金华地区汛期降水集中度和集中期特征分析[1]

吴天贻[1] 周玉淑[2,3] 韩芙蓉[1]

1（金华市气象局，金华 321000）

2（中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴院重点实验室（LACS），北京 100029）

3（中国科学院大学，北京 100049)

摘 要 为探究金华地区汛期降水的非均匀分布特征及其变化趋势，本文利用逐日降水资料结合 ECMWF 再分析资料，运用改进的集中期和集中度算法分析了 1971～2020 年金华地区汛期降水在时间上的分布特征及演变趋势。结果表明金华地区汛期降水集中期首日在 6 月 13 日，与常年入梅时间吻合；金华地区总体上降水时间分布较均匀但年际变化大；降水集中度和集中期均存在准 18 a 周期。天气形势场上，降水集中年份最明显的异常为西太平洋副热带高压偏强偏西，以及菲律宾地区异常反气旋。菲律宾地区异常反气旋使初夏季节我国东部沿海西南气流水汽输送旺盛，并且造成西北太平洋副热带高压加强西伸，较强的副热带高压与西风槽之间的位势梯度可以增大西南暖湿气流的输送，减慢西风槽脊的移动，以形成较为稳定的环流配置，造成持续降水的出现，而在强的副热带高压继续西伸北抬后，西风带系统南下受阻，大型暖高压的下沉气流则会导致持续高温干旱酷暑天气，从而导致降水的异常集中。海温场上，降水异常集中年份前冬中东太平洋海温异常偏高，随后赤道中东太平洋海温差值逐渐转为显著的负异常，这种特征表明降水异常集中年份可能出现在厄尔尼诺的衰减阶段。

关键词 集中度 集中期 副热带高压 海温

文章编号 1006−9585（2014）02−0153−11 **中图分类号** P466

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2023.23080

0 引言

近 50 年来，中国区域的年总降水量虽无显著极端变化倾向，但降水过程强度有增加趋势（翟盘茂等，2003 年；丁一汇等，2007）。尤其 20 世纪 90 年代以来，大江大河流域强降水事件发生可见和时间趋于集中趋势，大范围严重旱涝事件出现频率显著增强，强降水事

收稿日期 2023-08-07，收修定稿 2023-11-22

作者介绍 吴天贻，女，1993 年出生，硕士研究生，主要从事强对流、暴雨和降水集中度研究，wutianyi2016@163.com。

件时空集中程度的变化可能是旱涝灾害加重的重要原因之一（白爱娟等，2010），且造成大范围洪涝的降水主要集中在汛期（张录军等，2004），金华地区地处欧亚大陆与西北太平洋的过渡地带，汛期降水受到东亚季风和登陆台风的影响，降水也主要集中在汛期（5-9 月），随着气候变化的加剧，降水量的年际变化大，季节内降水分配极不均匀。受季风气候和复杂水文地形的影响，金华流域汛期旱涝灾害频发，影响当地的经济发展和居民生命财产安全。

长期以来，人们多关注月、季或汛期降水的总量和强度，这样的分析和评估对描述气候尺度降水特征的客观状况较为清晰，但是在降水总量接近常年平均的情况下，很容易忽略降水集中导致的降水时空非均匀分布状况。因此，研究汛期降水的非均匀分布特征及其变化趋势，深化对金华地区汛期降水气候特征的认识，为金华地区汛期天气预报提供气候背景信息，具有重要的现实意义。

如何有效提取降水过程时空非均匀分布特征，是分析其集中程度演变规律的关键。在此方面已有一些研究结果，比如，Zhang 等（2003）将候降水看作矢量，利用向量分析的原理定义了区域降水量时间分配特征参数。王琳莉等（2006）在此基础上将不同时长的滑动统计值与汛期总雨量标准化后进行检验，得出研究汛期降水集中特征的最佳时长为 15 天。王皖等（2015）和 Li 等（2017）认为，不同强度降水过程非均匀分配特征及其累积效应难以得到很好的描述，并利用“信息熵”的概念将单位时间降水量处理成降水贡献率，消除降水总量的影响，构建降水集中程度指数。目前，也有很多学者利用降水集中指数对降水集中度和降水集中期进行了研究，如：姜爱军等（2005）发现在对大范围洪涝灾害研究方面，暴雨过程年内集中度和集中期在定量地表征降水量在时空场上的非均匀性时有更高分辨力。李远平等（2012）利用 M-K、小波分析等方法对淠河流域汛期降水集中度和集中期进行了时间上的变化分析。张天宇等（2007）运用降水集中度和集中期，讨论了我国华北地区多雨年和少雨年雨季降水在时间上和空间上的分布特征和变化规律。在此基础上，还有一些研究分析了降水集中程度与大气环流异常的关系。张录军和钱永甫（2004）研究了长江流域不同地段汛期降水集中度与东亚季风指数的相关性，表明东亚副热带地区经向风垂直切变强度增强，长江中下游地降水集中度就会明显增大。张恒星（2015）发现蒙古高压偏强、西太平洋副热带高压西伸是长三角地区降水较集中的大气环流背景。

为了明晰金华地区由降水集中造成的降水非均匀分布特点，本文引入降水集中度指数和集中期指数，分析近 50 年金华地区汛期降水的非均匀分布特征和变化趋势，对比多雨年和少雨年降水非均匀分布状况，并通过对降水特别集中年份和均匀分布年份的合成分析，寻找大气环流背景的差异。通过探讨金华地区汛期降水结构的变化特征，可以更好地认识区域内气候背景和水资源变化特征，为金华地区气象科学防灾减灾和水资源管理以及防洪抗灾提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资 料

本研究所使用的逐日降水资料来自金华、兰溪、义乌、东阳、永康、浦江、武义 7 个站

点（磐安国家站建站较晚，2007 年以后才有地面观测资料，因此统计时未选入）。研究时段为 1971～2020 年的 5～9 月。高度场、风场和海表温度资料取自欧洲中期数值预报中心 ECMWF 的第五代大气再分析全球气候数据集 ERA-5。

1.2 方 法

本研究对降水集中程度的度量使用了“信息熵”的概念，“信息熵”是指离散随机事件的出现概率。一个系统越是有序，信息熵就越低，反之，一个系统越是混乱，信息熵就越高，信息熵也可以说是系统有序化程度的一个度量。当变量的不确定性增大时，熵值也就增大，即认识变量所需要的信息量越大。降水为偏态分布，常规统计方法不适用直接分析，而熵具有不必考虑研究变量分布模态的优点，因此引入信息熵的概念（Li et al., 2017），可以利用研究时段内降水对降水总量的 Q 指数来表征降水集中度。

在单个降水事件的定义上，以往的研究主要采用直接以日为单位划分降水事件的方法。另一类则考虑了天气气候过程中降水事件的连续性，例如张录军等（2004）以日历候作为时间划分方法，以获得每个候降水量合成后的总体效应。此类方法运用到较长时段的气候研究上仍存在其局限性，日历候时段的划分不符合天气气候的内在规律。为避免日历时段选取方法的局限性，王琳莉等（2006）使用 15 日滑动统计的特征量，其与汛期总雨量有较好的相关的同时又能显著区别于汛期统计量。而且一般而言，大尺度的天气系统时间尺度在 3～15 天，一个连阴雨过程的时长在 3～5 天。也就是说 15 天的时长可以描述 1～2 个长波过程或 2～3 个连阴雨过程，基本上能概括每年汛期最集中、最强的 2～3 次降水过程，滑动统计又能排除人为干扰。此种方法能比较灵活真实地概括自然降水过程和集中时段，同时又简化了算法。

因此，本研究将以上金华地区 7 个站点的 1971～2020 年 5～9 月日降水资料对 15 天的时长进行滑动统计得到统计序列，再引入信息熵的概念，计算得到 50 年降水集中度序列，

$$Q_i = \sum_{j=1}^{N} \frac{1}{\ln N} \cdot \left[P_{ij} \cdot \ln P_{ij}\right] \qquad (1)$$

其中，N 为研究时段内 15 天滑动统计特征量的总数，i 为年份（i =1971，1972，…， 2020）；j 为以 j 为中心的 15 天滑动统计特征量的时序（j =1，2，…，139）。 $P_{ij} = I_{ij}/I_i$为第 i 年以 j 为中心的 15 天滑动统计特征量的降水贡献率。当 Q_i=1 时，代表降水集中在某一时段内。当 Q_i=0 时，代表降水均匀地分布在每一时段。Q 指数表示研究时段内逐日降水量对降水总量的集中程度，当 Q 值低（或接近 0）时，表示降水分散在更多的雨日内。若降水总量大（小），Q 值小表示更多的持续性降水过程，而降水总量大（小），Q 值大表示更多的强降水日。当 Q 值越高（或越接近 1），表示降水越集中在少数雨日内。

而对降水集中出现时期的研究则采用降水量年内分配的向量法，使用 Zhang 等（2003）提出的表征降水量年内分配形态的参数 P，首先将 15 日滑动统计特征降水量分解成水平和垂直方向上的两个分量，然后分别进行方向上的累加，降水集中期即合成向量的方位角，它

指示出 15 日降水量合成后的总体效应，也就是向量合成后重心所指示的角度，反映出一年中最大降水量出现在哪一时段。具体定义方法如下：

$$P_i = \arctan(R_{xi}/R_{yi}) \qquad (2)$$

$$R_{xi} = \sum_{j=1}^{N} r_{ij} * \sin\theta_j \,;\, R_{yi} = \sum_{j=1}^{N} r_{ij} * \cos\theta_j \qquad (3)$$

