

DOI: 10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 03. 003

拉尼娜事件对长江中下游旱涝的影响

荣艳淑, 石丹丹, 吕星玥, 吴福婷

(淮海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究不同强度拉尼娜事件下长江中下游旱涝差异, 利用旋转经验正交函数方法, 将长江中下游划分为 4 个区(西北部、中部、南部和东部); 基于 MEI 指数, 提取了 1961—2014 年的拉尼娜事件, 并采用标准化降水蒸散指数来评估旱涝等级。结果表明: 不同强度的拉尼娜事件可对各分区的旱涝频率、强度和时空分布产生不同的影响。在强事件持续期, 一区易发严重干旱, 二到四区易发生严重洪涝; 在强事件结束后, 一区可出现轻度洪涝, 二到四区可出现中等以上干旱。在中等事件持续期, 一区洪涝的频率和强度略大, 二区到四区干旱的频率和强度略大; 在中等事件结束后, 一区洪涝的频率和强度非常大, 二区到四区干旱的频率和强度非常大。弱事件对旱涝影响较小, 且在南部和北部有反向变化特征, 南早北涝。旱涝频率、强度和分布差异与不同等级的拉尼娜事件影响水汽输送和垂直运动的强度有关。

关键词: 拉尼娜事件; 旱涝事件; 标准化降水蒸散指数; 旋转经验正交函数; 合成分析; 长江中下游
中图分类号: TV12; P426. 616 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004 - 6933 (2019) 03 - 0014 - 11

Influence of La Niña events on drought and flood in middle and lower reaches of Yangtze River // RONG Yanshu, SHI Dandan, LYU Xingyue, WU Futing (*College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: In order to study the difference of drought and flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River under different intensities of La Niña events, the research area were divided into four regions (northwest, central, south and east) by using the method of rotating empirical orthogonal function (REOF). Based on multivariate ENSO index (MEI), the La Niña events from 1961 to 2014 were extracted, and the standard precipitation evapotranspiration index (SPEI) was used to evaluate the drought and flood grades. The results show that different intensities of La Niña events have different influences on the frequency, intensity and spatial and temporal distribution of drought and flood in different regions. During the duration of strong events, severe drought is prone to occur in northwest region, and severe floods are prone to occur in other regions. After strong events, mild floods may occur in northwest region and moderate or more droughts may occur in other regions. During the duration of moderate events, the frequency and intensity of flood in northwest region are slightly higher than that of drought in other regions. After moderate events, the frequency and intensity of flood in northwest region are very large, and the frequency and intensity of drought in other regions are very large. Weak events have little influence on drought and flood, and have reverse change characteristics in south and north parts, while southern drought and northern flood. The reasons for the difference in frequency, intensity and distribution of drought and flood are related to the intensity of water vapor transport and vertical movement which are affected by different levels of La Niña events.

Key words: La Niña event; drought and flood events; standardized precipitation evapotranspiration index; rotated empirical orthogonal function; composite analysis; middle and lower reaches of Yangtze River

海气相互作用是全球气候异常的主要影响因子^[1-3], 可导致全球多地极端天气气候和极端水文事件发生^[4], 特别是 El Niño-Southern Oscillation

(ENSO) 现象, 已成为各地气候异常的强信号。2015—2016 年赤道东太平洋超强 ENSO 事件, 引发华南前汛期降水和长江中下游梅雨期降水显著增

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0601504); 国家自然科学基金(51420105014); 国家自然科学基金青年科学基金(41605043); 中央高校基本科研业务费专项(2017B00114)

作者简介: 荣艳淑(1961—), 女, 教授, 博士, 主要从事水文气象和气候变化研究。E-mail: ysrn@ hhu. edu. cn

多, 云南和世界多地高温干旱^[5-6]。2000—2011 年赤道东太平洋较强的拉尼娜事件, 造成美国 48 个州、欧洲中南部、非洲东部、中国华北、黄淮地区、长江中下游出现严重干旱^[7-8]。

ENSO 事件持续期长达半年到数年, 其发展期、成熟期和衰退期对各地气候有不同的影响。在 ENSO 成熟期, 我国北部和云南降水显著减少, 长江流域、内蒙古降水增多, 在 ENSO 衰退期, 云南夏季降水分布呈东多西少^[9-10]; 并且 ENSO 发生的次年, 我国绝大部分地区都出现降水显著偏多的现象^[11-12]。在拉尼娜的成熟期, 我国长江流域降水减少; 拉尼娜衰退期, 云南和陕西夏季降水显著偏少^[13]。拉尼娜发生年的秋冬季, 江南和华南等地区降水显著增多, 并且事件结束后的 8 个月, 对旱涝气候产生影响依然存在^[14-15]。长江中下游位于亚热带地区, 属季风气候, 是受海气相互作用影响非常显著的地区, 同时有着极高的生态经济地位, 有关 ENSO 事件对长江流域的影响也一直是研究的热点。众多研究表明, ENSO 事件对长江流域的影响非常强烈^[16-19]。但在长江上、中、下流域存在时间和空间上的差异^[20], 长江中下游受 ENSO 事件的影响明显强于长江上游, 不同等级的 ENSO 事件带来的气候影响也明显不同^[21-22]。

