

文章编号: 2096-1618(2022)01-0096-07

西太平洋低频振荡强度的年际变化及其主模态特征

陈沛宇¹, 侯劭禹², 巩远发³, 付 娇², 赵福虎⁴, 刘成瀚⁵, 王焕哲²

(1. 河北省气象技术装备中心, 河北 石家庄 050021; 2. 河北省人工影响天气办公室, 河北 石家庄 050021; 3. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 4. 重庆市气象台, 重庆 401147; 5. 辽宁省气象台, 辽宁 沈阳 110166)

摘要:为研究南海-西太平洋 OLR 30~60 天低频振荡时空变化的主模态及其对中国夏季降水的影响, 利用逐日向外长波辐射(OLR)和中国 839 站降水资料, 采用带通滤波、EOF 和线性回归等方法, 分析南海-西太平洋 OLR 30~60 天低频振荡强度的季节分布和时空变化特征及其与中国夏季降水距平之间的联系。结果表明: (1) 西太平洋地区 OLR 30~60 天低频振荡强度及其空间分布都具有显著的季节变化特征, 活跃区主体基本位于南北半球的低纬热带海域。(2) EOF 第一模态特征向量在冬、春两季的最大变率中心主要在南半球赤道附近低纬地区, 夏、秋两季北移至北半球低纬地区; EOF 第二模态特征向量出现了经向三极子型和三角形三极子型分布。(3) 部分地区的夏季降水异常与西太平洋季风和副热带季风、南海季风的强度存在一定的相关性。对比两次线性回归结果, 发现夏季热带西太平洋 OLR 30~60 天低频振荡强度的第二模态与长江中下游降水有较好的联系, 表明夏季长江中下游降水受副热带季风、南海季风的影响较大。

关键词:气候学; 低频振荡强度; 射出长波辐射; 西太平洋; 长江中下游

中图分类号: P447

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2022.01.016

0 引言

西太平洋海域及其上空的对流加热异常对中国降水异常有重要的影响^[1-4]。早在 20 世纪 80 年代, 蒋尚城等^[5-6]就发现了 OLR 与云量、对流强度之间的联系, 并且利用 OLR 资料, 指出副热带高压和 ITCZ 的演变规律。副热带高压与 ITCZ 的周期性变化对长江流域中下游连阴雨和连晴过程有重要的影响^[7]。夏季热带西太平洋对流活动异常强时, 长江中下游降水偏少, 而黄河流域、华北等地降水偏多; 反之, 则长江中下游降水偏多易发生洪涝, 黄河流域、华北等地降水偏少易发生干旱^[8]。宋文玲^[9]定义了西太平洋 OLR 强度指数, 也发现了夏季西太平洋地区对流活动强度与同期江淮地区降水有很好的负相关。

中国大部分地区的降水异常与热带西太平洋上空大气低频振荡密切相关^[10-11]。谢安等^[12]通过对 OLR 30~60 天低频振荡进行合成分析, 发现低频对流信号在赤道西太平洋附近北抬时, 西太平洋海域台风较多, 这些台风的活动与中国华南、华北的降水异常有直接的关系。热带西太平洋上空位势高度场 30~50 天低频振荡也可以通过影响副热带高压的位置、强弱, 进而对四川盆地降水产生影响^[13]。巩远发等^[14]研究了亚洲季风区大气热源汇, 指出南海附近大气热源(热汇)低频振荡较活跃时, 长江流域降水偏少(多)。

西太平洋上空大气低频振荡对南海夏季风、西太平

洋季风的强度至关重要^[15-16]。南海附近 30~60 天低频振荡的发展是南海夏季风爆发的一个不可或缺的因素^[17]。李崇银等^[18]分析了南海强、弱夏季风低频振荡的活动, 指出强、弱南海夏季风主要由异常的大气季节内震荡(ISO)所激发, 南海附近 ISO 的变化往往与江淮地区的变化反相。周兵等^[19]通过定义东亚副热带季风指数, 发现长江流域中下游降水异常与东亚副热带季风强弱有显著的关联。东亚副热带季风强度较强时, 长江中下游降水偏多; 反之, 则偏少。西北太平洋夏季风强度受 850 hPa 纬向风和 OLR 的 30~60 天低频振荡的影响较大^[20], 其与长江流域夏季降水位相相反^[21]。

上述研究, 大多是从季风或低频振荡的角度讨论其对中国降水异常影响。目前针对西太平洋 30~60 天低频振荡强度对中国长江流域降水异常, 指明具体哪种因素对中国长江流域降水异常影响较大的研究还很少。因此, 本文在前人大量研究的基础上, 研究西太平洋 OLR 30~60 天低频振荡强度的季节分布特征和夏季 OLR 30~60 天低频振荡强度对中国长江流域降水异常的影响。

1 资料和方法

1.1 数据

射出长波辐射(OLR)资料来源于美国国家海洋大气局(NOAA), 分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。降水资料为中国气象局发布的 839 个台站的逐日降水数据。两个数据的时间段均为 1979 年 1 月 1 日到 2017 年 12 月 31 日。

