$ ) 与纬向风 (等值线, 单位 m/s) 差值的纬度-高度剖面图; d. 10-30 天尺度经向风均方差 (填色, 单位  $\text{m/s}$ ) 与纬向风 (等值线, 单位 m/s) 在振荡强弱年的差值



Fig. 6 a, b. Difference between 300hPa zonal wind and climate state in the strong year(a) and weak year(b) of oscillations in Region II(shadings, units m/s, contour lines are zonal wind, only contour lines greater than 15m/s are drawn; dotted areas indicate passing 95% significance test); c. Latitude-altitude profile of the difference between the average E-vector divergence(shadings, units  $\text{m/s}^2$ ) and the zonal wind(contours, units m/s) along  $72^\circ\text{E}\sim 119^\circ\text{E}$  in strong and weak year of oscillations; d. The difference between the mean variance of 10-30-day scale meridional wind(shadings, units m/s) and zonal wind(contours, units m/s) in the strong and weak year of oscillations

急流作为季风降水的关键系统，其位置、强度的差异均可通过急流轴南北两侧的次级环流影响大范围雨带的位置和强度，因此进一步分析了急流位置变化后其垂直环流的响应。在区域 II 振荡强年（图 7a），由于西风急流位置异常偏北，长江流域及北部对流层上层为异常东风控制，使得长江流域呈异常下沉气流，降水偏少；下沉气流在地面，一支向南输送，与暖湿的西南季风相遇，从而使得南海北部及华南地区降水异常增多。而在振荡弱年（图 7b），急流位置相比于气候态没有明显移动，但强度偏强，长江流域位于急流南侧，受异常上升气流控制，降水偏多。于此同时，来自南海、途经华南的水汽在低层主要以向北输送为主，南海北部及华南地区受异常下沉气流控制，降水偏少。

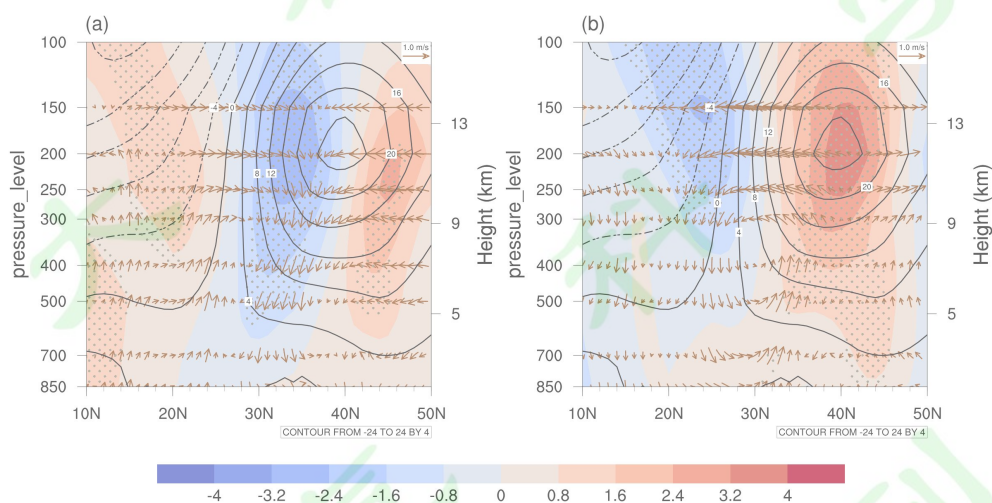


图 7 a. 振荡强年沿  $105^\circ\text{E}\sim 120^\circ\text{E}$  平均的垂直经向环流异常（矢量，垂直速度异常（单位  $-0.02\text{Pa/s}$ ）和经向风（单位  $\text{m/s}$ ）的合成）和纬向风异常（填色，单位  $\text{m/s}$ ）；b 同 a，但为振荡弱年，等值线为气候态纬向风场（单位  $\text{m/s}$ ），打点区域表示通过 95% 的显著性检验

Fig. 7 a. The average vertical meridional circulation anomaly (vectors, the combination of vertical velocity anomaly (unit  $-0.02\text{Pa/s}$ ) and meridional wind (unit  $\text{m/s}$ )) and zonal wind anomaly (shadings, units  $\text{m/s}$ ) along  $105^\circ\text{E}\sim 120^\circ\text{E}$  in the strong year of oscillations, b is the same as a, but for the weak year of oscillations, the contour line represents the zonal wind of the climate state (units  $\text{m/s}$ ), the dotted area indicates passing the 95% significance test

