

江南雨季降水季节内演变及其年际、年代际变化特征

詹丰兴^{①②}, 章开美^③, 何金海^{①*}, 章毅之^④, 尚可^①^① 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏 南京 210044;^② 江西省气象局, 江西 南昌 330096;^③ 江西省气象服务中心, 江西 南昌 330096;^④ 江西省气候中心, 江西 南昌 330096

* 联系人, E-mail: hejhnew@nuist.edu.cn

2013-06-25 收稿, 2015-03-14 接受

国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB430202); 国家自然科学基金资助项目(41075068); 长江学者和创新团队发展计划资助(PC-SIRT); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

摘要 利用 1961—2008 年逐日降水资料, 在对比我国东南部各地区气候态降水特征的基础上, 着重探讨了江南地区(110~120°E、24~30°N)雨季降水的季节内变化特征及其年际、年代际变化规律。结果表明: 1) 江南雨季气候态降水的季节内变化具有明显的双峰型特征, 两个峰值集中期分别是 4、6 月中旬前后。4 月中下旬第一个降水峰值率先出现在江南地区, 之后峰值降水南移, 于 6 月上中旬华南地区达峰值集中期, 之后强降水才逐渐北移, 6 月中下旬又回至江南地区, 使江南地区降水达第二个峰值集中期。2) 我国江南地区区域平均的双峰降水与 4—6 月的实际降水之间的相关系数达 0.69, 这表明双峰型降水确实反映了江南雨季降水的季节内演变特征。3) 江南雨季降水双峰型的季节内变化特征具有明显的年际、年代际变化周期。年际变化周期为 2~3 a, 强信号主要集中在 20 世纪 60 年代后期到 70 年代中期以及 80 年代中期到 21 世纪初; 年代际变化周期约为 8~10 a, 在整个时间域上都存在, 最强信号集中在 80 年代初到 90 年代末期。4) 年代际尺度上, 江南雨季降水的季节内变化特征(双峰型态)具有隔代显著的特征, 即 20 世纪 60、80 年代及 21 世纪初双峰型特征显著, 而 20 世纪 70、90 年代双峰型特征不显著。

关键词江南雨季;
双峰型;
季节内变化;
年际变化;
年代际变化

江南地区主要指包括江西、湖南、福建大部、浙江南部, 即 24~30°N 范围内的我国东南部地区。江南地区人口密集、资源丰富、生态环境良好, 是重要的工业、农业、服务业基地, 是我国社会发展的重要发达地区。江南地区气象灾害种类多、范围广、影响大、损失重, 特别是汛期暴雨洪涝及其衍生灾害往往对当地经济社会发展和人民群众生命财产安全造成重大负面影响。

我国东部地区的气候异常受热带太平洋(冯娟等, 2010; 李丽平和袁爱军, 2015)、北半球中高纬东北冷涡及青藏高原积雪(He et al., 2007; Wu and Li,

2012)等影响因子的综合调控, 降水性质复杂(Wu et al., 2011)。近 50 a 来, 很多学者研究了我国东部雨带的季节变化。竺可桢(1934)、涂长望和黄士松(1944)指出, 自南海夏季风爆发后, 随着夏季风的推进, 中国东部形成华南前汛期、江淮梅雨和华北雨季。前人研究表明, 中国雨带以二次北跳、三次准静止的阶段性方式随季节向北推进(王德瀚, 1981; Tao and Chen, 1987; Ding, 1992; Huang et al., 1992)。关于我国东部降水季节变化气候态特征的研究也有不少。早在 20 世纪 80 年代初, 吴晖(1981)就发现我国南部有一片很大区域的年雨量

引用格式: 詹丰兴, 章开美, 何金海, 等, 2017. 江南雨季降水季节内演变及其年际、年代际变化特征[J]. 大气科学学报, 40(6): 759-768.

Zhan F X, Zhang K M, He J H, et al., 2017. Intraseasonal evolution of precipitation in the Jiangnan rainy season and its interannual and interdecadal variations[J]. Trans Atmos Sci, 40(6): 759-768. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130625001. (in Chinese).

分布呈现双峰型特征,峰值分别为 5、6 月与 8、9 月;马慧等(2009)选取“九五”重中之重点项目执行组指出的华南地区 16 站来代表华南,研究了华南地区降水异常特征,结果表明华南地区降水的季节分布呈现双峰型,两个峰值分别在 6 月和 8 月;李江南等(2002)在研究广东省降水的气候特征时,发现沿海站降水年变化曲线呈双峰型分布;蔡洁云和周小云(2011)也证实了广州大暴雨日数具有双峰型特征,峰值分别出现在 5、6 与 8 月。由此可见,我国夏季降水反映了季节循环特征,但季节内振荡对东部雨季的持续和推进也具有明显的调制作用(王遵娅和丁一汇,2008)。Lau and Chan(1986)发现中国东部 30°N 以南地区存在类似印度降水的双峰分布特征(Ananthakrishnan, 1977);之后,何金海和智协飞(1995)发现江淮梅雨及江南—华南一带夏季风降水都有季节锁相特征,前者呈单峰分布,后者呈双峰分布,双峰分别位于 6 月上中旬和 8 月上旬;陈隆勋等(1991)也提出海南直到华南(30°N 以南地区)降水均存在双峰型,第一次雨峰平均为 4 月中旬,华南前汛期雨季开始,自热带夏季风爆发后,华南前汛期雨季达到盛期,并向北推进,形成南方地区的第二个峰值。

由此可见,关于我国南方降水双峰型特征的研究结论是不一致的,大部分学者认为两个峰值前一个集中在 5、6 月(华南前汛期),而后一个集中在 8、9 月(华南后汛期),唯有陈隆勋(1991)和陈菊英(1991)认为江南地区在华南前汛期就存在两个峰值,前一个出现在 4 月,后一个出现在 6 月。那么这几个降水峰值究竟是怎么回事?他们的联系和区别如何?华南前汛期时段(4—6 月)内,江南地区是否真的存在双峰型季节内降水形态?其年际、年代际变化特征如何?本文将就上述几个问题做进一步分析,这对于深入了解江南地区降水的气候特征,进而提高气候预测水平和防灾减灾能力意义重大。