收稿日期: 2021-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41775079); 国家自然科学基金重点——区域创新发展联合基金资助项目(U20A2097)

1.2 方法

与研究海气系统季内振荡的方法类似^[21],本文将带通滤波的结果取平方,是为了更明显地体现低频振荡强度特征。采用经验正交函数(EOF)分解的方法来得到低频振荡强度四季变化的主要空间模态和相应的时间系数。在分析各模态所对应的降水异常状况时,采用了一元线性回归的方法,并用 t 检验来验证其显著性。为较明确地检验整体回归效果,对每个回归场做了同号率检验。

文中的冬季指 12 月-次年 2 月,春季 3-5 月,夏季 6-8 月,秋季 9-11 月。

2 西太平洋 OLR 30 ~ 60 天低频振荡强度的季节变化

图 1 为西太平洋地区 1979-2017 年 OLR 30 ~ 60 天

低频振荡强度的季节变化分布图。由图 1(a)、(b)可以看出,冬、春季低频振荡强度大致呈东-西带状分布,其活跃区偏于南半球,极大值中心位于澳大利亚北部的帝汶海域附近,中心强度最高可以达到 $350\text{ W}^2/\text{m}^4$ 以上。在其东部的所罗门群岛附近,存在次极大值中心。夏、秋季(图 1c~d),低频振荡强度的活跃区显著北移,大部分位于北半球热带低纬地区的南海海域、菲律宾海域附近,其经度跨度相较于冬、春季大幅减小,出现 2 个极大值中心,分别位于南海海域、菲律宾海域,极大值中心可以达到 $300\text{ W}^2/\text{m}^4$ 左右。

总体看来,西太平洋海域附近冬、春、夏、秋季的低频振荡强度具有显著的季候异常特征,其中冬、春季低频振荡的活跃区主要位于赤道以南的热带低纬地区。在夏、秋季活跃区主体主要存在于北半球低纬地区。