## 4.2 低纬度 10-30 天低频振荡的影响

区别于中高纬度，低纬度振荡关键区较为单一，因此直接以降水和 850hPa 振荡强度的 SVD 第二模态 10-30 天振荡强度的标准化时间序列为基准（图 2i），同样选取标准化距平



大于 0.8 的年份为振荡强年，小于-0.8 的年份为振荡弱年，其中强年弱年各选取 5 年，年份如表 3 所示。

表 3 低纬振荡强弱年选取

Table 3 The strong/weak year selection of oscillations in low latitude region

|      | 年份   |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|
| 振荡强年 | 1994 | 1997 | 1999 | 2001 | 2008 |
| 振荡弱年 | 1998 | 2003 | 2013 | 2018 | 2020 |

根据挑选得到的低纬地区 10-30 天振荡异常年份，对 OLR 与中国夏季平均降水进行合成分析，当低纬振荡偏强时（图 8a,c），华南地区 OLR 为负异常，对流活动偏强，对应降水异常增多，而振荡偏弱时（图 8b），华南地区 OLR 为正异常，对流活动偏弱，对应降水异常减少，同时，华南地区的 OLR 以及降水均与华南以北地区呈反位相分布。

进一步对比振荡强弱年 OLR 及 10-30 天 OLR 随时间的演变（图 8d），振荡偏强年份，华南地区 OLR 整体呈负异常，即对流活动较强，并且振荡存在自南海地区向北传播的信号，可以传播至华南地区，这表明低纬 10-30 天低频振荡可能是通过向北传播至华南地区，引发多次低频降水过程，进而直接影响华南地区的降水异常。

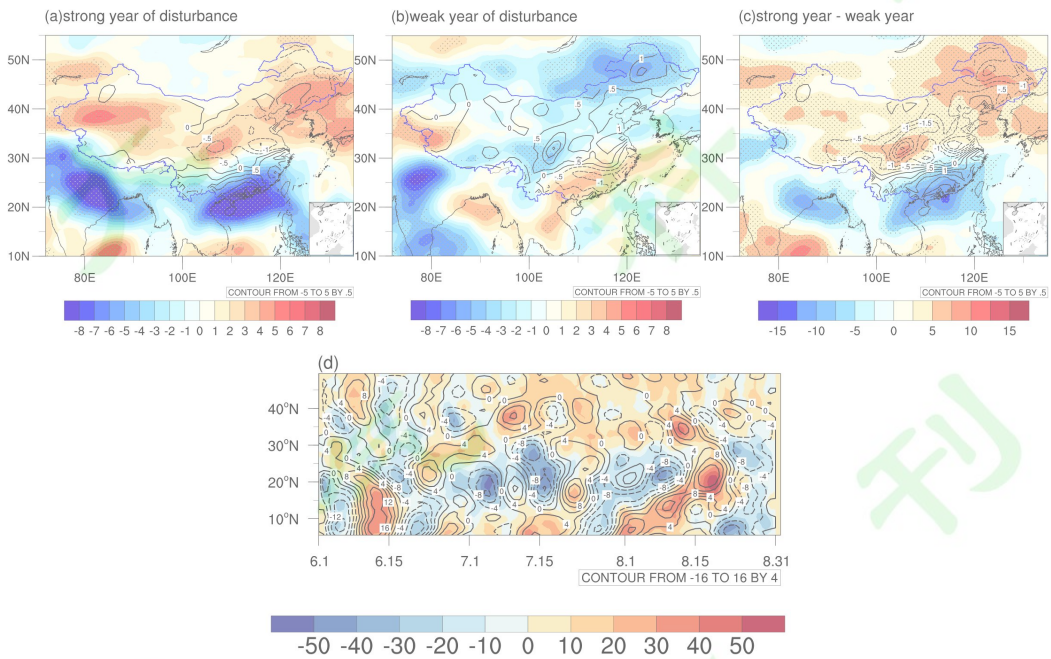


图 8 a. 低纬振荡强年 OLR（填色，单位  $\text{W/m}^2$ ）和中国夏季平均降水（等值线，单位  $\text{mm}$ ）与气候态的差值，打点区域表示通过 95% 的显著性检验；b 同 a，但为振荡弱年；c 同 a，但为振荡强弱年之差；d. 沿  $105^\circ\text{E}\sim 120^\circ\text{E}$  平均的 OLR（填色，单位  $\text{W/m}^2$ ）及 10-30 天尺度 OLR（等值线，单位  $\text{W/m}^2$ ）的振荡强弱年差异