1 资料和方法

1.1 资料

从国家气象信息中心提供的 1961—2008 年全国 753 站逐日降水资料中,剔除 1961 年以来降水资料长度不足 48 a 的站点,从中选取我国东南部(105°~120°E、18°~50°N)354 个测站,将逐日降水资料处理成逐候降水资料。

1.2 研究方法

1.2.1 经验正交函数(EOF)时空展开

采用经验正交函数(EOF)时空展开,研究我国东南部(110°~120°E、20°~35°N)各地区多年平均降水的时空变化特征差异。将各站多年平均的逐候降水进行标准化处理后,排列成矩阵,即:

$$A = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1p} & \cdots & \sigma_{1m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n1} & \cdots & \sigma_{np} & \cdots & \sigma_{nm} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

其中: $\sigma_{ik} = \frac{x_{ik} - \bar{x}_i}{\left(\frac{1}{m} \sum_{l=1}^m (x_{il} - \bar{x}_i)^2\right)^{\frac{1}{2}}}$, $\bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m x_{il}$ ($i = 1, 2, 3 \cdots n; k = 1, 2, 3 \cdots m$)。为研究江南雨季降水的季节内变化特征,本文以我国东南部 3—7 月为研究对象, $n = 124$ (站点数), $m = 30$ (3—7 月的总候数)。将此矩阵进行 EOF 展开,得到的特征向量反映了逐候气候态降水空间分布特征,结合相应的时间系数演变,可得到这种空间分布的季节内变化特征。

1.2.2 双时间序列展开

先将 1961—2008 年的江南地区代表站平均的逐年逐候降水量排列成矩阵 B , 即:

$$B = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \cdots & \varepsilon_{1p} & \cdots & \varepsilon_{1m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \varepsilon_{n1} & \varepsilon_{n1} & \cdots & \varepsilon_{np} & \cdots & \varepsilon_{nm} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

其中: ε_{ik} ($i = 1, 2, 3 \cdots n; k = 1, 2, 3 \cdots m$) 为江南地区代表站(降水逐候时间序列变化相似)平均的第 k 年第 i 候降水量。本文研究中, $n = 72$ (1 a 的总候数), $m = 48$ (总年数)。然后,将此矩阵进行 EOF 展开,得到的模态(即特征向量)反映了江南地区平均降水的季节内变化特征,其时间系数的多年变化则反映了相应季节内变化模态的年际、年代际变化特征。

1.2.3 小波分析

小波分析方法在时域和频域上同时具有良好的局部性质,可以分析出时间序列周期变化的局部特征,从而能更清楚的看到周期随时间的变化情况,因而在气候分析中得到广泛的应用。这里选取的小波变换为:

$$W(\tau, a) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int f(t) g\left(\frac{t - \tau}{a}\right) dt. \quad (3)$$

其中: τ 是时间参数,是相对于时间 t 做了 τ 长度的平移; a 为子波数; $\frac{1}{a}$ 为频率; $g(t)$ 为小波母函数。

本文采用的是 Morlet 小波,其解析式为:

$$g(t) = (1-t^2) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}. \quad (4)$$

其中: $W(\tau, a)$ 是小波变化系数,用来反映时频特征的;小波系数模平方 $|W(\tau, a)|^2$ 的大小可以表示时间尺度信号的强弱。本文通过对多年逐候区域降水双时间序列展开后的年序列做小波分析,研究江南雨季降水季节内变化模态的年际、年代际变化特征。

2 我国东南部雨季降水气候态的季节内演变特征及其空间差异

2.1 气候态降水的时空分布特征

应用近 48 a 我国东南部 124 个测站逐日降水资料,构造 3—7 月多年平均的逐站逐候降水量标准化距平场,并对其进行 EOF 分解,前两个模态方差贡献率分别为 68.4% 和 16.8%。

第一主分量的特征向量表现为全区一致分布型,说明 3—7 月我国东南部降水具有一定的同步性,高值区位于长江流域 ($29^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$) 及南岭以南 ($20^{\circ}\sim 24^{\circ}\text{N}$) 地区 (阴影所示),而长江以南,南岭以

北的地区 ($24^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$) 处于相对低值区,即本文主要研究的江南地区。结合相应的时间系数表明:24 候 (4 月底) 以前 (系数为负) 我国南方降水呈一致少雨期,24 候之后整个东南地区的降水开始增多 (系数跃升),5 月上中旬存在一个次峰 (峰值小),5 月底 6 月初开始我国东南部降水进入另一个峰值集中期,6 月下旬达主峰值,峰值较大。第一模态反应了我国东南部 5、6 月份的降水一致偏多,但降水大值区位于长江以北 ($29^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$) 及南岭以南 ($20^{\circ}\sim 24^{\circ}\text{N}$) 的地区。

第二主分量的特征向量表现为明显的空间差异,即我国东南部自北向南依次呈现“+ -”分布,亦即江淮及华南地区呈负分布,而江南地区呈正分布的空间结构。结合相应的时间系数可以看出:1) 15 到 35 候江南地区降水偏多,而华南、江淮地区偏少,这表明江南雨季开始于 4 月上旬,结束于 6 月下旬,与陈菊英 (1991) 的观点一致。2) 江南地区气候态降水逐候变化呈现明显双峰型分布,降水峰值集中期出现在 4 月中旬以及 6 月中旬。前一个峰值对应江南汛期雨季的开始,而后一个峰值对应江南梅汛