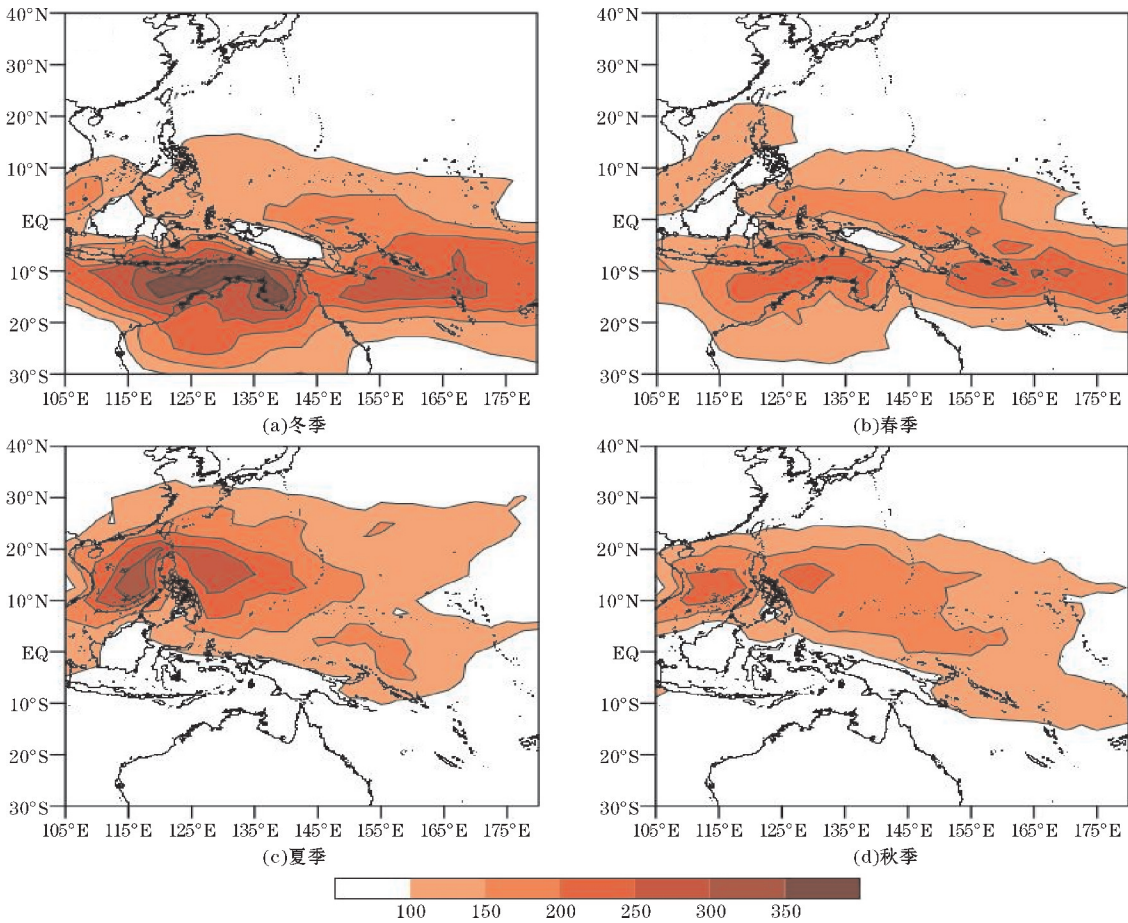


图 1 1979-2017 年平均 OLR 的 30 ~ 60 d 低频振荡强度的空间分布

3 西太平洋 OLR 30 ~ 60 天低频振荡强度时空变化特征

表 1 显示了每个季节的前三个空间模态的方差贡献率,各个季节均是前两个模态累计方差贡献率较大,故本文主要介绍 EOF 展开的前两个主模态的空间场

和相应的时间序列。

表 1 前三个空间模态的方差贡献率	单位: %			
	冬季	春季	夏季	秋季
第一特征向量	22.9	18.6	18.3	19.1
第二特征向量	10.5	13.1	14.7	10.7
第三特征向量	9.5	8.2	9.0	8.1

3.1 时空变化的第一模态

冬季第一模态特征向量的空间变化(图 2a, 相应的时间序列为图 3a)主要是经向变化。从图 2~3 可以看出,特征向量场的空间分布在中西太平洋地区为正值变异区,并且总体呈东-西带状分布,绝大部分位于赤道以南的热带低纬地区,向东最远可延伸至

180 °E附近。在南半球存在两个变异中心区,一个位于赤道以南,澳大利亚北部的帝汶海域,另一个位于所罗门群岛附近。春季第一模态特征向量的空间分布图(图 2b, 相应的时间序列为图 3b)与冬季情况基本相似,但强度有所减弱,变异中心区略向北移。在南海、菲律宾海域附近还存在两个强度较弱的负变异中心。