Fig. 8 Difference between OLR anomaly in the strong year of disturbance at low latitude(shadings, units  $\text{W/m}^2$ ) and summer average precipitation anomaly in China(contours, units  $\text{mm}$ ), dotted areas indicate passing 95% significance test; b is the same as a, but for the weak year of disturbance; c is the same as a, but for the difference

between the strong year and weak year; d. the difference between OLR(shadings, units  $\text{W/m}^2$ ) and 10-30-day OLR (contours, units  $\text{W/m}^2$ ) along  $105^\circ\text{E}\sim 120^\circ\text{E}$  in the strong and weak year of disturbance

为进一步分析低纬 10-30 天振荡向华南地区的传播特征，分析了 10-30 天 OLR 的超前点面相关(图 9)，其中“点”为 10-30 天 OLR 的华南区域平均值( $18^\circ\text{N}\sim 27^\circ\text{N}$ ,  $105^\circ\text{E}\sim 120^\circ\text{E}$ )。在振荡强年(图 9a1, b1, c1, d1)，振荡自超前 6 天开始，可见一个显著的正相关区域从东南方向(低纬西北太平洋振荡关键区位置附近)向西-西北方向传播，0 天时传播至华南地区，相关性达到最强；而在振荡弱年(图 9a2, b2, c2, d2)，华南地区的显著正相关区域位置自-4 天到 0 天基本维持不动，振荡则没有明显的传播迹象。此结果进一步表明，低纬度 10-30 天大气低频振荡可通过向西北传播直接影响华南地区的降水异常，与中高纬度 10-30 天振荡影响降水的途径存在显著差异。

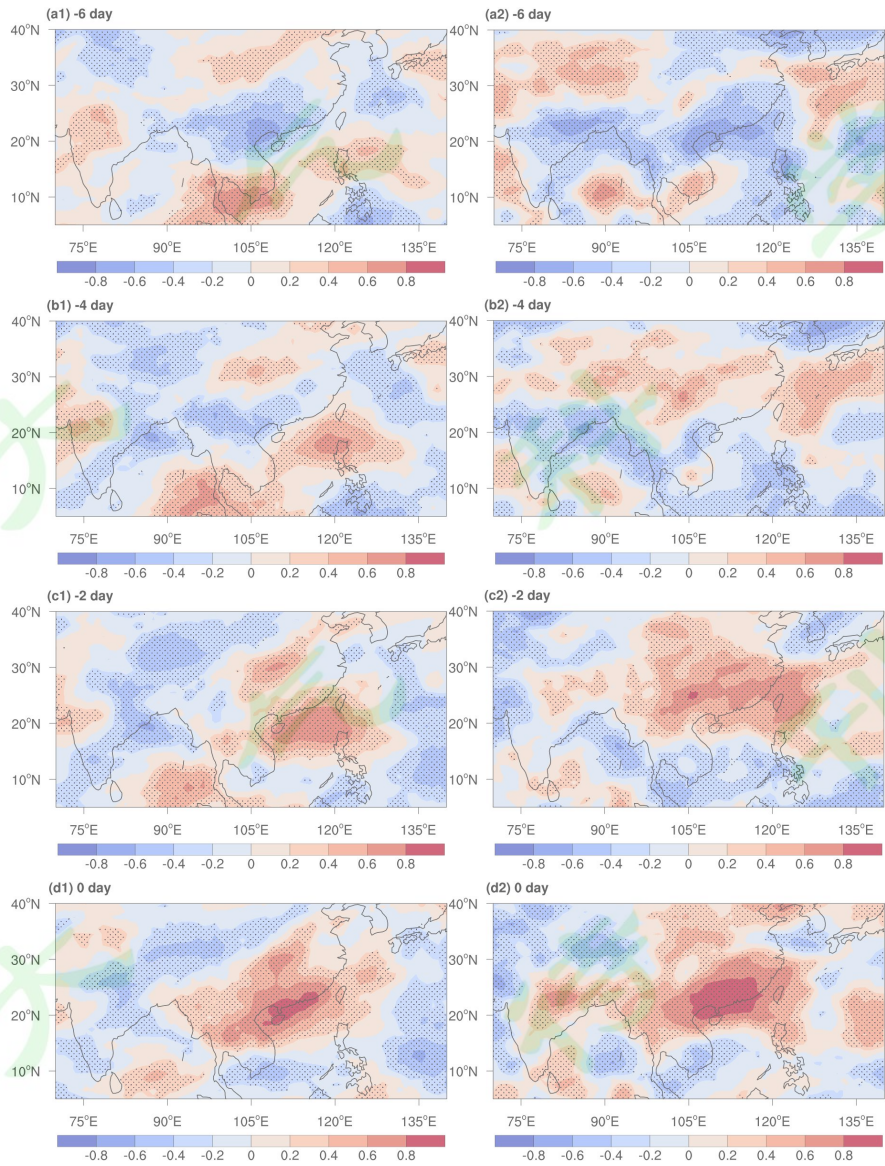


图 9 10-30 天 OLR 点(华南区域平均:  $18^\circ\text{N}\sim 27^\circ\text{N}$ ,  $105^\circ\text{E}\sim 120^\circ\text{E}$ )面相关: a1~d1 分别表示低纬关键区振