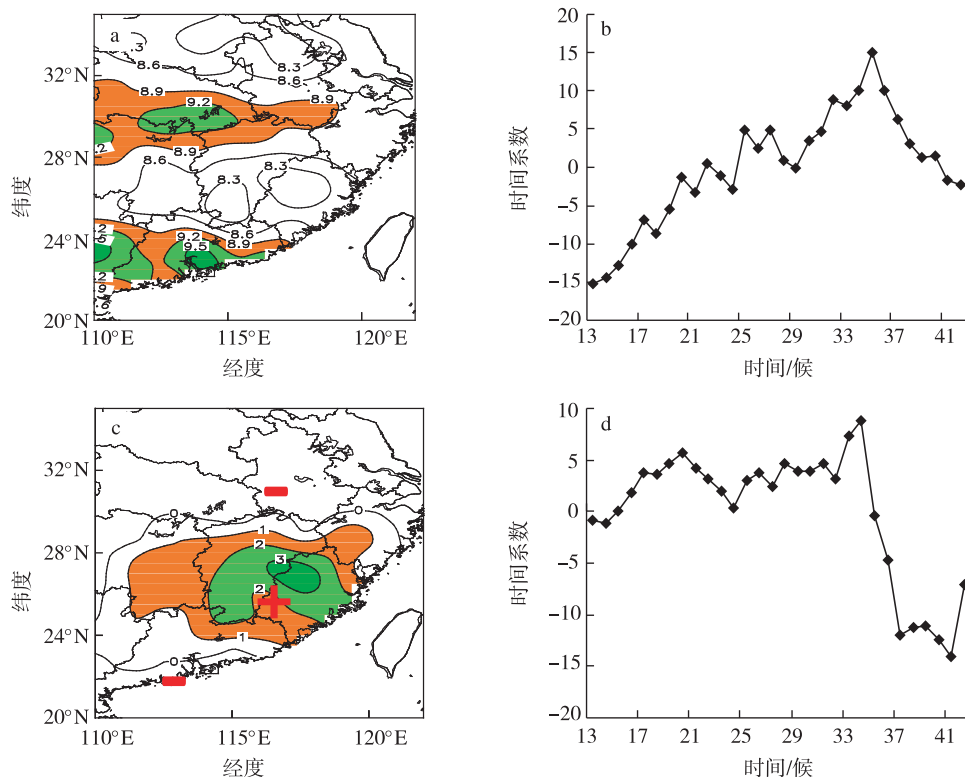


图1 我国东南部 124 个测站 3—7 月逐候降水量场 EOF 分析前两个特征向量场 (a/100, c/100) 及对应的时间系数 (b, d) (阴影为正值区)

Fig.1 The first two eigenvectors of 124 stations throughout southeastern China for pentad precipitation filed from March to July (a/100, c/100) and the corresponding time coefficients (b, d) (values in shaded areas are positive)

期雨季的开始。第二模态反映了江南地区 4—6 月降水分布显著的双峰型特征。

2.2 各纬度带气候态降水季节内变化特征

上述分析表明,第二模态所表征的降水分布及其时间演变主要代表了江南地区($24^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$)气候态降水的双峰型特征,其峰值分别出现在 4 月中旬和 6 月中旬,第一个峰值与陈隆勋等(1991)指出的结果一致。为了进一步揭示各纬度带气候态降水的季节内变化特征,计算我国东南部 5 个纬带上逐候降水量的季节偏差(5 候滑动平均与 18 候滑动平均之差),经度范围为 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$,定义季节偏差在 0.6 以上的候为显著降水峰值集中期。

由图 2 可以看出,江南各纬度带($24^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $27^{\circ}\sim 29^{\circ}\text{N}$, $29^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$)均存在两个显著的降水峰值。第一个次峰位于 4 月中旬,强度较小,第二个位于 6 月中下旬,强度最大,可称为主峰值。另外, 29°N 以南 7—8 月还有一个小峰值,这一峰值在华南最强,自南向北减小,强度小于第一个峰值,其与众所周知的华南后汛期台风降水相对应。值得注意的是,主峰值出现时间呈现为系统的滞后,最早于 6 月上中旬出现在华南($20^{\circ}\sim 24^{\circ}\text{N}$),随后于 6 月中下旬移经江南各纬度带,6—7 月移到江淮($32^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$)。这一主峰值降水的移动正是我国主雨带自南向北的体现。

综上所述,可以认为,江南地区($24^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 纬度带内)气候态降水季节内变化存在两个峰值,呈双峰型特征。第一个(次峰值)出现于 4 月中旬,第二个(主峰值)出现于 6 月中旬;华南地区($20^{\circ}\sim 24^{\circ}\text{N}$)第一个(主峰值)出现于 6 月上旬,第二个(次峰值)出现于 7—8 月,他是华南后汛期台风降水的体现;江淮地区气候态降水呈现单峰型特征,与前人的研究结果一致。主峰值呈现系统的自南向北的移动。江南雨季第一个峰值出现最早,是我国雨季开始的标志,第二个主峰值则是我国主雨带自南向北移动的表现。

图 3 所示为我国东南部地区 4、6 月中旬的气候态降水强度分布,4 月中旬(图 3a)我国东南部降水中心在江南地区,降水强度大于 8 mm/d ,而此时华南地区的降水强度较小,基本在 7 mm/d 以下。此时段为江南雨季的第一个峰值阶段,也标志着我国雨季的开始。6 月中旬我国东南部降水分布出现两个明显的中心,即江南地区东部和华南地区,分别对应为江南地区的第二个降水峰值期和华南地区第一个降水峰值期。与 4 月中旬相比,降水强度明显增