其中，r_{ij}为第 i 年第 j 个以 j 为中心的 15 天滑动统计降水量；θ_j为 j 对应的方位角（整个研究时段的方位角设为 360°）；R_i为第 i 年某站研究时段内总降水量，R_{xi}、R_{yi}分别为水平、垂直两个方向的分量之和；降水集中期P_i则以构成的合成量的水平与垂直分量比值的正切角度来表示。

本研究使用的方法有趋势分析、Morlet 小波分析、相关分析和合成分析等方法。

2 金华地区汛期降水集中度和集中期

2.1 集中期

金华地区的降水主要集中在汛期 5～9 月，以金华本站为例，常年汛期平均降水量 834 毫米，占全年总降水（1512.6 毫米）的 55%，而梅汛期又是汛期降水较为集中的阶段，受高空切变线和地面静止锋影响，常有大到暴雨或连续性暴雨出现，梅汛期常年累计降水量 313.2 毫米，占汛期总降水的 38%。

用向量法计算得到的金华地区平均集中期首日在 6 月 13 日，各县市差异不大，其中金华市集中期首日最早在 6 月 7 日，东阳市集中期首日最晚在 6 月 19 日（表 1）。而金华地区常年（1991～2020 年）入梅时间为 6 月 13 日，出梅时间 7 月 4 日。可见，金华地区各县市的降水集中期与常年平均梅雨期基本吻合。

而且，采用 15 日滑动统计特征量的向量法计算得到的金华地区平均降水集中期起始日与入梅日同为 6 月 13 日。可见， 15 日滑动统计特征量按其时长来说能够避免按固定日历时间划分降水集中期的缺陷，计算结果与经验上的降水最集中的时期即梅雨期相吻合，证明 15 日滑动统计特征量具备较好地描述金华地区降水过程的能力。

表 1　1971～2020 年金华各县市平均集中期

Tab. 1 Average concentration period of Jinhua from 1971 to 2020

站点	1971～2020 年平均集中期首日
东阳	6 月 19 日
金华	6 月 7 日
兰溪	6 月 10 日
浦江	6 月 15 日

武义	6 月 13 日
永康	6 月 18 日
义乌	6 月 13 日

图 1 为 1971～2020 年各县市降水集中期起始日。由图可见，7 县市集中期起始日在 6 月份分布地最为集中，占比 52%，即半数年份集中期起始日均在 6 月；其次是 5 月份，占比 30%；而分布在 7～9 月的仅占 18%。

此外还存在一些特征，20 世纪 90 年代和 21 世纪 10 年代逐年各县市集中期比较接近，并且起始日都分布在 5 月下旬到 6 月。而 20 世纪 70 年代末期至 80 年代初期和 21 世纪 00 年代中期，各县市集中期的分散程度较高，也即各县市的降水集中期比较分散，这些年份常有部分县市的集中期出现在 8 月和 9 月，如 1980 年和 2007 年。

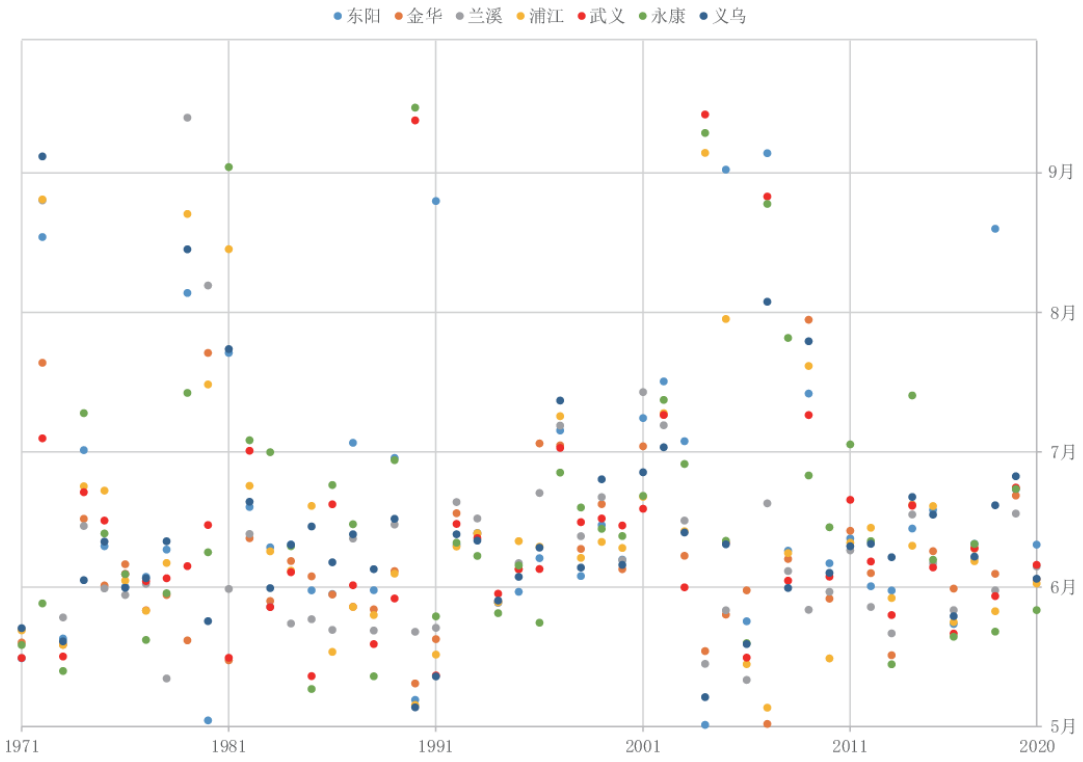

图 1 1971～2020 年各县市降水集中期起始日

Fig. 1 Initial date of precipitation concentration period from 1971 to 2020

2.2 集中度

2.2.1 集中度空间分布特征

王晓等（2015）使用降水集中程度方法讨论了中国夏季降水季节内非均匀特征和变化规律，发现夏季全国降水集中度在 0.33～0.40 之间，1961～2010 年多年平均值为 0.367，其中

东部地区总体集中度并不大。李慧等（2018）对华南地区夏季集中度指数及其线性趋势进行分析，得出华南大部份地区的集中度在 0.2～0.4 之间。

本研究使用此方法计算得到 1971～2020 年金华地区多年集中度平均值为 0.30 左右。其中兰溪（0.35）、金华（0.32）的均值较大，武义（0.26）、永康（0.27）的均值较小，说明从兰溪、金华的汛期降水集中程度要高于其他县市，而义乌、东阳和浦江的汛期降水分布相对较均匀。从地理分布上来看，降水集中度大的区域主要在西部，而集中度较小的区域则分布在南部，其余东部和北部的县市集中程度在中等水平。

表 2　1971～2020 年金华各县市平均集中度

Tab. 2　Average concentration in Jinhua from 1971 to 2020

	东阳	金华	兰溪	浦江	武义	永康	义乌
平均集中度	0.29	0.32	0.35	0.28	0.26	0.27	0.30

3.2.2 集中度年际变化和长期趋势特征

图 2 给出了 1971～2020 年逐年的金华地区平均汛期降水集中度和汛期总降水量及各自的线性趋势。金华地区平均汛期集中度在 0.12～0.60 之间，50 年平均值为 0.30。汛期总降水量在 447.5～1300.4 毫米之间，50 年平均值为 812.1 毫米。近 50a 来总降水量呈现增多的趋势，尤其是 21 世纪显著增多。而降水集中度呈现比较明显的阶段性变化，20 世纪 80 年代中前期集中度较小，在 20 世纪 90 年代集中度较大， 21 世纪 10 年代开始呈明显上升趋势。

分析汛期集中度与总降水量的关系表明，两者的趋势并非完全同步。20 世纪 80 年代中前期，汛期总降水量在平均水平附近，但降水集中度却很小，说明降水比较分散，汛期较为“风调雨顺”；而 20 世纪 90 年代中期，总降水量同样在平均水平附近，但降水集中度却很大，说明汛期降水的分布较集中，较易出现旱涝灾害。例如 1994 年是近 50a 来降水集中度最大的一年为 0.60，而该年的汛期总降水量 854.8 毫米，接近平均值。如果单从总降水量方面评估，1994 年汛期并非极端多雨的年份，但是该年却是金华地区历史上灾害最严重的年份之一，由于降水时段集中导致的洪涝灾害，造成金华地区 123.45 万人口受灾，损失达到 13.1573 亿元。而 1993 年平均汛期总降水量为 1164.6 毫米，为 50 年样本中排名第三的年份，但降水时间分布较为分散，降水集中度仅有 0.22，非连续性降水的致灾性不强，在金华地区气象灾情记录中也未见由于汛期总降水大而造成的灾害描述，显示该年并未因降水总量大而出现严重洪涝灾害。