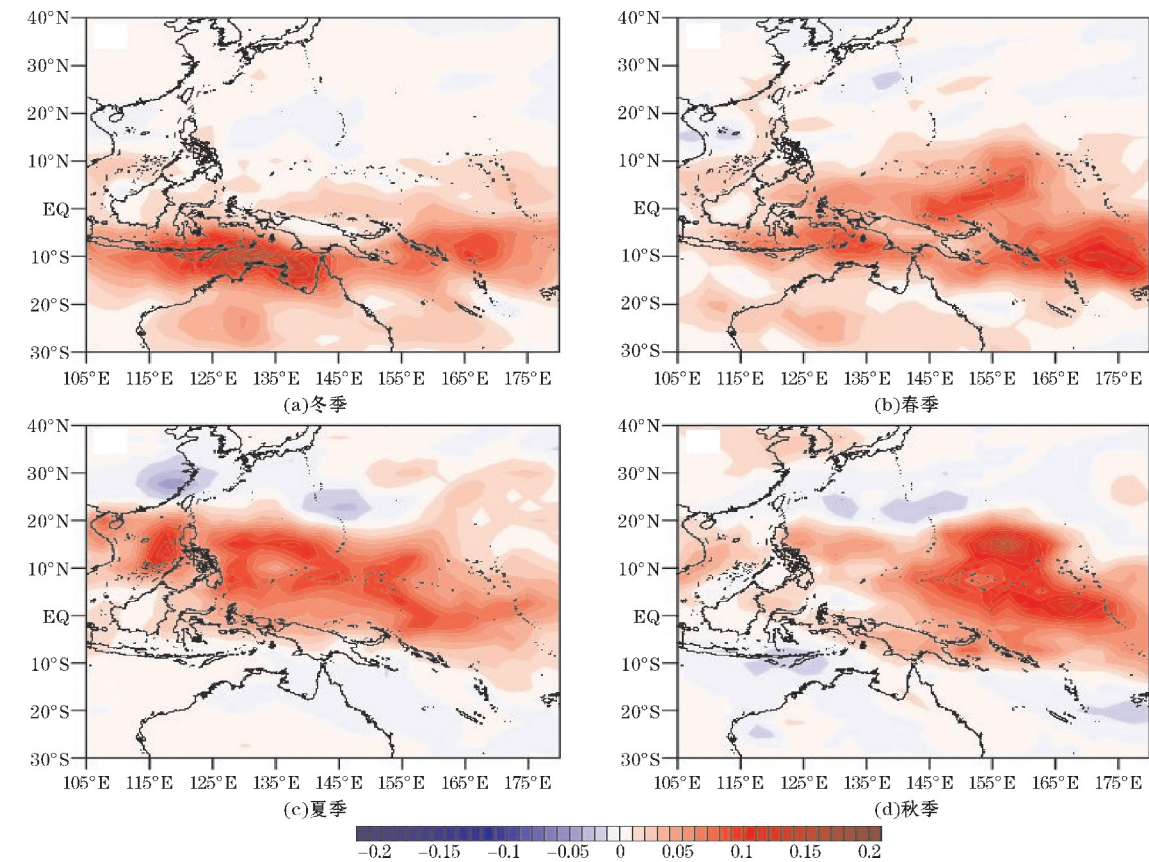


图 2 1979-2017 年西太平洋 OLR 30 ~ 60 d 低频振荡强度 EOF 分析第一模态空间向量

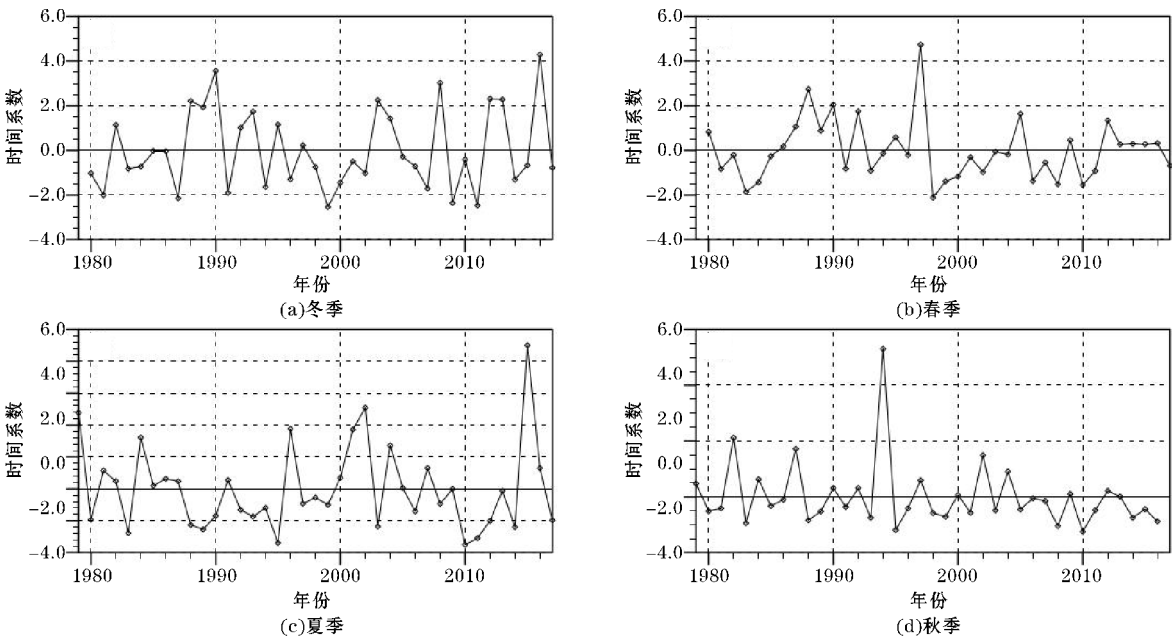


图 3 1979-2017 年西太平洋 OLR 30 ~ 60 d 低频振荡强度 EOF 分析第一模态时间系数

图2(c)和图3(c)给出了夏季第一模态特征向量场的空间分布图和时间系数图。从图2(c)可以看出,变异区的整体形态与西太平洋季风的形态相似。在赤道低纬的西太平洋地区基本为正值变异区,变异中心相比春季大幅向西北方向移动。正变异中心位于南海海域、菲律宾群岛的东部,并且高值区呈不连续的带状分布。负值变异区位于中国长江流域以南的中纬度地区。这种南北向的分布趋势表明,夏季西太平洋 OLR 30~60 天低频振荡强度在经向上具有明显的反位相变化。当南海、菲律宾群岛附近低频振荡的强度有负距平出现时,中国长江流域以南的部分地区强度增强;反之,中国长江流域以南的低频振荡强度减弱。

相比于夏季,秋季的正变异中心(图2d,相应的时间序列为图3d)向东移动至中西太平洋海域,此时南海、菲律宾群岛仍为正值,但强度减弱。负值变异区向东南移动,强度减弱。

3.2 时空变化的第二模态

图4(a)和图5(a)为冬季第二模态特征向量场及时间系数,其特征向量表现为“+-+”经向三极子型分布。负中心整体呈东-西带状分布,主要集中在赤道附近的低纬度 $10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$ 。两个正中心分布于其南北两侧,其中北半球的正中心位于中国南海、菲律宾群岛附近,相比于南半球的正中心,该正值中心的强度和范围都明显较弱。

春季第二模态的特征向量场(图4b,相应的时间序列为图5b),其空间分布较为复杂。有3个正值变

异区:强度最强的位于澳大利亚北部的帝汶海域附近,强度稍弱的位于南半球中纬澳大利亚东部的洋面上,强度最弱的位于南海、菲律宾海域附近。负变异中心位于赤道附近的日更线西侧的中西太平洋海域,以赤道为界呈南北分布。

夏季第二模态特征向量(图4c,相应的时间序列为图5c)在空间上同样呈经向三极子型分布。存在两个正值变异区,一个位于北半球热带地区的南海海域、菲律宾海域附近,另一个正值变异区强度相对较弱,其范围覆盖了中国长江流域下游的部分地区。正值变异区的整体形态与南海季风、副热带季风的形态相似。负值变异区位于赤道附近的中西太平洋海域。这种经向分布表明,夏季西太平洋 OLR 30~60 天低频振荡强度在经向上具有明显的反位相变化。中西太平洋海域附近的 OLR 30~60 天低频振荡强度距平为负,则长江流域中下游、南海海域的低频振荡强度距平为正,其在经向空间分布上表现为北高南低,相应的南海季风、副热带季风强度较强,中国长江流域以南、四川盆地等地区降水较多;反之,则长江流域中下游、南海海域的低频振荡强度距平为负,其在经向空间分布上表现为南高北低,中国相应地区降水较少。