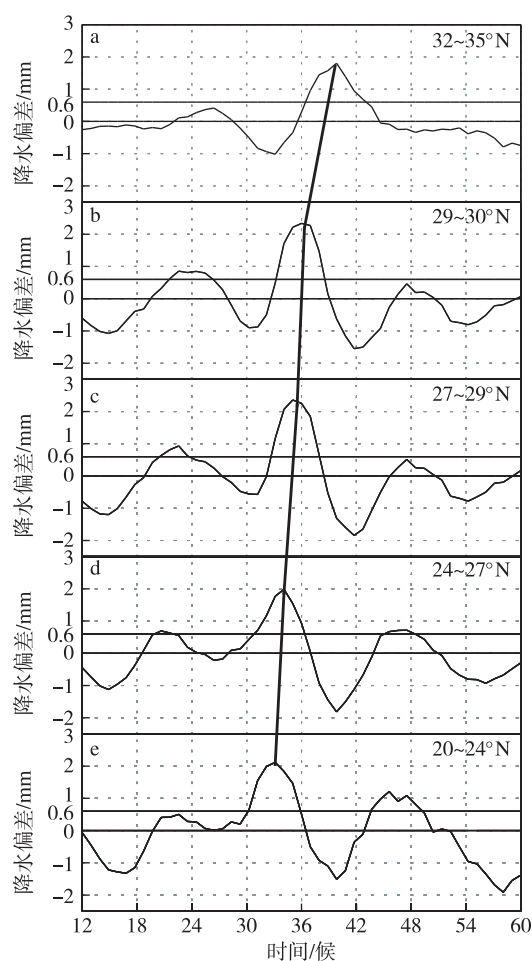


图 2 各纬度带上多年平均逐候降水量的季节偏差(粗实线表示降水峰值的北移;单位:mm)

Fig.2 Multi-year mean seasonal deviation of pentad precipitation in each latitude zone (solid line represents the northward movement of precipitation peak) (units:mm)

加,降水中心强度大于 13 mm/d 。

2.3 各地区典型站气候态降水的季节内变化特征

为进一步揭示我国东南部气候态降水的季节内变化特征差异,分别在江南、华南及江淮地区各选一个典型站(基准站)进行分析。

图 4 给出了各地区典型站 1961—2008 年平均逐候降水量的变化曲线,可以看出,江南、华南典型站降水季节内变化呈明显双峰型分布,江南典型站(修水)第一个峰值为 4 月底—5 月初,早于华南典型站第一个峰值的出现时间;第二个峰值为 35 候(6 月中下旬)。华南典型站(汕头)第一个峰值为 33 候(6 月上中旬);第二个峰值则出现在 8 月上旬,为台风降水。江淮典型站(寿县)则为单峰型分布,峰值集中期出现在 6 月下旬至 7 月上旬,最大峰值出现在 38 候(7 月上旬),反映了江淮梅雨降水的

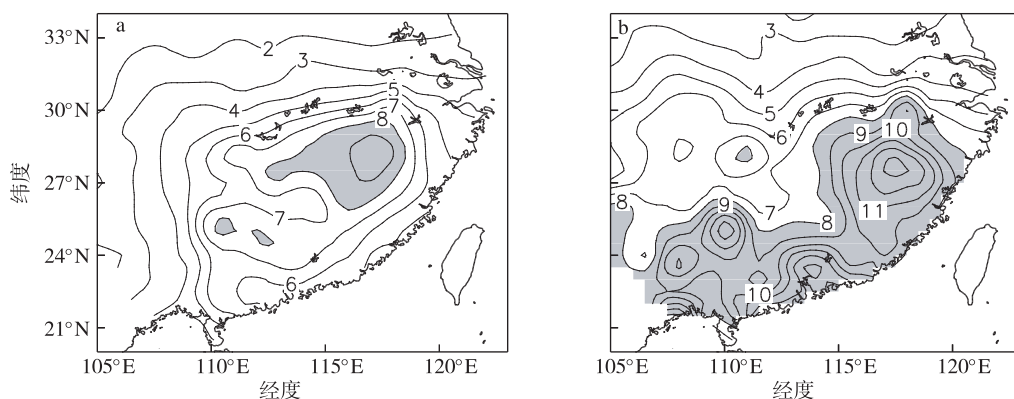


图3 我国东南部地区降水强度的气候平均态分布(等值线间隔为1,单位:mm/d)

a.20—22 候平均;b.32—34 候平均

Fig.3 Climate average distribution of precipitation intensity in southeastern China(contour interval is 1, units:mm · d⁻¹):(a) average in 20—22 pentad;(b) average in 32—34 pentad

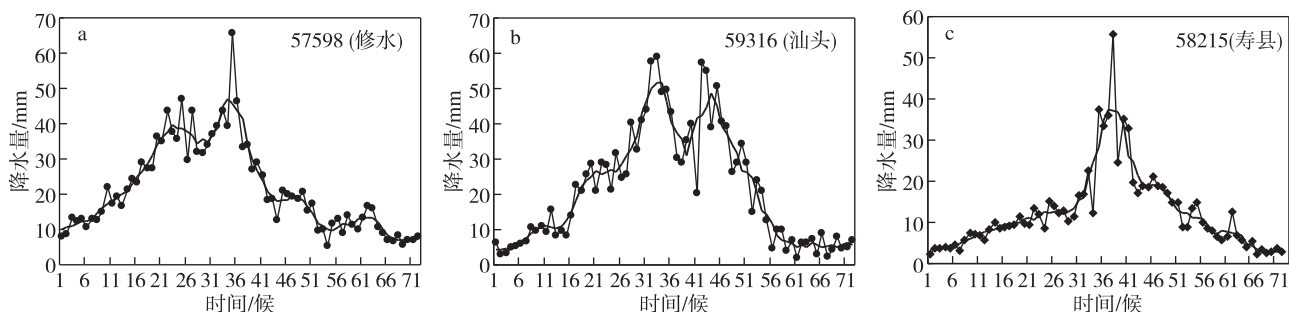


图4 1961—2008年江南(a)、华南(b)及江淮地区(c)典型站平均逐候降水量序列(粗实线为5点滑动平均;单位:mm)

Fig.4 Pentad precipitation curves averaged in 1961—2008 over (a) Jiangnan, (b) Huanan, and (c) Jianghuai(solid lines are 5-point moving mean curves)(units:mm)

特点。

2.4 各个区域代表站平均气候态降水的季节内变化特征

为了分析华南、江南、江淮三个区域平均气候态降水的季节内变化特征,分别用各地区典型站的近48 a平均逐候降水序列与我国东部354个站点求相关。为使各地区代表站数不至于太少,又相对统一,本文取与相应典型站相关系数大于0.85的站代表华南地区(23站)、江淮地区(20站),而大于0.9的代表江南地区(18站)。