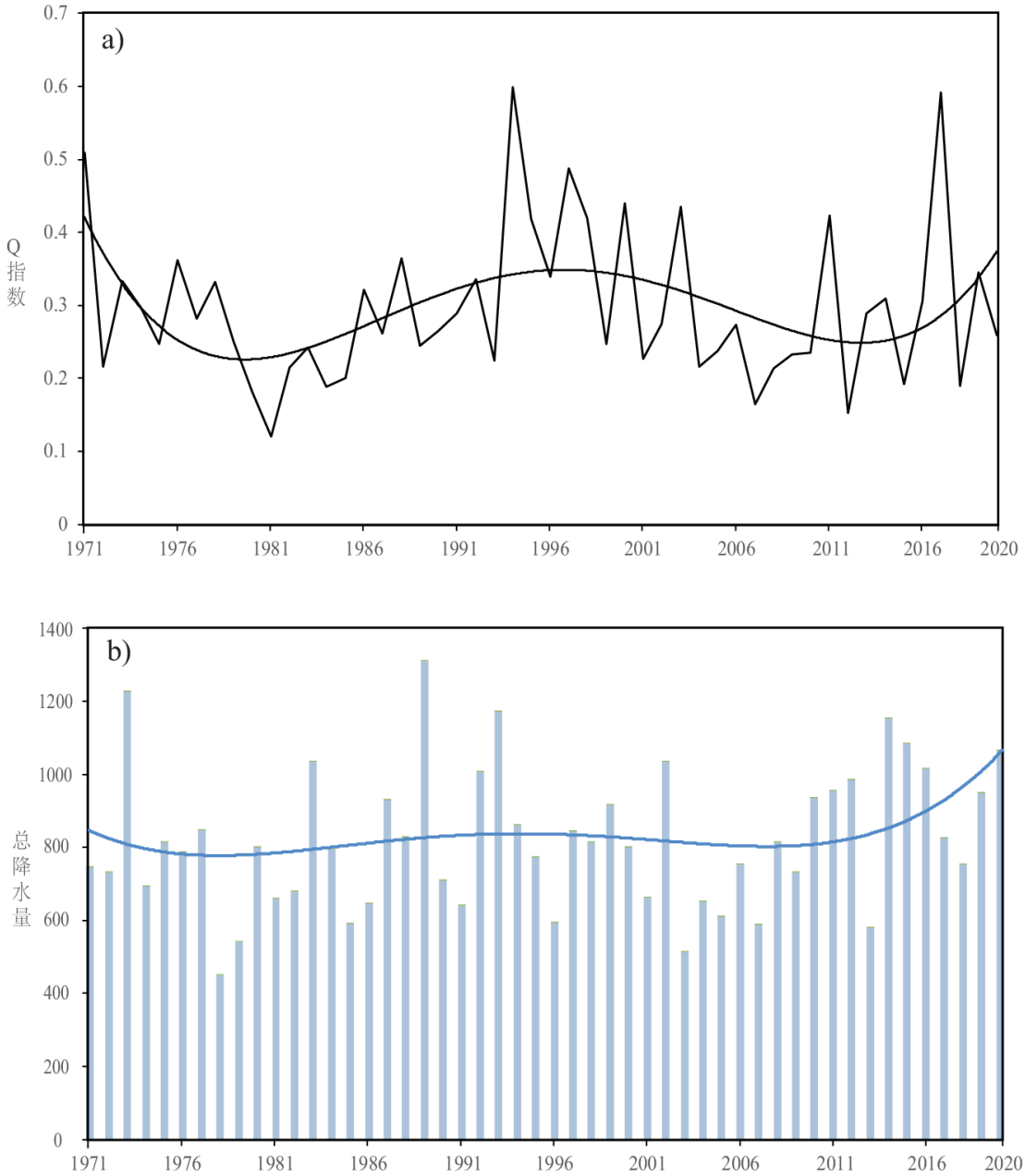

图 2 （a）1971～2020 年平均降水集中度年际变化（黑色折线）及其线性趋势（黑色曲线）和（b）汛期总降水量（蓝色柱状）及其线性趋势（蓝色曲线）

Fig. 2 (a) Interannual variation in average precipitation concentration from 1971 to 2020 (black line) and its linear trend (black curve) and (b) total precipitation in flood season (blue bar) and linear trend (blue curve)

此外，联系降水集中度和集中期还可以发现，各县市集中期比较分散的阶段，降水集中度基本处在较低的水平，如 20 世纪 70 年代末期至 80 年代初期和 21 世纪 00 年代中期，这些年份常有部分县市的集中期出现在 8、9 月份。而各县市集中期比较接近的年份，如 20 世纪 90 年代，集中期起始日都分布在 5 月下旬到 6 月，这些年份降水集中度较高。这说明

降水集中的年份，集中期基本分布在梅汛期阶段即 6 月份。

2.3 集中度和集中期周期分析

为了进一步研究金华地区近 50 年汛期降水集中度的周期变化特征，本文对金华地区 7 国家站集中度和集中期的时间序列进行了 Morlet 小波分析。

从汛期降水集中度的 Morlet 小波变换系数的实部图可见（图 3），降水集中度大致存在 18 a、12 a 和 6a 的显著周期，降水集中—分散交替震荡变化周期比较稳定。其中 18 a 周期信号最强，在整个时段（1971～2020 年）都比较显著，小波功率谱能量也主要集中在 18 a 这一波段为主周期。曹永强等（2013）对浙江省降水集中度的周期性变化进行分析，结果显示浙江省降水集中度在 20 年左右的周期振荡最强，与本研究结果也是相近的。

分析集中度准 18 a 周期变化可以发现，20 世纪 70 年代初、20 世纪 90 年代中期以及 21 世纪 10 年代末期，均为正值中心，说明这些时期汛期降水较集中。而 20 世纪 80 年代初期以及 21 世纪 00 年代中后期均表现为负值中心区，说明这些时期汛期降水较为分散，这与图 2a 结论相一致。2020 年处于 Morlet 小波变换系数的实部大值中心区，且等值线未闭合，预计金华地区汛期降水集中的情况还将持续。为验证这一预测，计算得到 2021 年金华地区汛期集中度为 0.20 低于 50 年平均值，这与 2021 年金华梅雨不典型，梅雨量偏少，以及影响台风较多有关，但 2022 年集中度为 0.52，位列 1971 年以来降水集中程度第三位。

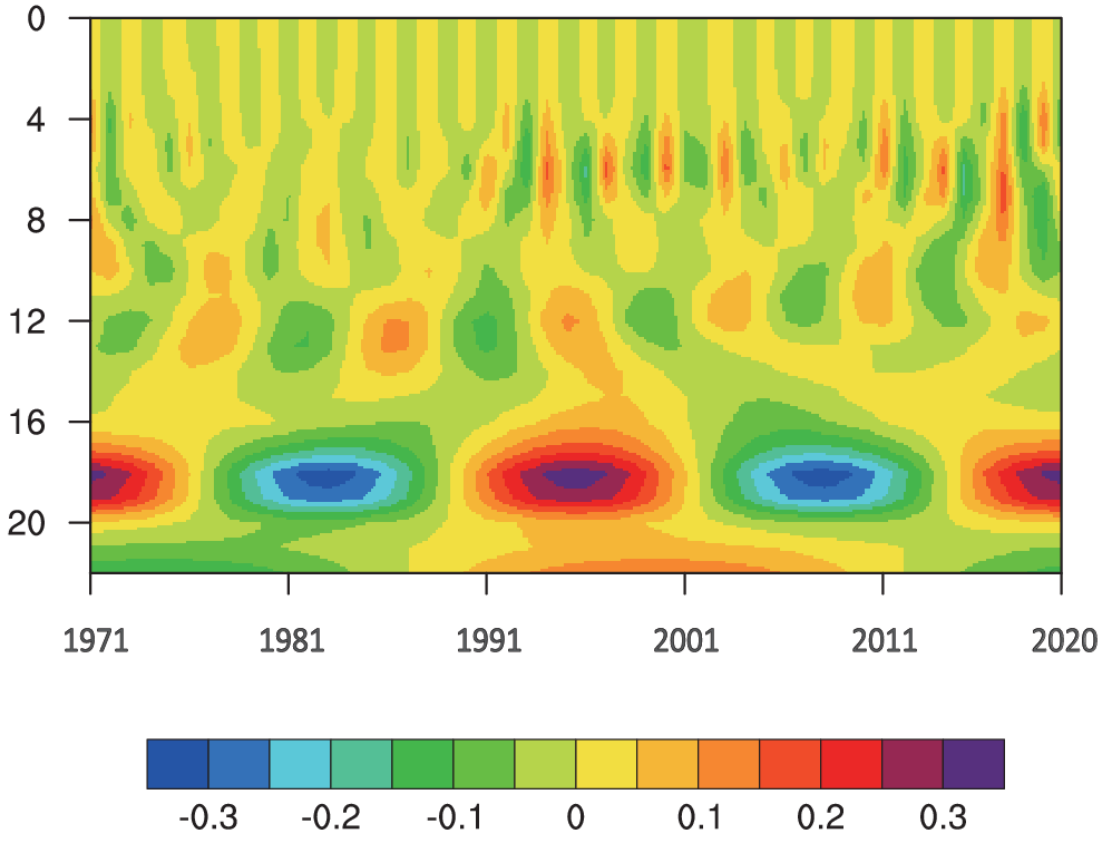

图 3 1971～2020 年平均降水集中度的 Morlet 小波分析实部图

Fig. 3 Real part of Morlet wavelet analysis of average precipitation concentration from 1971 to

2020

对金华地区 7 站点汛期降水集中期的时间序列同样进行 Morlet 小波分析。图 4 为集中期的 Morlet 小波变换系数的实部图，可见降水集中期同样存在 18 a 的显著周期，样本范围内集中期提前—推后交替震荡变化比较稳定，此外 21 世纪前还存在着 12 a 的显著周期。