图4(d)和图5(d)给出了秋季第二模态的特征向量场和时间系数,其中特征向量呈三角形三极子型分布。有两个正变异中心,一个位于北半球热带地区的南海海域,另一个位于中西太平洋海域。负变异中心位于赤道以北的北半球热带低纬地区。

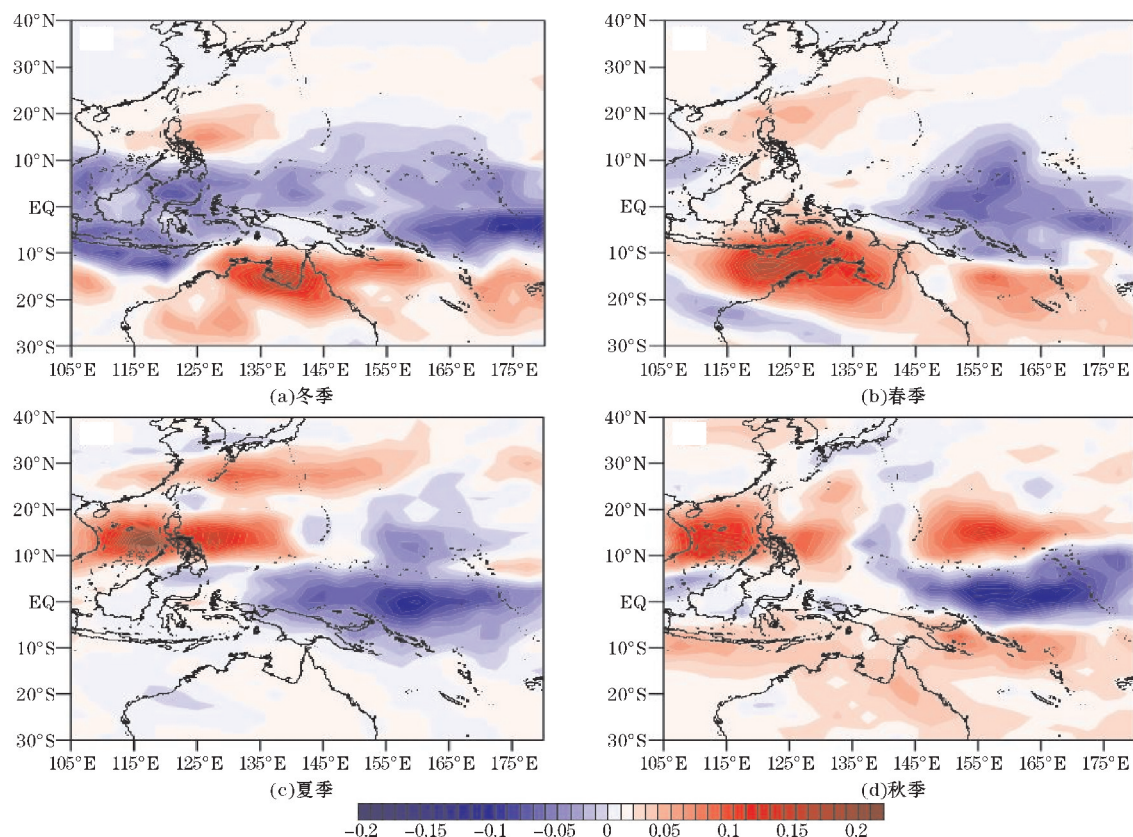


图4 1979-2017年西太平洋 OLR 30~60 d 低频振荡强度 EOF 分析第二模态空间向量

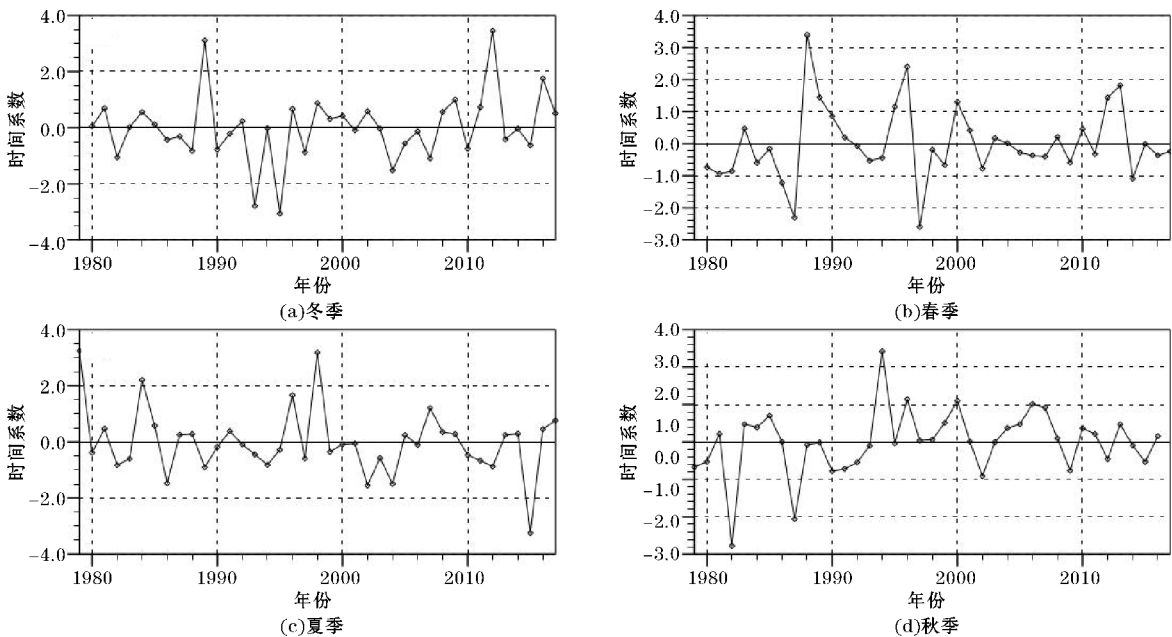


图 5 1979~2017 年西太平洋 OLR 30~60 d 低频振荡强度 EOF 分析第二模态时间系数

4 与 OLR 30~60 天低频振荡强度相联系的降水距平场特征

夏季西太平洋地区 OLR 30~60 天低频振荡强度的第一模态和第二模态分别对应西太平洋季风与南海、副热带季风强度的位相变化,因此该地区夏季低频振荡强度的变化必然会对中国降水产生影响。但具体哪一种季风对中国降水的影响较大?鉴于此,选取 1979~2017 年中国 839 站降水资料,将其与 EOF 第一、二模态的时间序列做回归分析,以考察中国夏季降水与西太平洋地区 OLR 30~60 天低频振荡强度的关系及其与亚洲夏季风之间的联系。

图 6 给出了与夏季西太平洋 OLR 30~60 天低频振荡强度的 EOF 第一模态时间序列相联系的降水距平回归场。从图中可以发现,当南海海域、菲律宾群岛附近的低频振荡强度异常偏高,而长江流域下游的低频振荡强度异常偏低时,西太平洋季风处于强度较强的位相,此时四川南部、贵州、云南、广西、湖南等长江流域以南的地区夏季降水一致偏高,而长江流域附近的浙江、江西等地夏季降水一致偏低;反之亦然。