计算各地区代表站点平均逐候降水序列,并进行5点滑动平均处理(图5)。可以看出江南雨季气候态降水具有双峰型季节内变化特征,第一个降水峰值集中期出现在4月中下旬到5月上旬,维持时间较长,5月底、6月初达谷值。之后,6月上中旬华南地区出现第一个降水峰值集中期,而江淮和江南地区降水仍较少。这说明4月底5月初江南地区强降雨带没有立即向北移动,而是先向南扩展,华南地区

于6月上旬开始进入前汛盛期。6月上中旬强降雨带才从华南地区有规律地向北推进,6月中下旬移至江南地区,使江南地区降水达第二个降水峰值集中期,6月下旬7月上旬强降雨带北移至江淮地区。

3 江南雨季降水季节内变化的年际、年代际特征

3.1 江南雨季降水双时间序列展开

为研究江南雨季降水双峰型特征的年际、年代际特征,将1961—2008年江南地区代表站平均的逐年逐候降水量矩阵进行双时间序列展开。双时间序列中特征向量表征降水的季节内分布。时间系数表征该降水季节内分布的年际、年代际变化。

图6给出了展开后的第一模态,该模态的方差贡献率为58.2%。第一模态中候序列很好地印证了江南地区的双峰型特征,两个降水峰值集中期分别是4月中下旬到5月上旬及6月中下旬。同时,计算第一模态时间系数与江南地区汛期(4—6月)

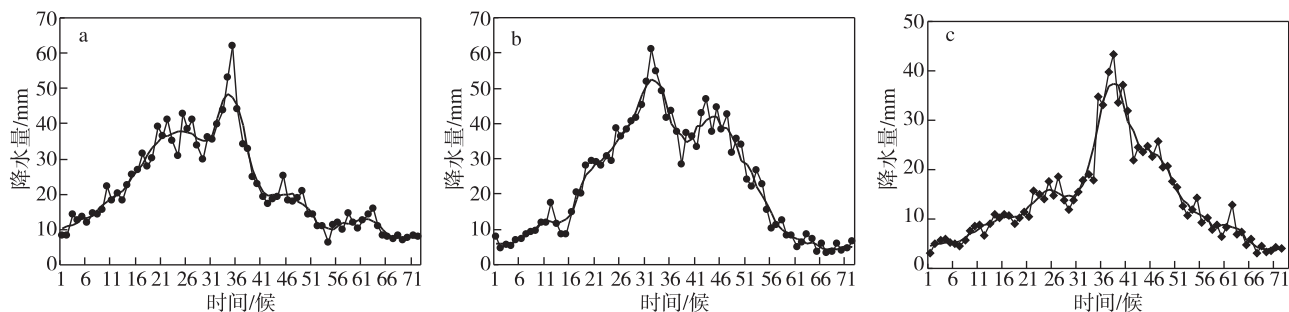


图 5 1961—2008 年江南(a)、华南(b)及江淮(c)地区 5 d 滑动平均候降水变化曲线(单位:mm)

Fig.5 5-day moving mean pentad precipitation curves over (a) Jiangnan, (b) Huanan and (c) Jianghuai during 1961—2008 (units:mm)

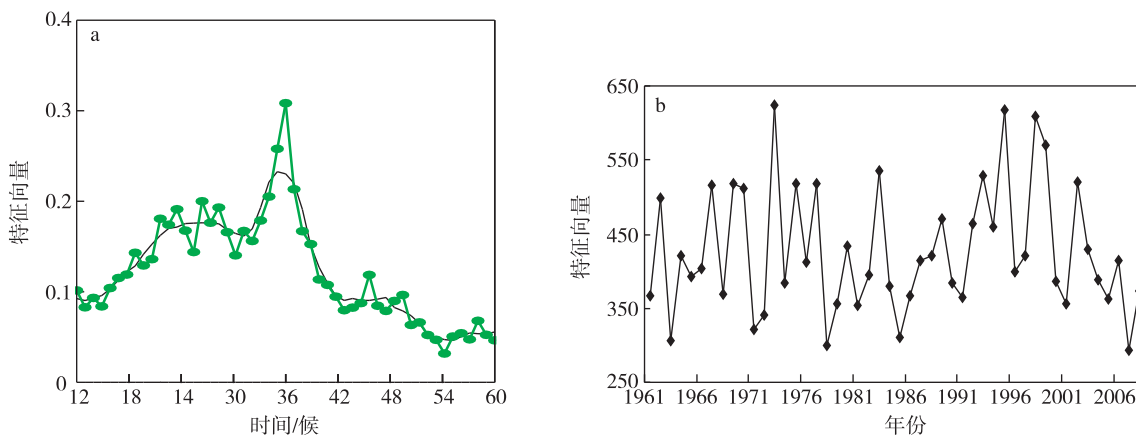


图 6 1961—2008 年江南地区逐年(b)、逐候(a)降水量场双时间序列展开的第一模态(粗实线为 5 点滑动平均)

Fig.6 First mode of doubly time series of precipitation during 1961—2008 over Jiangnan (solid line is 5-point moving mean curve)

实际降水年际变化(图略)的相关性,相关系数达 0.69,这表明江南雨季降水强度主要取决于江南雨季(4—6 月)双峰的降水强度,也说明江南地区的双峰型降水特征基本能够反映实际降水的变化特征。

3.2 双峰型降水的年际、年代际变化

为进一步揭示江南雨季双峰型降水的年际、年代际变化,对江南降水双时间序列展开第一模态时间系数年序列进行小波分析,得到 Morlet 小波变化系数的实部及模平方的时频分布(图 7)。从图中可以看出,江南雨季区域平均降水双峰降水强度具有明显的年际和年代际变化周期,年际变化周期为 2~4 a 左右,信号在 20 世纪 60 年代后期到 70 年代中期以及 80 年代中期到 21 世纪初都很强;年代际变化周期在 8~10 a 左右,在整个时间域上都存在,最强信号集中在 80 年代初到 90 年代末期。