分析集中期准 18 a 周期变化可以发现，20 世纪 70 年代中期、21 世纪 00 年代中前期均为正值中心，说明这些时期汛期降水集中期推后。而 20 世纪 80 年代末到 90 年代初以及 21 世纪 10 年代中期均表现为负值中心区，说明这些时期汛期降水集中期靠前，这与图 1 结论相一致。21 世纪 10 年代集中期进入偏早期，等值线基本在 2020 年附近闭合，预计接下来金华地区集中期将处于均值附近。为验证这一预测，计算得到 2021 年金华地区汛期集中期首日为 6 月 12 日，2022 年首日为 5 月 29 日，均接近平均降水集中期起始日 6 月 3 日。

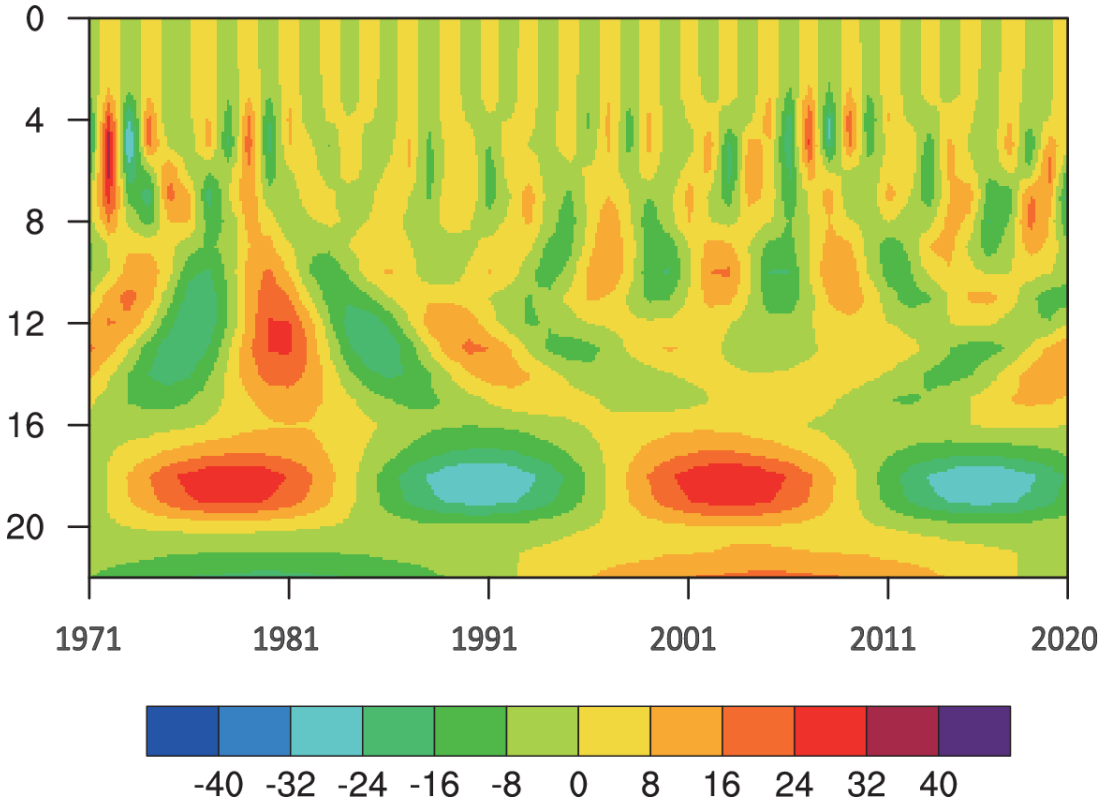

图 4 1971～2020 年平均降水集中期的 Morlet 小波分析实部图

Fig. 4 Real part of Morlet wavelet analysis for the average precipitation concentration period from 1971 to 2020

3 多雨年和少雨年汛期降水集中程度

通过对 1971～2020 年各站点降水集中度、集中期与汛期总降水的相关系数（图 5a）分析发现，集中度与总降水的相关性除东阳达到-0.20 以外其余县市均未超过 0.1，而且包括东阳在内的 7 站点均未通过信度 0.05 的显著性水平检验。各县市集中期与总降水的相关性也均较小，且未通过信度 0.05 的显著性水平检验（图 5b），说明金华地区降水集中度、集中

期与汛期总降水没有明显相关性。张恒星（2015）研究长江三角洲降水集中度和集中期时空变化特征时发现，除金华和个别站外，长江三角洲大部分地区集中度与雨季降水量均表现出较好的相关性；集中期与雨季降水量相关性全区均不太显著。这一结果与本研究得出的金华地区降水集中度、集中期与汛期总降水相关性差的结论基本一致。

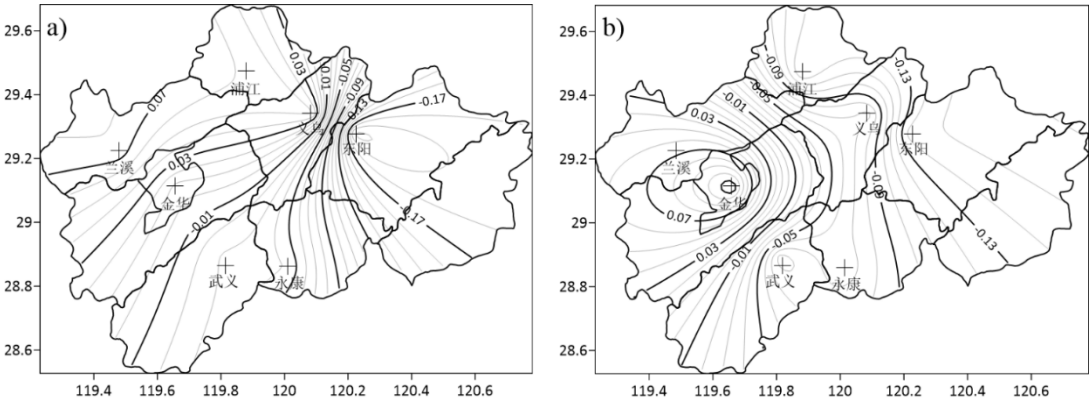

图 5　1971～2020 年 7 站点降水（a）集中度、（b）集中期与汛期总降水相关系数图

Fig. 5 Correlation coefficients of precipitation (a) concentration，(b) period of concentration and total precipitation during flood season at 7 stations from 1971 to 2020

此外，本研究还选取了金华地区 7 个站点汛期各自的总降水最多和最少 5 年的集中度和集中期分别进行合成。降水偏多年份降水距平百分率在 29.82%～90.48%，主要分布在 20 世纪 70 年代末期和 21 世纪 00 年代。降水偏少年份降水距平百分率在－25.24%～－50.75%，主要分布在 20 世纪 80 年代末到 90 年代初，以及 21 世纪 10 年代中期。

由图 6 可知金华地区汛期多雨年和少雨年的集中度在空间分布有相同和不同之处。不同之处在于多雨年的降水集中度呈现西高东低分布，少雨年的低值中心在浦江和义乌一带，高值中心在东阳。虽然集中度空间分布有差异，但是平均集中度差异并不大，多雨年平均集中度在 0.23～0.31，少雨年在 0.24～0.32。

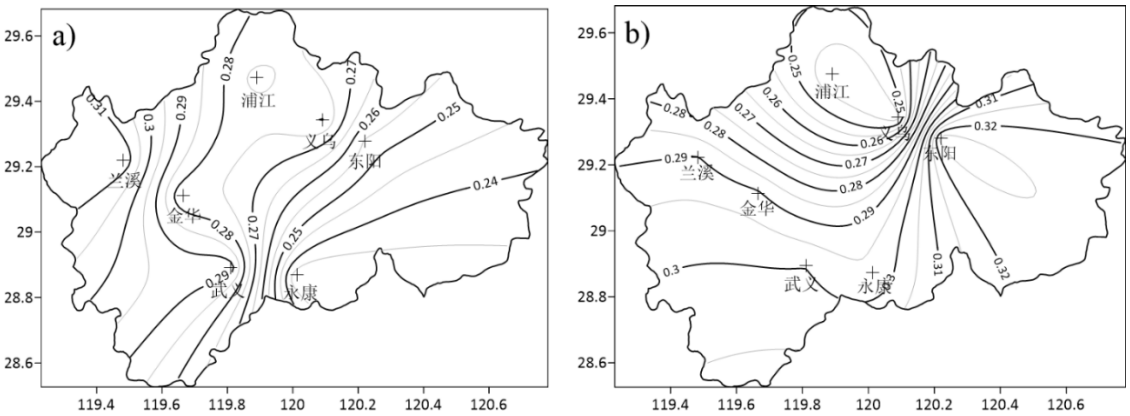

图 6　1971～2020 年 7 站点多雨年与少雨年平均集中度

Fig. 6 Average concentration of high water years and low water years at 7 stations from 1971 to 2020

多雨年集中期和少雨年集中期分布如图 7，多雨年 7 站点集中期前后差距仅 17 日，各站点集中期差距不大，不过少雨年集中期的离散程度比多雨年要明显，呈现西部早东部晚的分布，东西差距可达 50 天。虽然分布和离散程度不同，但多雨年和少雨年平均集中期首日分别为 6 月 12 日和 6 月 14 日，仅相差 2 天。