荡强年超前 6 天到同期相关，间隔 2 天；a2~d2 同 a1~d1，但为振荡弱年；打点区域表示通过 95% 的显著性检验

Fig. 9 The correlation between point(regional mean value in South China: 18~27°N, 105~120°E) and area of 10-30-day scale OLR: a1~d1 represent the correlation of the strong year of oscillations in low latitude key area from previous 6 days to 0 day, with an interval of 2 days; a2~d2 is the same as a1~d1, but for the weak year of oscillations. dotted areas indicate passing the 95% significance test

## 5 结论与讨论

本文利用再分析资料、台站观测资料等，通过统计诊断的方法，讨论了中高纬和低纬度 10-30 天大气低频振荡对中国夏季平均降水的可能影响及其物理机制（图 10），主要结论如下：

1) 通过对中国夏季降水和 10-30 天振荡强度（10-30 天尺度经向风的均方差）进行 SVD 分析发现：SVD 第一模态突出了中高纬振荡与夏季降水的联系，表现为贝加尔湖以北关键区内 10-30 天振荡偏弱，贝加尔湖以南关键区内振荡偏强时，长江流域降水异常减少，南海至华南地区降水异常增多，二者呈现异常的反位相分布；SVD 第二模态则突出了低纬振荡与降水的联系，表现为低纬西北太平洋振荡关键区内振荡增强时，华南地区夏季平均降水异常增多。

2) 诊断结果表明，中高纬 10-30 天大气低频振荡主要通过波流相互作用影响副热带西风急流的平均位置，使急流两侧的次级环流位置相应发生改变，从而间接导致长江流域降水与南海及华南地区降水的异常反位相分布；而低纬度 10-30 天大气低频振荡则向西-西北传播至华南地区，通过引起多次低频降水过程，直接影响华南地区的降水异常分布。

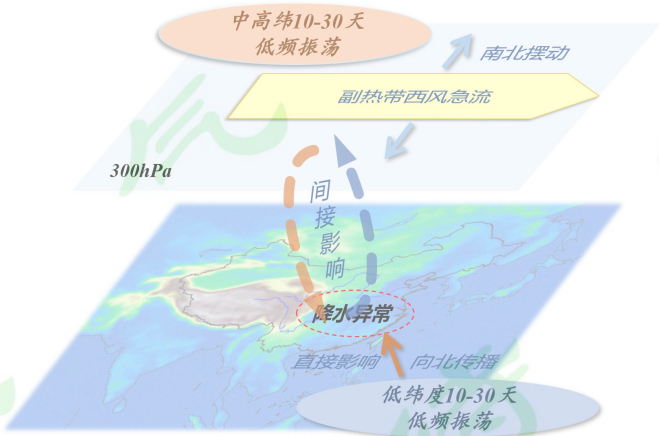


图 10 中高纬和低纬 10-30 天低频振荡影响中国夏季降水的物理机制图

Fig. 10 Physical mechanism diagram of 10-30-day low frequency oscillations at mid-high latitude and low latitude influencing summer precipitation in China



本文主要通过 SVD 分析的两个模态, 分别解释了中高纬和低纬 10-30 天低频振荡对中国夏季降水的影响, 并从急流与振荡传播的角度解释其物理机制, 对于振荡影响降水的其他途径还有待讨论。此外, 由于本文仅探讨了 10-30 天低频振荡对平均降水的影响, 对于这一物理模型在极端个例中的适用性还有待深入研究。