小波分析表明江南雨季降水双峰型强度的特征具有 8~10 a 的年代际变化周期,那么江南雨季降水双峰型态的显著性又具有怎样的年代际异常特征

呢? 图 8 分别给出了江南(左)、华南(右)地区各年代逐候降水量的 5 点滑动平均,结果发现江南地区双峰型特征具有隔代显著的特征,即 20 世纪 60、80 年代及 21 世纪初双峰型显著,而 20 世纪 70、90 年代双峰型不显著。同时绘制了华南地区各个年代的逐候降水量演变曲线(图 8b、8d、8f、8h、8j)进行对比,可以看出,华南地区平均降水也具有双峰型的季节内演变,但第二个峰值位于 7—8 月,这是台风降水的反映,与江南地区 4—6 月汛期双峰型季内特征不同。

4 结论和讨论

1) 气候态降水 3—7 月的季节内演变在江南地区(24~30°N)具有双峰型特征,第一个峰值(次峰值)出现于 4 月中旬前后,而第二个峰值(主峰值)出现于 6 月中旬前后。而华南地区第一个峰值(主峰值)出现于 6 月上旬前后,第二个峰值(次峰值)出现于 7—8 月,是华南后汛期台风降水的体现。江

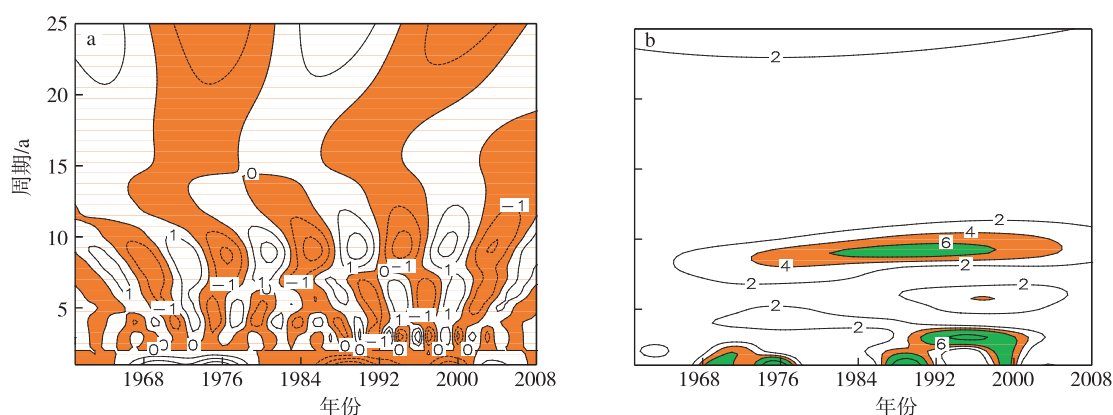


图7 双时间序列展开第一模态年序列的 Morlet 小波实部(a)及模平方(b)

Fig.7 (a) Real part and (b) modular square of morlet wavelet of the year-time serial in first mode of doubly time series

淮地区($32^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$)气候态降水呈现单峰型特征。江南雨季第一个峰值出现最早,是我国东部雨季开始的标志。第二个主峰值则是我国主雨带自南向北移动的表现。

2) 双时间序列展开表明,我国江南区域平均降水第一模态的季节内分布印证了江南地区降水的双峰型特征,其方差贡献率达到 58.2%。第一模态时间系数与江南地区汛期(4—6 月)实际降水的年际变化有较高的相关性,相关系数达 0.69,这表明江南雨季降水强度主要取决于(4—6 月)双峰型降水强度。

3) 江南雨季双峰型降水强度具有 2~4 a 的年际变化周期,其信号在 20 世纪 60 年代后期到 70 年代中期以及 80 年代中期到本世纪初都很强。年代际变化周期在 8~10 a 左右,在整个时域上都存在,最强信号集中于 80 年代初到 90 年代末期。同时还发现,江南雨季降水的双峰形态是具有隔代显著的特性,即 20 世纪 60、80 年代及本世纪初双峰型显

著,而 20 世纪 70、90 年代双峰型不够显著。

江南地区双峰型降水既相互独立,又统一于我国夏季风降水的季节演变。3 月底至 4 月初,我国大陆和西太平洋在由冬入夏的过程中纬向热力差异发生反转,盛行风向随之改变,引发副热带地区偏南风的建立,这正是副热带季风在我国南方地区的初始表现,与之对应的“江南春雨”(江南雨季第一个峰值)也是东亚副热带季风雨季的有机组成部分。而后南海季风的爆发激发了江南地区雨带的第二次活跃(江南雨季的第二个峰值),梅雨锋的南北摆动和相对停滞使江南雨季又出现明显的峰值降水,雨带也属于副热带季风性质。江南雨季的两个峰值降水均是副热带季风雨季的本质体现,所不同的是雨带所处阶段存在差异,南海季风爆发前的春雨雨带为副热带季风降水的“孕育阶段”(何金海等, 2008),而后期的江南梅汛期降水则是副热带季风降水的盛期表现。

参考文献(References)

- Ananthakrishnan R, 1977. Some aspects of the monsoon circulation and monsoon rainfall[J]. Pure & Applied Geophysics, 115(5/6): 1209-1249.
- 蔡洁云, 周小云, 2011. 近 59 年来广州市暴雨的变化特征[J]. 广东气象, 33(2): 29-31. Cai J Y, Zhou X Y, 2011. The change characteristics of heavy rain in Guangzhou city in recent 59 years[J]. Guangdong Meteorology, 33(2): 29-31. (in Chinese).
- 陈菊英, 1991. 中国旱涝的分析和长期预报研究[M]. 北京: 中国农业出版社. Chen J Y, 1991. The analysis and research of floods/droughts in China and long-range forecasting[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press. (in Chinese).
- 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等, 1991. 东亚季风[M]. 北京: 气象出版社. Chen L X, Zhu Q G, Luo H B, et al., 1991. East Asian monsoon[M]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese).
- Ding Y H, 1992. Summer monsoon rainfalls in China[J]. J Meteor Soc Japan, 70(1B): 373-396.
- 冯娟, 管兆勇, 王黎娟, 等, 2010. 夏季热带中太平洋 SST 异常型与中国东部夏季气候异常的关系[J]. 大气科学学报, 33(5): 547-554. Feng J, Guan Z Y, Wang L J, et al., 2010. Impact of Central Equatorial Pacific SSTA pattern on precipitation and temperature in East China in summer[J]. Trans Atmos Sci, 33(5): 547-554. (in Chinese).
- He J, Wu Z W, Jiang Z, et al., 2007. "Climate effect" of the northeast cold vortex and its influences on Meiyu[J]. Chin Sci Bull, 52(5): 671-679.