这些降水的异常变化通过了 95% 的信度检验,表明在夏季,西太平洋季风主要影响中国长江流域以南部分地区的降水。图 7 给出了第一模态还原场与距平场的同号率检验结果。从图中可以看出,同号率检验的结果平均为 53% 左右,大部分值介于 48%~57%,效果最好的是 2015 年,同号率为 65%。

与夏季西太平洋 OLR 30~60 天低频振荡强度 EOF 第二模态时间序列相联系的降水距平回归场

(图 8) 大值区主要出现在中国西南、东北等内陆地区。由图 8 可以看到,当中国南海与长江流域下游的低频振荡强度异常偏高时,南海季风、副热带季风也处于强度较强的位相,此时四川、重庆、甘肃南部和新疆东部、青藏高原东部以及东北的部分地区降水量一致偏高,而福建、浙江、江西以及湖南部分地区降水量偏低;反之亦然。这说明中国华南部分沿海地区与西南、华北以及东北地区的降水场呈反位相变换,即关键区的 OLR 30~60 天低频振荡强度较强,南海季风、副热带季风也较强,那么西南、华北以及东北地区降水偏多,易引发洪涝,而华南地区降水偏少,易引发干旱;反之亦然。这些降水场的异常变化都超过了 95% 的信度检验。图 9 给出了第二模态还原场与距平场的同号率检验结果,可以看出,同号率检验的结果平均约为 55% 左右,大部分值介于 50%~59.5%,效果最好的是 1998 年,同号率约为 76%。

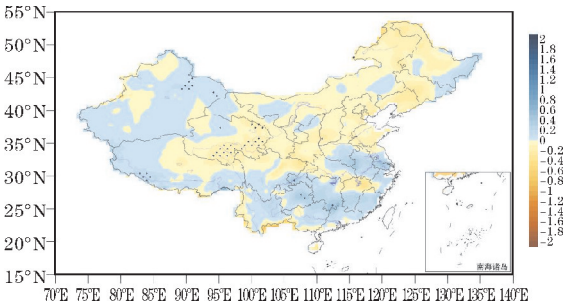


图 6 西太平洋 OLR 30~60 d 低频振荡强度 EOF 分析第一模态时间系数与降水的回归场(加点的区域表示通过 95% 的信度检验)