少雨年集中期的离散程度明显大于多雨年这一现象在图 1 中也有所体现，20 世纪 70 年代末期至 80 年代初期和 21 世纪 00 年代中期，各县市集中期的离散程度较高，而这些时段也是汛期总降水量较小的时段（图 2b）。出现这种差异的原因，可能是由于少雨年汛期梅汛期降水量较小，如台风等东风系统带来的降水占比重就会比较大，而一般金华东部地区受台风降水影响会比西部地区明显，因此少雨年东部地区的降水集中期会延后。多雨年通常梅汛期降水量较大，梅汛期的降水空间分布相较台风降水等会比较均匀，因此多雨年各县市集中期比较接近。

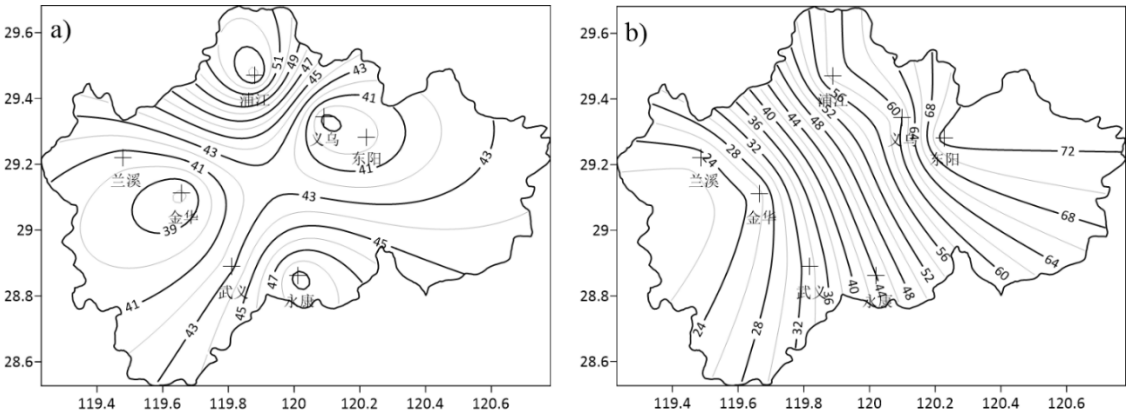

图 7 1971～2020 年 7 站点多雨年与少雨年平均集中期首日分布图

Fig. 7 Distribution of the first day of the average concentration period for watery years and less watery years at 7 stations from 1971 to 2020

以上结论说明，金华地区汛期降雨量的多寡与降水的集中程度之间不存在明显的线性关系，相关性不大。多雨年和少雨年均可能出现降水非常集中而导致旱涝灾害的情况，这更说明仅关注月、季或汛期降水的总量和强度会大大简化气候的客观状况，很容易忽略降水集中导致的降水时空非均匀分布情况。因此，研究汛期降水的非均匀分布特征及其变化趋势，丰富对金华地区汛期气候特征具有重要意义。

4 降水集中度异常偏强年份环流背景特征及其可能的原因

引起旱涝灾害发生的直接原因是由于汛期降水量异常变化及其时空分布的非均匀性，根本原因还是大气环流异常（Shi et al., 1996；蒋薇等，2009）。本研究分别选取了金华汛期降水集中度最大和最小的 10 个年份。其中集中度最大的年份为 1994、2017、1971、1997、2000、2003、2011、1998、1995、1988；降水集中度最小的年份为 1981、2012、2007、1980、1984、2018、2015、1985、2008、1982。首先对高值年和低值年逐月位势高度场特征进行合成分析。

图 8 给出了金华地区集中度高值年与低值年 500 hPa 位势高度场的合成图。由于向量

法计算得到的金华地区集中期首日在 6 月 13 日，集中期主要为 6 月中下旬，图 8a、b 显示了 6 月的合成高度场，图 8c、d 则选取了 8 月来表征汛期非集中期的合成高度场。

金华地区的降水集中阶段也即梅雨期，梅雨形势的主要特征系统为西太平洋副热带高压、西风带低槽、孟加拉湾低槽以及 50°N 以北的阻塞高压。对比图 8a 和 8b 可见，西太平洋副热带高压均呈带状分布，且脊线位置均在 20°N 附近，不过高指数年的副高西伸脊点相对低指数年偏西 10°E 左右。高指数年中高纬鄂霍茨克海均存在阻塞形势，为单阻型梅雨形势。低指数年鄂霍茨克海附近也有较明显的阻塞形势，此外乌拉尔山到贝加尔湖之间还存在一高压脊。说明不论集中程度的高低年，6 月基本为较稳定的梅雨形势。到了非降水集中阶段（图 8c、d），西风带系统位置相对金华偏北，副高脊线已经北抬至 30°附近，这恰好是金华地区的纬度，高指数年的副高 588 dagpm 等值线范围明显大于低指数年，西伸脊点也明显更靠近东部海岸，说明副高的范围和西伸程度对金华地区降水的集中与否有重要影响。

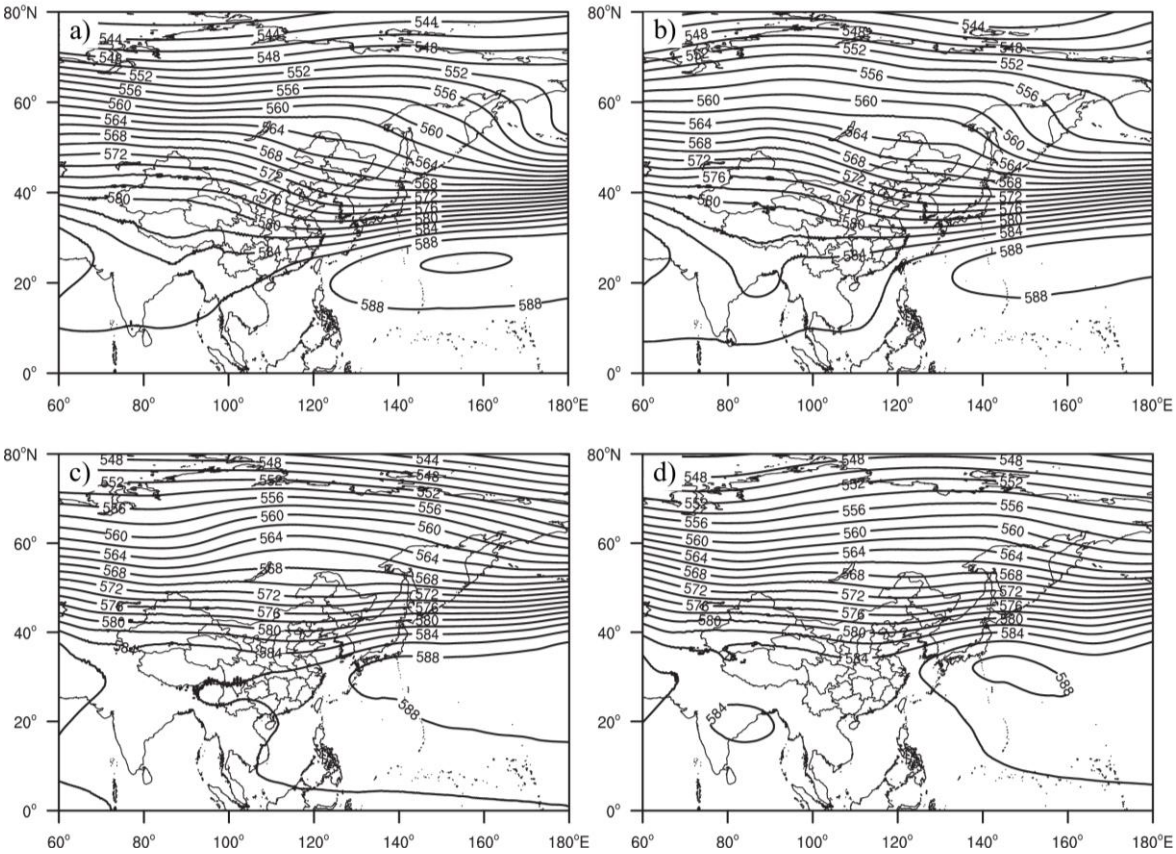

图 8 （a）高指数年 6 月 500hPa 合成高度场、（b）低指数年 6 月 500hPa 合成高度场、（c）高指数年 8 月 500hPa 合成高度场和（d）低指数年 8 月 500hPa 合成高度场

Fig. 8 (a) 500hPa synthetic height field in June of the high index year，(b) 500hPa synthetic height field in June of the index year，(c) 500hPa synthetic height field in August of the high index year and (d) 500hPa synthetic height field in August of the index year

为了更加直观地显示副高强度和位置的区别和变化，图 9 给出了高指数年与低指数年

4~10 月逐月的西太平洋副热带高压指数以及 1971~2020 年的气候平均态，包括副高强度和副高西伸脊点位置。

本研究的副高强度指数是在 10°N 以北 110°~180°E 范围内，500hPa 位势高度场上所有位势高度不小于 588 dagpm 的格点围成的面积与该格点高度值减去 578 dagpm 差值的乘积的总和。副高西伸脊点是在 90°~180°E 范围内，588 dagpm 最西格点所在的经度。若在 90°E 以西则统一计为 90°E；若在某月不存在 588 dagpm 等值线，则以该月的历史最小值替代。

由 1971~2020 年副高指数平均态可知，副高强度在 6 月以前稳定发展，6 月强度达到一个峰值，随后在盛夏季节 7~9 月副高强度存在较弱的波动变化，9 月以后开始减弱。1971~2020 年副高西伸脊点的位置则基本在 120°~130°E 范围波动。