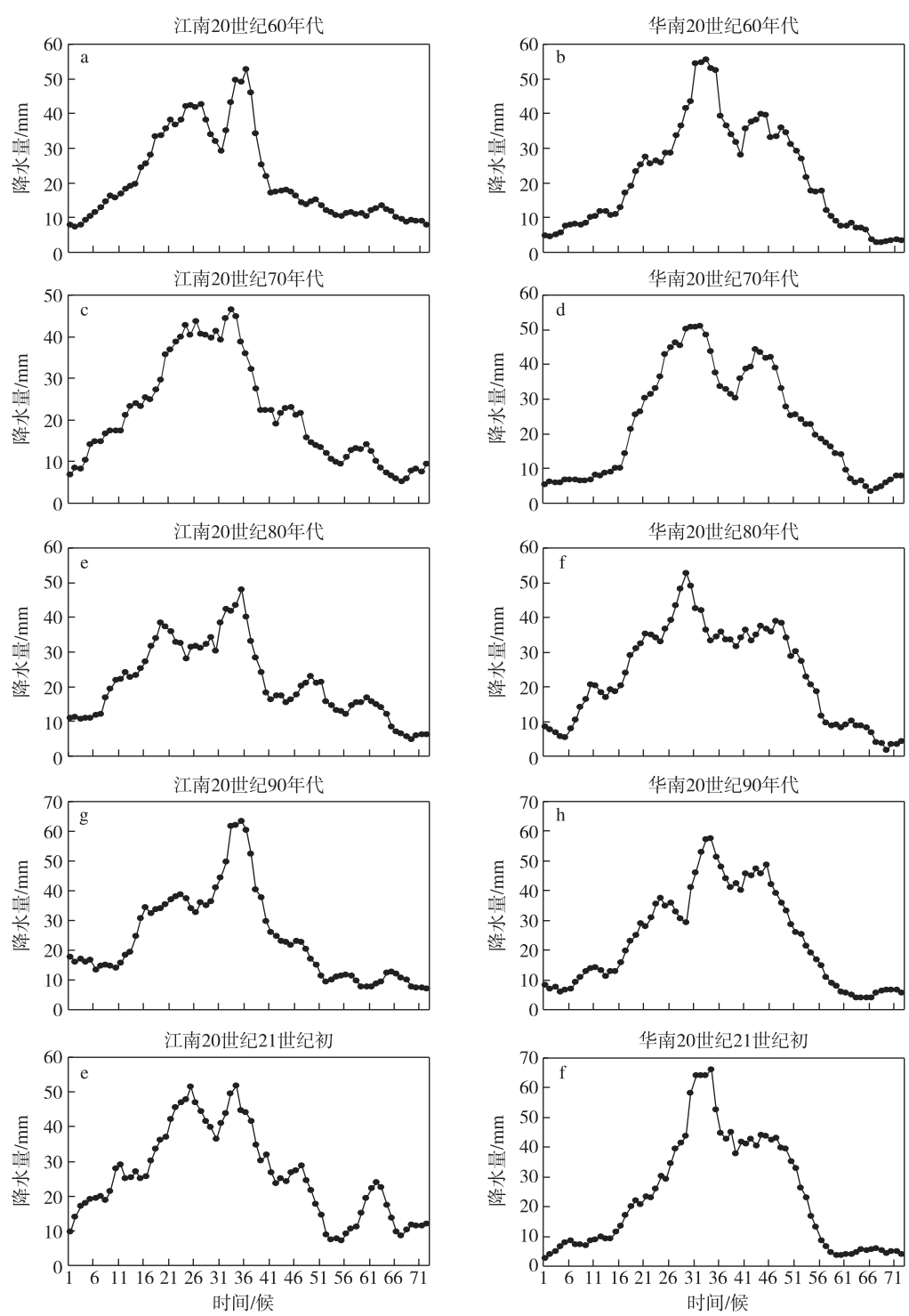


图 8 各年代江南(a,c,e,g,i)、华南(b,d,f,h,j)地区 5 d 滑动平均候降水变化曲线(单位:mm)
Fig.8 5-day moving average curves of pentad precipitation over (a,c,e,g,i) Jiangnan and (b,d,f,h,j) Huanan in each decade(units:mm)

何金海,智协飞,1995.中国东部地区降水季节内变化的季节锁相[J].热带气象学报,11(4):370-374. He J H,Zhi X F,1995.Seasonal phase-locked changes in the eastern part of China during the precipitation season[J].J Trop Meteorol,11(4):370-374.(in Chinese).

何金海,赵平,祝从文,等,2008.关于东亚副热带季风若干问题的讨论[J].气象学报,66(5):683-696. He J H,Zhao P,Zhu C W,et al.,2008. Discussions on the East Asian subtropical monsoon[J].Acta Meteorologica Sinica,66(5):683-696.(in Chinese).

Huang R H,Yin B Y,Liu A D,1992.Intraseasonal variability of East Asia summer monsoon and its association with the convection[C]//Proceeding of international workshop on climate variability.Beijing:China Meteorological Press.