## 参考文献

- Bueh C L. 2008. Features of the EAP events on the medium-range evolution process and the mid-and high-latitude Rossby wave activities during the Meiyu period[J]. Chinese Science Bulletin, (04): 610–623. doi: [10.1007/s11434-008-0005-2](https://doi.org/10.1007/s11434-008-0005-2)
- 曹鑫. 2012. 中国夏季持续性强降水的准双周特征分析[D]. 南京大学硕士学位论文, 73pp. Cao Xin. 2012. Quasi-biweekly Oscillation of Persistent Heavy Rain over China in Summer[D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University, 73pp.
- 陈丹萍, 管兆勇, 侯俊, 等. 2016. 2007 年夏季江淮强降水过程中 10~30d 低频变化及其与对流层上层波包活动的联系[J]. 大气科学学报, 39(2): 177–188. Chen Danpin, Guan Zhaoyong, Hou Jun, et al. 2016. The 10~30d intraseasonal oscillations of circulations and their associations with Rossby wave packets in the upper troposphere during persistent severe rainfall in summer 2007[J]. Trans Atmos Sci(in Chinese), 39(2): 177–188. doi: [10.13878/j.cnki.dqkxb.20150427042](https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxb.20150427042)
- 陈蔚, 刘梅, 杨华栋, 等. 2023. 长江中下游典型涝年准双周振荡特征及其影响分析[J]. 气象学报, 81(3): 393–415. Chen Wei, Liu Mei, Yang Huadong, et al. 2023. Distinction and influences of the quasi-biweekly oscillation among three typical flood years in the lower reaches of the Yangtze river[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 81(3): 393–415. doi: [10.11676/qxxb2023.20220148](https://doi.org/10.11676/qxxb2023.20220148)
- 董雪晗, 李江南, 阮子夕, 等. 2020. 低纬准双周振荡对 2018 年 8 月广东持续性特大暴雨过程的影响[J]. 热带地理, 40(4): 752–764. Dong Xuehan, Li Jiangnan, Ruan Zixi, et al. 2020. Influence of Low-Latitude Quasi-Biweekly Oscillation on a Persistent Heavy Rainfall Event in August 2018 in Guangdong Province[J]. Tropical Geography (in Chinese), 40(4): 752–764. doi: [10.13284/j.cnki.rddl.003254](https://doi.org/10.13284/j.cnki.rddl.003254)
- Ding R B, Xuan J L, Zhou F, et al. 2023. Strong subsurface meridional current forced by monsoon intraseasonal oscillation in the southern Bay of Bengal during summer 2020[J]. Environmental Research Letters, 18(5). doi: [10.1088/1748-9326/ACCAFD](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ACCAFD)
- Ding Y ,Liu Y ,Hu Z. 2021. The Record-breaking Mei-yu in 2020 and Associated Atmospheric Circulation and Tropical SST Anomalies[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 38(12): 1980–1993. doi: <https://doi.org/10.1007/s00376-021-0361-2>.
- Du L, Lu R Y. 2022. Distinct intensity of 10–30-day intraseasonal waves over the North Pacific between early and late summers[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 15(04): 29–33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2022.100204>
- Duchon C E. 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions[J]. Appl Meteor Climatol, 18(8): 1016–1022. doi: [10.1175/1520-0442\(1979\)18<1016:LFIOTD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1979)18<1016:LFIOTD>2.0.CO;2)

[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018<1016:LFIOAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<1016:LFIOAT>2.0.CO;2)

Fujinami H, Yasunari T. 2009. The effects of midlatitude waves over and around the Tibetan Plateau on submonthly variability of the East Asian summer monsoon [J]. *Monthly Weather Review*, 137(7): 2286–2304.

doi: <https://doi.org/10.1175/2009MWR2826.1>

黄桢, 李双林, 张超. 2020. 1991、1998 和 2016 年三个大水年长江中下游夏季降水季节内特征的对比[J]. *热带气象学报*, 36(01): 13–24. Huang Zhen, Li Shuanglin, Zhang Chao. 2020. A comparison of intraseason rainfall features over the middle and lower reaches of Yangtze River during summers of 1991, 1998 and 2016[J]. *Journal of Tropical Meteorology(in Chinese)*, 36(01): 13–24. doi: 10.16032/j.issn.1004-4965.2020.002

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2023. ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi: 10.24381/cds.bd0915c6

Hoskins B J, Hodges K I. 2002. New Perspectives on the Northern Hemisphere Winter Storm Tracks[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59: 1041–1061. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059<1041:NPOTNH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<1041:NPOTNH>2.0.CO;2)

据建华, 孙丹, 吕俊梅. 2008. 东亚季风区大气季节内振荡经向与纬向传播特征分析[J]. *大气科学*, 2008(03): 523–529. Ju Jianhua, Sun Dan, Lv Junmei. 2008. The Relay Character Analysis of the Zonal and Longitudinal Propagations of the Atmospheric Intraseasonal Oscillation in the East Asian Monsoon Region[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2008(03): 523–529. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.09

孔晓宇, 毛江玉, 吴国雄. 2017. 2002 年夏季中高纬大气准双周振荡对华南降水的影响[J]. *大气科学*, 41(6): 1204–1220. Kong Xiaoyu, Mao Jiangyu, Wu Guoxiong. 2017. Influence on the South China rainfall anomalies of the atmospheric quasi-biweekly oscillation in mid-high latitude during the summer of 2002[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(6): 1204–1220, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16277