进而对比高指数年和低指数年，发现高指数年各月副高强度均强于平均态，低指数年除 9 月与平均态很接近外均偏弱。高、低指数年之间的副高强度差异在 6 月降水集中期开始拉大，在 7~9 月继续维持较大的差距，其中 8 月强度指数差距最大。

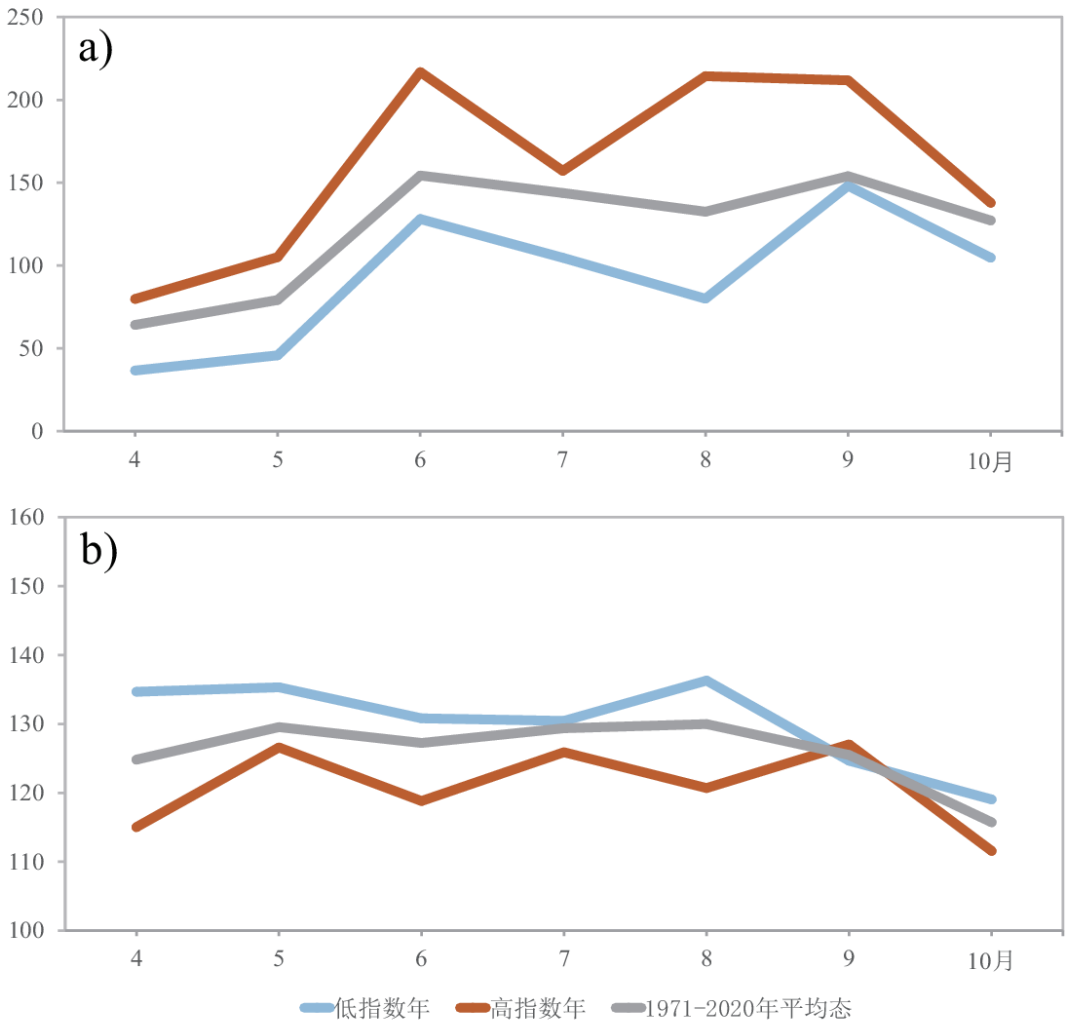

图 9　高指数年、低指数年以及 1971-2020 年平均 4-10 月逐月副高（a）强度和（b）西伸脊点

Fig. 9 High-index years，low-index years，and the 1971-2020 average April-October monthly (a)

intensity and (b) westward-expanding ridge points of subtropical high pressure

可见不管是降水集中期或是非集中阶段，形势场上最明显的不同都是西太平洋副热带高压的强度和位置。对于金华地区来说，灾害性天气尤其是特大暴雨和持续高温干旱酷暑天气等，这些异常天气气候事件均与副高活动有着密切的关系。由降水异常集中年份副高特征推测：在降水集中阶段，较强的副热带高压与西风槽之间的位势梯度可以增大西南暖湿气流的输送，减慢西风槽脊的移动，以形成较为稳定的环流配置，造成持续降水的出现。而降水非集中阶段，在强的副热带高压西伸控制下，西风带系统南下受阻，大型暖高压的下沉气流则会导致持续高温干旱酷暑天气。

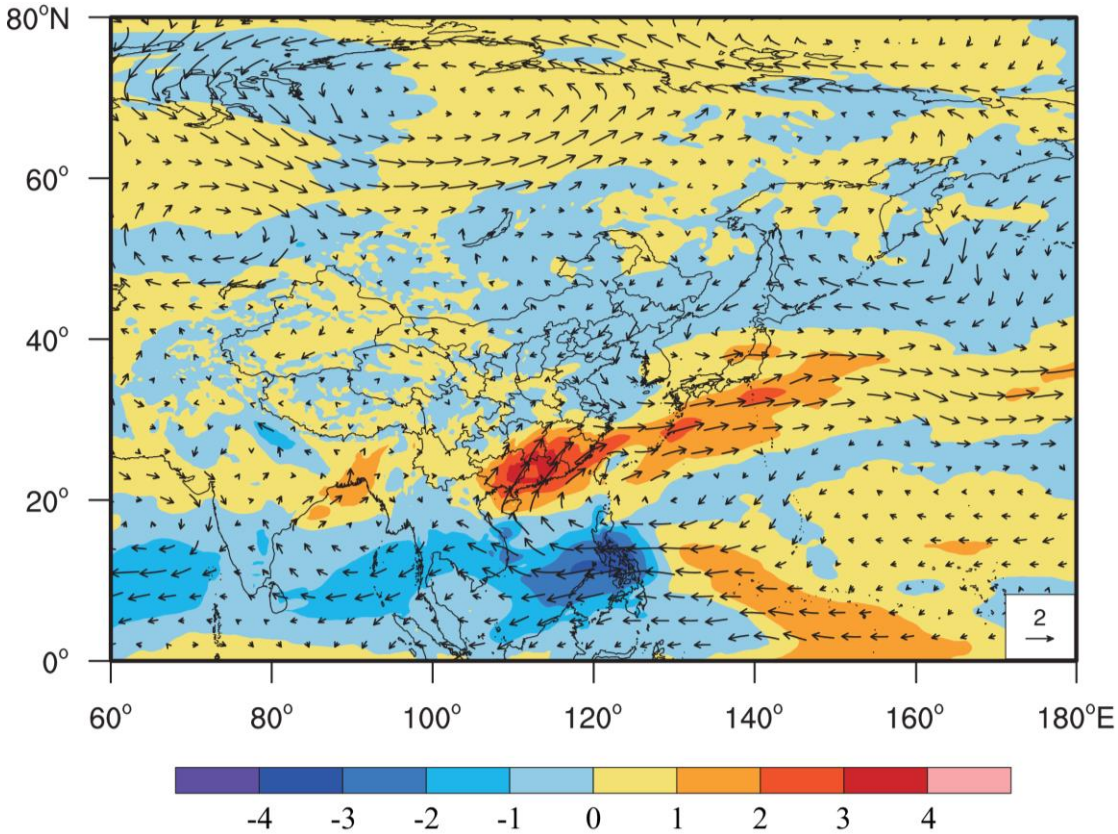

图 10　高指数年、低指数年降水集中期 850hPa 风场（箭头，单位：m·s^{-1}）和水汽通量（阴影，单位：g·cm^{-1}·hPa·s^{-1}）差值场

Fig. 10 Difference field of 850hPa wind field (arrows, in m·s^{-1}) and difference field of the water vapor flux (shaded, in g·cm^{-1}·hPa·s^{-1}) during the precipitation concentration period of high index year and low index year

此外，从降水集中期 850 hPa 风场和水汽通量差值场上（图 10），我国长江以北地区、朝鲜半岛、日本及以东洋面为一带状的气旋性异常环流控制，菲律宾附近地区为异常反气旋所控制，反气旋中心的位置在菲律宾以东，使得东亚沿海地区自南向北出现异常反气旋—气旋分布形势。这种分布形势造成长江流域出现异常的风场辐合，并且华东华南地区存在明显的水汽通量差值大值区。这表明菲律宾附近对流层低层的异常反气旋，有利于西南暖湿气流

向北输送到长江中下游地区，为降水的异常偏多提供水汽和能量条件。另有其他研究也表明菲律宾附近地区的异常反气旋环流将有利于西太平洋副高西伸和季风雨带在长江流域的维持（Zhang et al., 1996；Zhang et al., 2002）。