- Lau K M, Chan P H, 1986. Aspects of the 40—50 day oscillation during the northern summer as inferred from outgoing longwave radiation [J]. *Mon Wea Rev*, 113(11): 1354-1367.
- 李江南, 王安宇, 蒙伟光, 等, 2002. 广东省前汛期和后汛期降水的气候特征 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 41(3): 91-94. Li J N, Wang A Y, Meng W G, et al., 2002. The climatological characteristics of precipitation of the pre-summer rainy reason and second rainy season in Guangdong Province [J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*, 41(3): 91-94. (in Chinese).
- 李丽平, 袁爱军, 2015. 热带太平洋海平面高度的年代际异常及其与中国东部夏季降水的关系 [J]. *大气科学学报*, 38(3): 371-378. Li L P, Yuan A J, 2015. Interdecadal anomaly of tropical Pacific sea surface height and its relationship with summer precipitation in eastern China [J]. *Trans Atmos Sci*, 38(3): 371-378. (in Chinese).
- 马慧, 陈桢华, 毛文书, 等, 2009. 华南前汛期降水异常及其环流特征分析 [J]. *热带气象学报*, 25(2): 89-96. Ma H, Chen Z H, Mao W S, et al., 2009. Analysis of precipitation in the annually first rainy period and general circulation in the south of China [J]. *J Trop Meteor*, 25(2): 89-96. (in Chinese).
- Tao S Y, Chen L X, 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]// *Monsoon Meteorology*. Oxford: Oxford University Press.
- 涂长望, 黄士松, 1944. 中国夏季风之进退 [J]. *气象学报*, 18(1): 1-20. Tu C W, Huang S S, 1944. The advance and retreat of Chinese summer monsoon [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 18(1): 1-20. (in Chinese).
- 王德瀚, 1981. 雨季划分及雨带变动的研究 [J]. *气象学报*, 32(9): 252-256. Wang D H, 1981. Research on the division of rainy season and the change of rain belt [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 32(9): 252-256. (in Chinese).
- 王遵娅, 丁一汇, 2008. 中国雨季的气候学特征 [J]. *大气科学*, 32(1): 1-13. Wang Z Y, Ding Y H, 2008. Climatic characteristics of rainy seasons in China [J]. *Chin J Atmos Sci*, 32(1): 1-13. (in Chinese).
- 吴晖, 1981. 我国特有的年双峰型雨带的天气气候浅析 [J]. *广西气象*(2): 14-18. Wu H, 1981. Analysis on the weather and climate of the bimodal rain belt in China [J]. *Journal of Guangxi Meteorology*(2): 14-18. (in Chinese).
- Wu Z W, Li J P, 2012. Modulation of the Tibetan Plateau snow cover on the ENSO teleconnections: From the East Asian summer monsoon perspective [J]. *J Climate*, 25(25): 2481-2489.
- Wu Z W, Li J, Jiang Z, et al., 2011. Predictable climate dynamics of abnormal East Asian winter monsoon: Once in a century snowstorms in 2007/2008 winter [J]. *Climate Dyn*, 37(7/8): 1661-1669.
- 竺可桢, 1934. 东南季风与中国之雨量 [J]. *地理学报*, 1(1): 1-27. Zhu K Z, 1934. Southeast monsoon and Chinses rainfall [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1(1): 1-27. (in Chinese).

Intraseasonal evolution of precipitation in the Jiangnan rainy season and its interannual and interdecadal variations

ZHAN Fengxing^{1,2}, ZHANG Kaimei³, HE Jinhai¹, ZHANG Yizhi⁴, SHANG Ke¹

¹Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KMLD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

²Jiangxi Provincial Meteorological Bureau, Nanchang 330096, China;

³Meteorological Service Center of Jiangxi Province, Nanchang 330096, China;

⁴Climate Center of Jiangxi Province, Nanchang 330096, China

In this study, the characteristics of intraseasonal evolution of precipitation in the rainy season of Jiangnan (24—30°N, 110—120°E) and its interannual and interdecadal variations are researched, using daily precipitation data for the period of 1961—2008, based on the analysis of climatic characteristics of precipitation over southeastern China. The results are as follows:

1) A significant twin-peak feature in the intraseasonal evolution of precipitation in Jiangnan is demonstrated, with mid-April and mid-June as the twin-peak periods. The peak precipitation first appears in Jiangnan in mid-to late April, then extends southward. Southern China reaches its peak precipitation period in early to mid-June, after which the heavy precipitation center moves northward, and Jiangnan experiences the second precipitation peak in mid-to late June. Meanwhile, the precipitation in the Jianghuai area (32—35°N) shows a single peak type. The first peak of the Jiangnan rainy season appears very early, and this is the first sign of the rainy season in eastern China.

The second peak is the performance of the main rain belt moving northward.

2) The correlation coefficient between the regional averaged twin-peak precipitation in Jiangnan and actual precipitation is 0.69, which indicates that the twin-peak precipitation shows the intraseasonal evolution features of the Jiangnan rainy season. The precipitation intensity of the Jiangnan rainy season mainly depends on the precipitation intensity of the bimodal peak in the rainy season (April—June), and this also shows that the twin-peak precipitation characteristics in the Jiangnan area can reflect the change characteristics of the actual precipitation.

3) The twin-peak precipitation of the Jiangnan rainy season displays significant interannual and interdecadal variations. The interannual periods are found every 2—3 years, and strong signals are mainly centered in the late 1960s to 1970s and mid-1980s to the beginning of the 21st century, while the interdecadal periods are shown every 8—10 years on the whole time domain, and their strong signals are centered in the early 1980s to late 1990s.

4) On the interdecadal scale, although the intraseasonal features of precipitation display a significant twin-peak precipitation pattern in the Jiangnan rainy season, the characteristics of the intraseasonal evolution also show skipped-significant features. A twin-peak precipitation pattern is notable in the 1960s, 1980s and the beginning of the 21st century, while in the 1970s and 1990s the twin-peak pattern is insignificant.

Jiangnan rainy season; twin-peak; intraseasonal variation; interdecadal variation

doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130625001

(责任编辑: 孙宁)