对比两次回归与同号率检验的结果,发现第二模态时间系数与降水的回归效果反而更好。这表明中国夏季降水受南海、副热带季风的影响多于西太平洋季风。

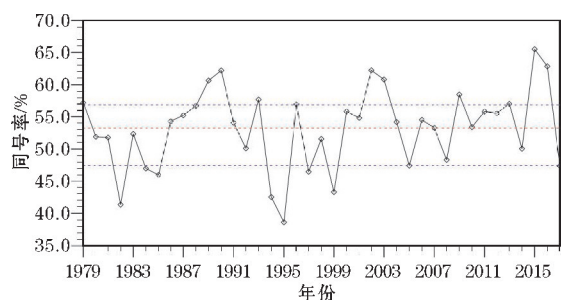


图7 1979–2017 年第一模态还原场与距平场同号率检验折线图
(红线代表平均数,蓝线代表四分位数)

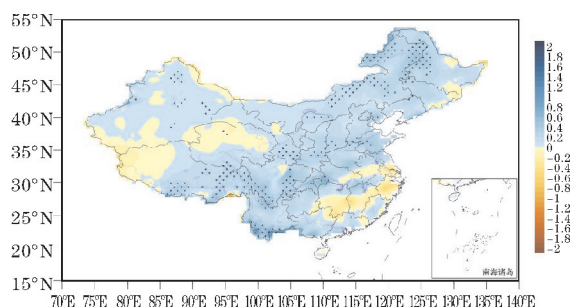


图8 西太平洋 OLR 30 ~ 60 d 低频振荡强度 EOF 分析第二模态时间系数与降水的回归场(加点的区域表示通过 95% 的信度检验)

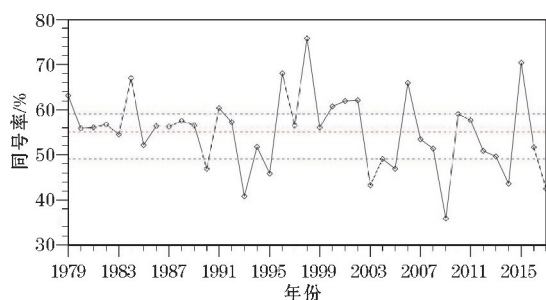


图9 1979–2017 年第二模态还原场与距平场同号率检验折线图
(红线代表平均数,蓝线代表四分位数)

5 结论

利用多种资料,计算出了西太平洋地区(30°S ~ 40°N, 105°E ~ 180°E) OLR 30 ~ 60 天低频振荡强度,对低频振荡强度进行 EOF 分解,并且利用夏季 EOF 前两个模态的时间系数对中国降水距平进行了线性回归,得到如下结论。

(1)西太平洋地区 OLR 30 ~ 60 天低频振荡强度及其活跃区的分布都具有明显的季节变化。活跃区主体基本位于南北半球的中低纬海域,经向跨度大。其中冬、春两季低频振荡活跃区主要位于赤道以南的帝汶海域和所罗门群岛附近;夏、秋两季活跃区的位置相比于冬、春季明显偏向西北方向,极大值区位于南海、菲律宾海域附近。

(2)低频振荡强度 EOF 分解第一主分量表明:冬、春季变异区主体位于赤道以南的热带地区,变异中心在澳大利亚北部的帝汶海域;夏、秋季变异区北移,位

于赤道以北的低纬地区,正值变异中心位于南海、菲律宾群岛的东部,负值变异区覆盖长江中下游地区。其中夏季变异区的整体形态与西太平洋季风类似,在一定程度上可以反映夏季西太平洋季风异常强弱。

低频振荡强度 EOF 分解第二主分量表明:冬、春季变异区呈现出经向三极子型分布,南海、菲律宾附近为强度较弱的正值变异区;夏季正值变异中心位于南海、菲律宾,范围覆盖中国长江中下游的部分地区;秋季变异区呈现为纬向三极子型分布。第二模态中夏季正值变异区的整体形态与南海季风、副热带季风相似,在某种程度上也可以反映南海季风、副热带季风的强弱变化。

(3)长江流域以南的部分地区降水异常与西太平洋季风强弱有较为一致的变化,而长江流域中游、中国华北、东北等地的降水异常受南海季风、副热带季风的强弱变化影响较大。对比两次回归的同号率结果可以发现,夏季第二模态时间序列的回归结果优于第一模态时间序列的回归结果,说明中国夏季降水异常主要是受到南海季风、副热带季风的影响,西太平洋季风对中国夏季降水异常的影响相对较弱。

研究发现,夏季第二模态时间系数与降水的回归场对青藏高原南部的部分地区有较好的反映,可能是印度季风与南海季风之间的联系所导致的,但其具体的过程和物理机制还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 黄荣辉,孙凤英. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响[J]. 大气科学,1994,18(2):141–151.
- [2] 袁杰,巩远发,魏凤英,等. 关键区海温年代际异常对我国东部夏季降水影响[J]. 应用气象学报,2013,24(3):268–277.
- [3] 闵锦忠,李春,吴芃. 夏季热带西太平洋对流与长江中下游降水关系的研究[J]. 大气科学,2005,29(6):947–954.
- [4] 张苏平,蒋尚城. 亚洲季风区 ITCZ 对华北雨季异常的可能影响[J]. 大气科学进展(英文版),2001,18(5).
- [5] 蒋尚城,张卫东. OLR 揭示的北太平洋副热带高压的气候学特征[J]. 地理研究,1994,13(2):27–33.
- [6] 蒋尚城,戴志远. The Climatic Characteristics of The Subtropical High in West Pacific From Satellite Observations [J]. Chinese Science Bulletin, 1990,35(5):403–403.
- [7] 施宁,朱盛明. 春季热带地区 OLR 低频振荡及其与长江中下游连阴雨[J]. 大气科学,1991,15