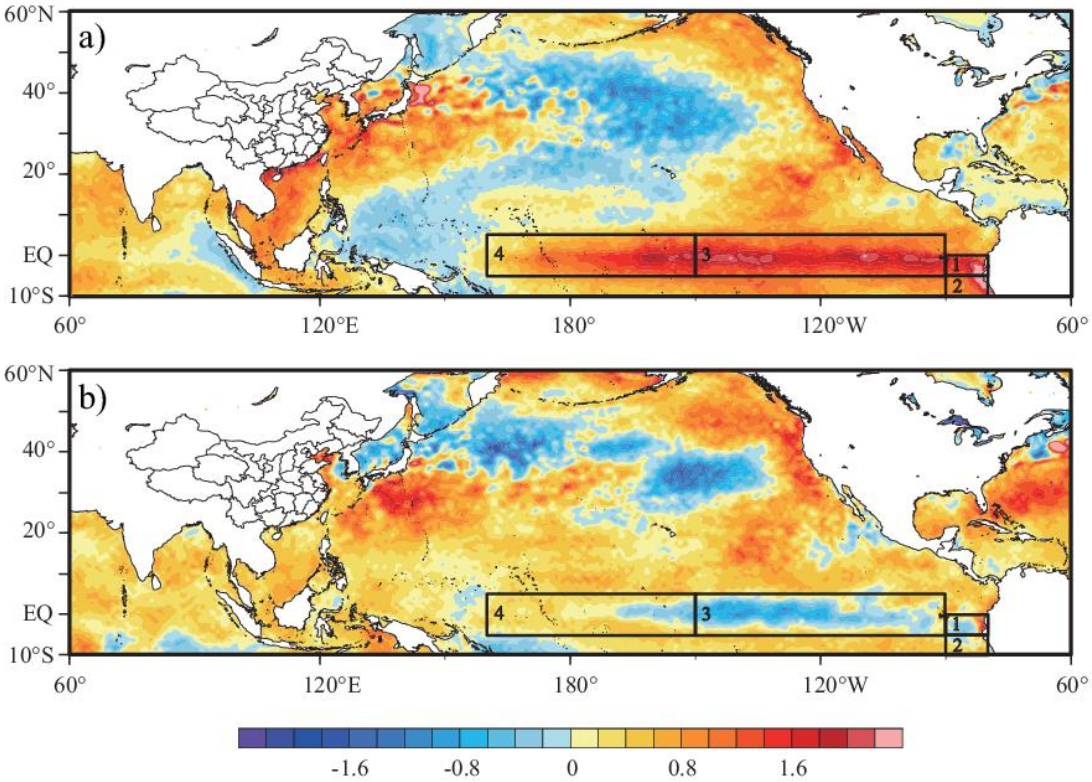

图 11　（a）降水集中期前期冬季（12-2 月）、（b）同期（6 月）高指数年、低指数年海温距平差值场，黑色边框为 NINO 海区

Fig. 11 High-index year and low-index year SST distance level difference fields during (a) Winter (December-February) in the pre-precipitation concentration period，(b) the same period (June)，with black borders in the NINO sea area

不少的研究表明，海温异常是影响中国旱涝年际变率的主要外强迫因子。其中，ENSO 作为年际气候变化的最强信号，虽然发生在热带，但往往会引起包括中国在内的全球许多地区的严重气候异常，造成严重旱涝和高低温等气象灾害（张人禾等，2004；Wang et al., 1999；李维京等，2016）。已有一些关于长江流域降水集中期的研究表明，厄尔尼诺可能对集中期降水异常或年际变化起到调制作用，并主要通过激发出菲律宾地区异常反气旋而产生影响（Zhang et al., 1996; 2002）。

为了深入探究影响金华地区降水集中程度年际变率的主要下垫面因子，本文继续分析了金华地区降水集中度与海温的关系，分别绘制了降水集中期前期冬季（12-2 月）和同期（6 月）集中度高指数年和低指数年的海温距平差值场（图 11），以及 5°N ~5°S 范围降水集中度高指数年和低指数年的逐月海温差值场（图 12）。

由图 11 可以看出，降水集中的年份前冬赤道中东太平海温显著高于降水分散的年份。

金华地区降水异常集中的情况对应的前冬全球海温分布特征主要为：赤道中东太平洋海温为显著的正异常，其中 NINO 综合区附近尤其表现为显著的正异常。而到了同期 6 月，赤道中东太平洋海温的正异常减弱，甚至 NINO1、3 区转为负异常。图 12 显示赤道中东太平洋海温差值从明显的正异常转为负异常。这可能意味着金华地区降水异常集中与厄尔尼诺的衰减，或是衰减的厄尔尼诺转为发展的拉尼娜造成的环流异常有关。

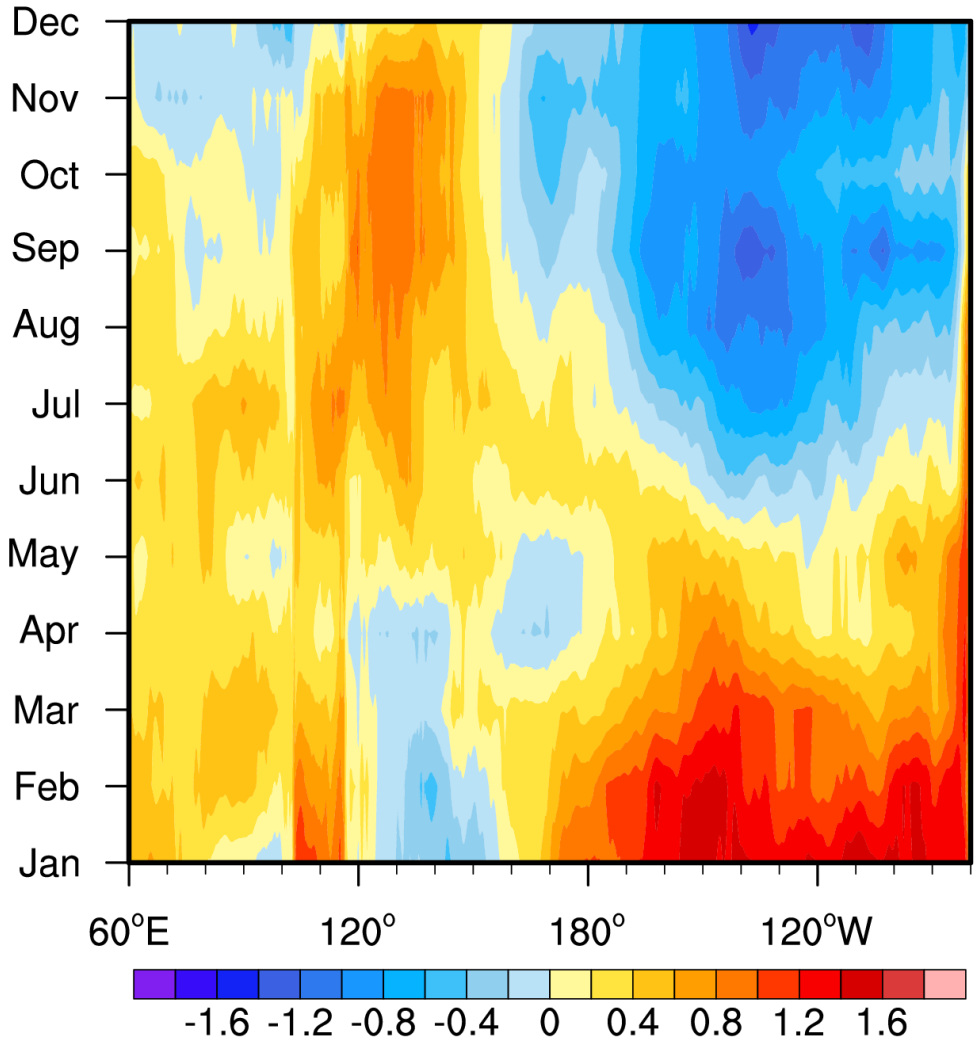

图 12　赤道 5°N ~5°S 范围降水集中度高指数年和低指数年的逐月海温差值场

Fig.12　Month-by-month SST difference fields for high and low index years of precipitation concentration in the equatorial 5°N ~ 5°S

研究表明，厄尔尼诺年一般来说赤道中东太平洋海温在春季左右开始增暖，到当年夏季时常常出现厄尔尼诺，其峰值基本上出现在当年年底左右，随后海温异常开始减弱，到次年夏季时厄尔尼诺往往消失，此时赤道中东太平洋只存在较弱的海温异常信号。本研究得出的中东太平洋海温异常变化趋势，恰好与之吻合。

那么降水异常集中年份前冬中东太平洋海温异常偏高，如何影响降水集中程度？目前已有的研究表明厄尔尼诺盛期时热带西太平洋对流异常减弱造成的冷却异常，激发出大气

Rossby 波响应，导致了菲律宾地区异常反气旋的产生，而热带西太平洋对流异常冷却的持续、西北太平洋局地海气相互作用以及热带印度洋和大西洋海温异常的持续等多种因子，导致了菲律宾地区异常反气旋从厄尔尼诺盛期的冬季持续到次年夏季，从而使初夏季节我国东部沿海西南气流水汽输送旺盛，并且造成西北太平洋副热带高压加强西伸。而菲律宾地区异常反气旋作为关键的环流要素也在图 10 中得到印证。但是，本文分析的中东太平洋海温异常变化趋势为多年合成结果，海温异常仅为导致降水集中程度的因素之一，其中的影响机制还有待进一步深入探讨。

5 结论

根据对 1971～2020 年金华地区 7 个国家站汛期逐日降水量的统计分析，得到以下结论。

（1）采用 15 日滑动统计特征量的向量法计算得到的金华地区降水集中期起始日与入梅日同为 6 月 13 日。金华地区平均集中度为 0.30，总体上降水时间分布较均匀，但年际变化大，从地理分布上来看，降水集中度大的区域主要在西部，而集中度较小的区域则分布在南部。