Keshavamurty R N. 1972. On the vertical tilt of monsoon disturbances[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 29: 993–995. doi: 10.1175/1520-0469(1972)029<0993:OTVTOM>2.0.CO;2

林爱兰, 谷德军, 李春晖, 等. 2016. 赤道 MJO 活动对南海夏季风爆发的影响[J]. *地球物理学报*, 59(01): 28–44. Lin Ailan, Gu Dejun, Li Chunhui, et al. 2016. Impact of equatorial MJO activity on summer monsoon onset in the South China Sea[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 59(01): 28–44. doi: 10.6038/cjg20160104

李崇银. 1993. 大气低频振荡[M]. 北京: 气象出版社, 201pp. Li Chongyin. 1993. Low Frequency Oscillations in the Atmosphere (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 201pp.

李崇银, 周亚萍. 1995. 热带大气中的准双周(10-20 天)振荡[J]. *大气科学*, 19(4): 435–444. Li Chongyin, Zhou Yaping. 1995. On Quasi-Two-Week (10-20 Day) Oscillation in the Tropical Atmosphere[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 19(4): 435–444. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1995.04.06

- 李华凝, 姚素香, 储鹏. 2018. 东亚季风区冬季经向风的季节内变化及其可能机理[J]. 大气科学学报, 41(04): 494–501. Li Huaning, Yao Suxiang, Chu Peng. 2018. Intraseasonal variation of winter meridional wind in East Asian monsoon region and its possible mechanism[J]. Trans Atmos Sci (in Chinese), 41(4): 494–501. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20170805001
- 李靖怡, 王遵娅, 温敏. 2020. 多要素表征的东亚季风区准双周振荡特征[J]. 应用气象学报, 31(06): 653–667. Li Jingyi, Wang Zunya, Wen Min. 2020. Characteristics of QBWO over the East Asian Monsoon Region Presented by Different Elements[J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 31(06): 653–667. doi: 10.11898/1001-7313.20200602
- 李进, 丁婷, 孙林海, 等. 2016. 1998 年长江中下游地区暴雨过程大气低频扰动场分析[J]. 气象与环境学报, 32(4): 23–31. Li Jin, Ding Ting, Sun Linhai, et al. 2016. Analysis of low-frequency atmospheric disturbances over mid-lower reaches of the Yangtze River during heavy rainfall in 1998[J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 32(4): 23–31. doi: 10.3969/j.issn.1673-503X.2016.04.003
- 李文铠, 何金海, 祁莉, 等. 2014. MJO 对华南前汛期降水的影响及其可能机制[J]. 热带气象学报, 30(05): 983–989. Li Wenkai, He Jinhai, Qi Li, et al. 2014. The Influence of the Madden-Julian Oscillation on Annually First Rain Season Precipitation in South China and Its Possible Mechanism[J]. Journal of Tropical meteorology (in Chinese), 30(05): 983–989. doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2014.05.019
- Lee J Y, Wang B, Wheeler M C, et al. 2013. Real-time multivariate indices for the boreal summer intraseasonal oscillation over the Asian summer monsoon region[J]. Climate Dynamics, 40(1–2): 493–509. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1544-4>
- Li J Y, Mao J Y, Wu G X. 2015. A case study of the impact of boreal summer intraseasonal oscillations on Yangtze rainfall[J]. Climate Dynamics, 44(9–10): 2683–2702. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2425-9>
- Li J Y, Mao J Y. 2019. Coordinated Influences of the Tropical and Extratropical Intraseasonal Oscillations on the 10-30-Day Variability of the Summer Rainfall over Southeastern China[J]. Climate Dynamics, 53(4): 137–153. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4574-8>
- Liebmann G, Smith C A. 1996. Description of a complete(interpolated) outgoing longwave radiation dataset[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 77: 1275–1277.
- Liu Y, Yang S. 2023. The impact of mid-high-latitude Eurasian ISO on soil moisture anomaly in North China during boreal summer[J]. Climate Dynamics, 61: 185–201. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06578-6>
- 陆尔, 丁一汇. 1996. 1991 年江淮特大暴雨与东亚大气低频振荡[J]. 气象学报, (06): 730–736. Lu Er, Ding Yihui. 1996. Low Frequency Oscillation in East Asia During The 1991 Excessively Heavy Rain Over ChangJiang-HuaiHe River Basin[J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), (06): 730–736. doi: 10.11676/qxxb1996.075
- 梁萍, 丁一汇. 2012. 东亚梅雨季节内振荡的气候特征[J]. 气象学报, 70(03): 418–435. Liang Ping, Ding Yihui. 2012. Climatologic characteristics of the intraseasonal oscillation of East Asian meiyu[J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 70(03): 418–435. doi: 10.11676/qxxb2012.036