- (2):53-62.
- [8] 黄荣辉,顾雷,徐予红,等.东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系[J].大气科学,2005,29(1):20-36.
- [9] 宋文玲.热带西太平洋对流活动与中国夏季降水[J].应用气象学报,2005,16(3):63-69.
- [10] 贺懿华,王晓玲,金琪.南海热带对流季节内振荡对江淮流域旱涝影响的初步分析[J].热带气象学报,2006,22(3):259-264.
- [11] 杨辉,李崇银.江淮流域夏季严重旱涝与大气季节内振荡[J].大气科学进展(英文版),2003,20(4):540-553.
- [12] 谢安,叶谦.OLR低频振荡与西太平洋台风的发生[J].应用气象学报,1994,5(2):143-150.
- [13] 李跃清.热带西太平洋上空大气低频振荡与副高东西变动及四川盆地旱涝异常的初步分析[J].高原山地气象研究,1992(2):11-16.
- [14] 巩远发,段廷扬,张菡.夏季亚洲大气热源汇的变化特征及其与江淮流域旱涝的关系[J].大气科学,2007,31(1):89-98.
- [15] 陈尚锋,温之平,陈文.南海地区大气30~60天低频振荡及其对南海夏季风的可能影响[J].大气科学,2011,35(5):982-992.
- [16] 靳莉君,赵平.夏季南海季风对长江中下游季风降水影响的观测分析和数值模拟[J].气象学报,2012,70(4):670-680.
- [17] 穆明权,李崇银.1998年南海夏季风的爆发与大气季节内振荡的活动[J].气候与环境研究,2000,5(4):375-387.
- [18] 李崇银,龙振夏,张庆云.强弱南海夏季风活动及大气季节内振荡[J].大气科学进展,2001,18(6):1146-1160.
- [19] 周兵,何金海,吴国雄,等.东亚副热带季风特征及其指数的建立[J].大气科学,2003,27(1):123-135.
- [20] 王慧,丁一汇,何金海.西北太平洋夏季风的气候学研究[J].气象学报,2005,63(4):418-430.
- [21] 刘芸芸,丁一汇.西北太平洋夏季风对中国长江流域夏季降水的影响[J].大气科学,2009,33(6):1225-1237.
- [22] 李丽平.海气系统季内振荡现象的气候学研究[D].南京:南京气象学院,2004.

Interannual Variation of Low Frequency Oscillation Intensity and its Main Modal Characteristics in the Western Pacific Ocean

CHEN Peiyu¹, HOU Shaoyu², GONG Yuanfa³, FU Jiao², ZHAO Fuhu⁴, LIU Chenghan⁵, WANG Huanzhe²

(1. Meteorology Technical Equipment Center, Shijiazhuang 050021, China; 2. Hebei Weather Modification Office, Shijiazhuang, 050021, China; 3. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 4. Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147, China; 5. Liaoning Meteorological Observatory, Shenyang 110166, China)

Abstract: In order to study the main mode of the spatio-temporal variation of the 30-60 day low-frequency oscillation in the South China Sea-Western Pacific and its influence on summer precipitation in China, the daily Outgoing Long-wave Radiation (OLR) and precipitation data from 839 weather stations in China are used. The seasonal distribution and spatio-temporal variation characteristics of the 30-60 day low-frequency oscillation intensity in the South China Sea-Western Pacific and its relationship with summer precipitation anomalies in China are analyzed by means of band-pass filtering, EOF and linear regression. Results show that: (1) the intensity and spatial distribution of OLR 30-60 day low frequency oscillation in the Western Pacific have significant seasonal variation characteristics, and the main active areas are mainly located in the low-latitude tropical waters of the northern and southern hemispheres. (2) the maximum variability center of the first mode characteristic vector of EOF in winter and spring is mainly in the low latitudes near the equator in the southern hemisphere, and moves northward to the low latitudes in the northern hemisphere in summer and autumn. The second modal eigenvector of EOF shows meridional tripole distribution and triangular tripole distribution. (3) Summer precipitation anomalies in some areas are related to the intensity of the Western Pacific Monsoon, Subtropical Monsoon, and South China Sea Monsoon. Comparing the two linear regression results, it is found that the second mode of the OLR 30-60 low frequency oscillation intensity in the tropical Western Pacific in summer has a good relationship with the precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River, indicating that the summer precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River is greatly affected by the subtropical monsoon and the South China Sea monsoon.

Keywords: climatology; low-frequency oscillation intensity; outgoing long-wave radiation; Western Pacific; the middle and lower reaches of the Yangtze River