（2）汛期降水集中度和集中期存在着准 18 a 周期变化。2020 年处于集中度小波变换系数的实部大值中心区，且等值线未闭合，预计金华地区汛期降水集中的情况还将持续。

（3）集中度与汛期总降水量的趋势并非同步，且相关性不大，但少雨年各县市集中期的离散程度明显高于多雨年。少雨年梅汛期降水量较小，如台风等东风系统带来的降水占比重就会比较大，金华东部地区受台风降水影响会比西部地区明显，因此少雨年东部地区的降水集中期会延后，表现为各县市集中期的离散程度较高。多雨年通常梅汛期降水量较大，梅汛期的降水空间分布相较台风降水等会比较均匀，因此多雨年各县市集中期比较接近，离散程度低。

（4）形势场上降水集中年份最明显的异常为西太平洋副热带高压偏强偏西，以及菲律宾地区异常反气旋。海温场上降水异常集中年份前冬中东太平洋海温异常偏高，随后赤道中东太平洋海温差值逐渐转为显著的负异常，这种特征表明降水异常集中年份可能出现在厄尔尼诺的衰减阶段。

参考文献（References）

白爱娟, 刘晓东. 2010. 华东地区近 50 年降水量的变化特征及其与旱涝灾害的关系分析[J]. 热带气象学报, (2): 194-200. Bai A J, Liu X D. 2010. Characteristics of precipitation changes in East China over the past 50 years and their relationship with droughts and floods. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), (2): 194-200.

曹永强, 路璐, 张亭亭, 等. 2013. 基于降水集中度和集中期的浙江省降水时空变化特征分析[J]. 资源科学, 35(5): 1001-1006. Cao Y Q, Lu L, Zhang T T, et al. 2013. Spatio-Temporal Variation in Precipitation in Zhejiang Province Based on PCD and PCP. Resour Sci (in Chinese), 35(5): 1001-1006.

丁一汇，任国玉，赵宗慈. 2007. 中国气候变化的检测及预估[J]. 沙漠与绿洲气象, 1(1): 1-10. Ding Y H, Ren G Y, Zhao Z C. 2007. Detection, Attribution and Projection of Climate Change over China[J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 1(1): 1-10.

姜爱军，杜银，谢志清. 2005. 中国强降水过程时空集中度气候趋势[J]. 地理学报, 60(6): 1007-1014. Jiang A J, Du Y, Xie Z Q. 2005. Climatic Trends of Heavy Precipitation Spatial and Temporal Concentration in China[J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 60(6): 1007-1014.

蒋 薇，宋连春，王式功，等. 2009. 长江三角洲夏季降水异常及气候成因. 气象科学， (3): 355-361. Jiang W, Song L C, Wang S G, et al. 2009. Study on summer anomalies of precipitation and climatic causes in the Yangtze River Delta.Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), (3): 355-361.

李慧，周顺武，陆尔.2017. 1961-2010 年中国华南地区夏季降水结构变化分析[J]. 气候变化研究进展，2018, 14(3): 247-256. Li H, Zhou S W, Lu E, et al. 2017. Changes in the structure of summertime precipitation in South China during 1961-2010[J]. Climate Change Research (in Chinese), 14(3): 247-256.

Li H, Zhai P M, Lu E. 2017. Changes in temporal concentration property of summer precipitation in China during 1961-2010 based on a new index. J Meteorol Res-Prc, 31 (2): 336-349.

李维京，张若楠，孙丞虎，等. 2016. 中国南方旱涝年际年代际变化及成因研究进展[J]. 应用气象学报, 2016, 27(5): 577-591. Li W J, Zhang R N, Sun C H. 2016. Recent Research Advances on the Interannual-interdecadal Variations of Drought/Flood in South China and Associated Causes. J Appl Meteor Sci (in Chinese), 27(5): 577-591.

李远平，杨太保，马建国. 2012. 淠河流域汛期降水集中度和集中期的变化特征[J]. 资源科学，34(3): 28-33. Li Y P, Yang T B, Ma J G. 2012. Change Characteristics of Precipitation Concentration Degree (PCD) and Precipitation Concentration Period (PCP) in the Flood Season in Pi River Valley. Resour Sci (in Chinese), 34(3): 418-423.

Shi N, Zhu Q. 1996. An abrupt change in the intensity of the east asian summer monsoon index and its relationship with temperature and precipitation over east china. International Journal of Climatology. 16(7): 757-764.

Wang H J, Zhang H J, Zhang R H, et al. 1999. El Nino and the related phenomen on Southern Oscillation (ENSO): The largest signal in interannual climate variation[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 96: 11071–11072.

王琳莉，陈星. 2006. 一种新的汛期降水集中期划分方法[J]. 长江流域资源与环境, 15(3): 352-352. Wang L L, Chen X. 2006. A new method for dividing the precipitation concentration period during flood season. Resour Environ Yangtze Basin (in Chinese), 15(3): 352-352.

王晓，陆尔，赵玮. 2015. 一种新的反映我国降水季节内非均匀性特征的方法[J]. 热带气象学报，31(5): 655-66. Wang Y P, Lu E, Zhao W. 2015. A new method of reflect the intra-seasonal heterogeneity of the precipitation in China. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 31(5): 655-66.

翟盘茂，潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报, 58(增刊)：1-10. Zhai P M, Pan X H. 2003. Change in Extreme Temperature and Precipitation over Northern China During the Second Half of the 20th Century. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58(7s): 1-10.

张恒星．2015. 长江三角洲地区降水变化及其原因分析[D]. 南京信息工程大学硕士学位议论文，121pp. Zhang H X. 2015. Analysis of precipitation changes and their causes in the Yangtze River Delta region. Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese), 121pp.

Zhang L J, Qian Y F. 2003. Annual distribution features of precipitation in China and their annual variations[J]. Acta Meteorological Sinica, 17 (2): 146-163.

张录军, 钱永甫. 2004. 长江流域汛期降水集中程度和洪涝关系研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4) : 622-630. Zhang L J, Qian Y F. 2004. A study on the feature of precipitation concentration and its relation to flood-producing in the Yangtze River Valley of China. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 47(4): 622-630.

张天宇, 程炳岩, 王记芳. 2007. 华北雨季降水集中度和集中期的时空变化特征[J]. 高原气象, 26(4): 843-853. Zhang T Y, Cheng B Y, Wang J F. 2007. Temporal and Spatial Change Characteristics of Precipitation Concentration Degree(PCD) and Precipitation-Concentration Period(PCP) over North China in Rainy Reason. Plateau Meteorology (in Chinese), 26(4): 843-853.

Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon:A diagnostic study of the ‘86/87 and ‘91/92 events. J Meteorol Soc Jpn, 74: 49-62.

Zhang R H, Sumi A. 2002. Moisture circulation over East Asia during El Nino Episode in Northern winter, spring and autumn[J]. J Meteorol Soc Jpn, 80: 213-22.

张人禾, 李强. 2004. 热带海洋变异对东亚季风的影响[J]. 气象, 30: 22–26. Zhang R H, Li Q. Impact of Sea Temperature Variability of Tropical Oceans on East Asian Monsoon. Meteorological Monthly (in Chinese), 2004, 30: 22–26.

Characterization of precipitation concentration and concentration period during flood season in Jinhua

Wu Tianyi[1)] Zhou Yushu[2, 3)] Han Furong[1)]

[1)] (Jinhua Meteorological Bureau, Jinhua 321000)

[2)] (Key Laboratory of Cloud Precipitation Physics and Strong Storms (LACS), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

[3)] (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

In order to investigate the non-uniform distribution characteristics of the flood season precipitation and trend, this paper analyzes the temporal distribution characteristics and evolution trend of the flood season precipitation in Jinhua from 1971 to 2020 by using the dayily precipitation data combined with the ECMWF reanalysis data, and by applying the improved index of precipitation concentration and concentration period. The results show that the initial day of the precipitation concentration period during is on June 13, which coincides with the initial day of the monsoon season; Jinhua region generally has a relatively uniform temporal distribution of precipitation, but with large inter-annual variability; and There is a quasi 18-year cycle of precipitation concentration and period of concentration. In the SST field, the anomalously high SST in the east-central Pacific Ocean in the winter before the year of precipitation anomaly concentration, and then the SST difference in the east-central Pacific Ocean at the equator gradually turns into a significant negative anomaly, which suggests that the anomalously concentrated year of precipitation anomaly may occur in the decaying stage of El Niño. The most notable anomalies in the situation field are the strong and westerly subtropical high pressure in the western Pacific and the anomalous anticyclone in the Philippine region. Anomalous anticyclones in the Philippine region allow for strong moisture transport from the southwesterly flow along the eastern coast of China during the early summer season, an the same time causing the subtropical high pressure to strengthen and extend westward. The potential gradient between the stronger subtropical high pressure and the westerly trough can increase the transport of warm and humid air from the southwest and slow down the movement of the westerly trough ridge, in order to form a more stable circulation configuration, resulting in the emergence of sustained precipitation. And

after the strong subtropical high pressure continues to extend west and lift north, the westerly wind belt system southward is blocked, the large warm high pressure of the sinking air flow will lead to persistent high temperature and drought heat weather, which will lead to an abnormal concentration of precipitation.

Key words: concentration; concentration period; subtropical high pressure; SST