- 刘芸芸, 丁一汇. 2020. 2020 年超强梅雨特征及其成因分析[J]. 气象, 46(11): 1393–1404. Liu Yunyun, Ding Yihui. 2020. Characteristics and Possible Causes for the Extreme Meiyu in 2020[J]. Meteor Mon (in Chinese), 46(11): 1393–1404. doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.001](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.001)
- 苗芮, 温敏, 张人禾. 2017. 2010 年华南前汛期持续性降水异常与准双周振荡[J]. 热带气象学报, 33(2): 155–166. Miao Rui, Wen Min, Zhang Renhe. 2017. Persistent Precipitation Anomalies and Quasi-biweekly Oscillation During the Annually First Rainy Season over South China in 2020[J]. Journal of Tropical meteorology (in Chinese), 33(2): 155–166. doi: [10.16032/j.issn.1004-4965.2017.02.002](https://doi.org/10.16032/j.issn.1004-4965.2017.02.002)
- 苗芮. 2019. 中高纬度和热带系统协同对华南前汛期持续性强降水的影响[D]. 北京: 中国气象科学研究院博士学位论文, 121pp. Miao Rui. 2019. The Synergistic Effect of the Systems in the Mid-high Latitudes and Tropics on Persistent Heavy Rainfall during the First Rainy Season over South China[D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Chinese Academy of Sciences, 121pp.
- Madden R A, Julian P R. 1971. Detection of a 40–50 Day Oscillation in the Zonal Wind in the Tropical Pacific[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 28: 702–708. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1971\)028<0702:DOADOI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1971)028<0702:DOADOI>2.0.CO;2).
- Madden R A, Julian P R. 1972. Description of Global-Scale Circulation Cells in the Tropics with a 40–50 Day Period[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 29: 1109–1123. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1972\)029<1109:DOGSCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1972)029<1109:DOGSCC>2.0.CO;2).
- 庞玥, 王黎娟, 于波. 2013. 江淮流域梅雨期降水与 10~30d 低频振荡的联系[J]. 大气科学学报, 36(6): 742–750. Pang Yue, Wang Lijuan, Yu Bo. 2013. The relationship between 10–30d low-frequency oscillation and the rainfall over Changjiang-Huaihe River Valley during Meiyu period[J]. Trans Atmos Sci (in Chinese), 36(6): 742–750. doi: [10.13878/j.cnki.dqkxb.2013.06.011](https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxb.2013.06.011)
- Qiu D, Yao S X, Xia Y C. 2022. Pre-summer Persistent Heavy Rain over Southern China and Its Relationship with Intra-seasonal Oscillation of Tropical Atmosphere[J]. Journal of Tropical Meteorology, 28(4): 445–456. doi: <https://doi.org/10.46267/j.1006-8775.2022.033>
- 苏同华, 薛峰, 陈敏艳, 等. 2017. 季节内振荡影响西太平洋副热带高压两次北跳的机制[J]. 大气科学, 41(03): 437–460. SU Tonghua, XUE Feng, CHEN Minyan, et al. 2017. A Mechanism Study for the Intraseasonal Oscillation Impact on the Two Northward Jumps of the Western Pacific Subtropical High[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(3): 437–460. doi: [10.3878/j.issn.1006-9895.1609.16125](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1609.16125)
- Sun X G, Jiang G X, Ren X J, et al. 2016. Role of intraseasonal oscillation in the persistent extreme precipitation over the Yangtze River basin during June 1998[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121: 10453–10469. doi: <https://doi.org/10.1002/2016JD025077>
- 田佳, 杨双艳, 刘雅舒. 2023. 夏季青藏高原非绝热加热准双周振荡强度的年际变化及其与中国东部降水异常的联系[J]. 大气科学, 47(2): 327–342. Tian Jia, Yang Shuangyan, Liu Yashu. 2023. Interannual Variation of the Quasi-biweekly Oscillation Intensity of Diabatic Heating over the Tibetan Plateau during Boreal Summer and Its Relationship with Rainfall Anomaly over Eastern China [J]. Chinese Journal of

- Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(2): 327–342. doi: [10.3878/j.issn.1006-9895.2108.21106](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2108.21106)
- Trenberth K E. 1986. An assessment of the impact of transient eddies on the zonal flow during a blocking episode using localized Eliassen-Palm flux diagnostics[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 43(19): 2070–2087. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1986\)043<2070:AAOTIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1986)043<2070:AAOTIO>2.0.CO;2)
- 王晨宇, 姚素香, 黄安宁, 等. 2021. 不同纬度天气尺度扰动影响 2020 年夏季梅汛期降水的数值模拟[J]. 大气科学学报, 44(02): 228–239. Wang Chenyu, Yao Suxiang, Huang Anning, et al. 2021. Numerical simulation of effects of synoptic scale disturbances at different latitudes on Meiyu precipitation in 2020[J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(02): 228–239. doi: [10.13878/j.cnki.dqkxb.20201122001](https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxb.20201122001)
- Wang C Y, Yao S X. 2021. Numerical study of effects of synoptic - scale disturbances at high and low latitudes on mean summer precipitation over north - eastern China and the Tibetan Plateau[J]. International Journal of Climatology, 41(9): 4672–4683. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.7093>
- 魏蕾, 房佳蓓, 杨修群. 2017. 华南夏季 12-30d 持续性强降水的低频特征分析[J]. 气象学报, 75(1): 80–97. Wei Lei, Fang Jiabei, Yang Xiuqun. 2017. Low frequency oscillation characteristics of 12-30 d persistent heavy rainfall over South China[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 75(1): 80–97. doi: [10.11676/qxb.2017.008](https://doi.org/10.11676/qxb.2017.008)
- Xia Y, Yao S, Sun T, et al. 2023. Role of the Low-Latitude Quasi-Biweekly Oscillation in the Extreme Persistent Heavy Rainfall in the Mei-Yu Season over the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Climate, 36(11): 3817–3832. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0343.1>
- 杨辉, 李崇银. 2005. 热带大气季节内振荡的传播及影响因子研究[J]. 气候与环境研究, 10(2): 145–156. YANG Hui, LI Chongyin. 2005. A Study of Propagation of Tropical Intraseasonal Oscillation and Its Influence Mechanism[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10(2): 145–156. doi: [10.3878/j.issn.1006-9585.2005.02.01](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2005.02.01)
- 杨宁, 金荣花, 肖天贵, 等. 2020. 夏季沿亚洲副热带西风急流 Rossby 波传播及其与我国降水异常的联系[J]. 气象, 46(01): 1–14. Yang Ning, Jin Ronghua, Xiao Tianguai, et al. 2020. Propagation of Rossby Wave Along Asian Subtropical Westerly Jet in Summer and Its Impact on Anomaly of Precipitation in China[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 46(01): 1–14. doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2020.01.001](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2020.01.001)
- 袁媛, 申乐琳, 晏红明, 等. 2023. 2020/2021 年冬季三次全国型强冷空气过程及其低频特征[J]. 大气科学, 47(5): 1557–1575. Yuan Yuan, Shen Lelin, Yan Hongming, et al. 2023. Three Cold Surges in China during the Winter of 2020/2021 and Their Low-Frequency Features [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(5): 1557–1575. doi: [10.3878/j.issn.1006-9895.2204.21222](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2204.21222)
- Yang J, Wang B, Wang B, et al. 2010. Biweekly and 21–30-day variations of the subtropical summer monsoon rainfall over the lower reach of the Yangtze River basin [J]. Journal of Climate, 23(5): 1146–1159. doi: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3005.1>
- 周兵, 文继芬. 2007. 1998 年夏季我国东部降水与大气环流异常及其低频特征[J]. 应用气象学报, 18(2): 129–136. Zhou Bing, Wen Jifen. 2007. Abnormality of summertime precipitation of eastern China and general

circulation with LFO in 1998[J]. J Appl Meteor Sci (in Chinese), 2007, 18(2): 129–136.

周宁芳, 康志明, 赖芬芬. 2014. 2012 年夏季华北降水和环流形势的低频振荡特征分析[J]. 气象, 40(09):

1106–1113. Zhou Ningfang, Kang Zhiming, Lai Fenfen. 2014. The Low Frequency Characteristics of Precipitation and Its Circulation over North China in Summer 2012[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 40(09): 1106–1113. doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2014.09.008](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2014.09.008)

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[J]. 高原

气象, 27(增刊): 98–108. Zhan Ruifen, Sun Guowu, Zhao Bingke, et al. 2008. Quasi-Biweekly Oscillation of the Subtropical Summer Monsoon Rainfall over East China and Its Possible Maintaining Mechanism[J].

Plateau Meteorology (in Chinese), 27(supplement): 98–108.

Zhu T, Yang J. 2021. Two Types of Mid-High-Latitude Low-Frequency Intraseasonal Oscillations near the Ural Mountains during Boreal Summer[J]. Journal of Climate, 34: 4279–4296. doi:

<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0589.1>