ENSO 事件通常发展迅速, 给各地气候带来很大的影响, 以往的研究也更多地关注 ENSO 事件, 却少有针对拉尼娜事件的研究。有关长江中下游旱涝急转事件的研究发现, 夏季旱涝急转事件发生频率空间分布不均, 并且在发生时间上与拉尼娜事件有一定的关系, 近一半的旱涝急转事件都发生在拉尼娜现象衰亡期或事件结束后 8 个月内^[15]。本文针对拉尼娜现象, 讨论不同等级的事件对长江中下游地区旱涝频率和强度的影响, 以期对长江中下游旱涝形势预测预报和防汛抗旱工作提供科学依据。

1 资料来源和研究方法

1.1 资料来源

使用的数据包括气象站点的观测数据、MEI (multivariate ENSO index) 指数和 NCAR/NCEP 的再分析数据。数据起止时间为 1961—2014 年。气象站点数据是长江中下游流域 70 个气象站点 (图 1) 的逐月气温及降水资料, 该数据由中国气象局气象信息中心提供, 对部分站点缺测的年月数据进行插补处理, 以保证数据的连续性。

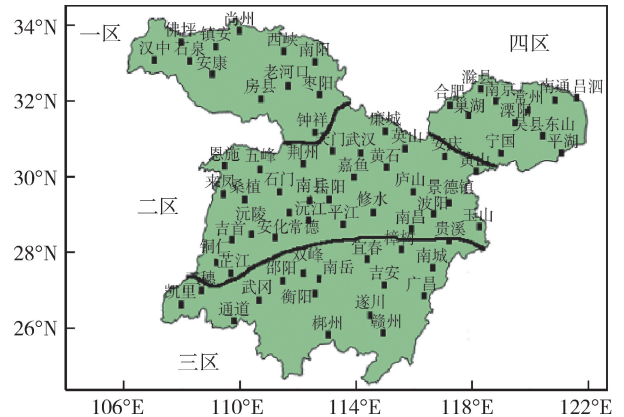


图 1 长江中下游流域位置分区及 70 个气象站点分布

MEI 指数是基于海平面气压、纬向风分量、经向风分量、海平面温度、海表气温以及云量而构建的综合性 ENSO 指标^[23-24]。MEI 指数有两种数据类型: 一是原值, 二是标准化数值。本文采用的是标准化数值, 以 0.5 为临界值, 判定连续 5 个月 MEI 指数 $I_{ME} \leq -0.5$ 为 1 次拉尼娜事件, 共提取出 12 次拉尼娜事件 (表 1)。有些拉尼娜事件虽然峰值强度不是很高, 但持续时间很长, 同样会产生很大影响, 采用峰值强度作为事件强度不能很好地反映此类事件的影响。所以本研究对每个事件选取了 3 个特征值: 极端值、平均值和持续月数, 构建综合值以判断事件强度。12 次事件的平均长度为 14 个月, 权重设为

表 1 1961—2014 拉尼娜事件

| 序号 | 起止时间 | 峰值时间 | 持续时间/月 | 极端值 | 平均值 | 综合值 | 强度等级 |
|----|-------------------------|-------------|--------|--------|--------|-------|------|
| 1 | 1961 年 12 月至 1963 年 4 月 | 1962 年 1 月 | 17 | -1.093 | -0.724 | 2.480 | 中等 |
| 2 | 1964 年 4 月至 1965 年 1 月 | 1964 年 8 月 | 10 | -1.500 | -1.102 | 2.050 | 中等 |
| 3 | 1967 年 2 月至 1968 年 7 月 | 1968 年 5 月 | 18 | -1.097 | -0.682 | 2.443 | 中等 |
| 4 | 1970 年 6 月至 1972 年 1 月 | 1971 年 4 月 | 20 | -1.896 | -1.261 | 3.247 | 强 |
| 5 | 1973 年 6 月至 1976 年 4 月 | 1975 年 10 月 | 35 | -2.000 | -1.295 | 4.877 | 强 |
| 6 | 1984 年 12 月至 1985 年 5 月 | 1985 年 3 月 | 6 | -0.737 | -0.619 | 1.192 | 弱 |
| 7 | 1988 年 6 月至 1989 年 4 月 | 1988 年 9 月 | 11 | -1.574 | -1.211 | 2.299 | 中等 |
| 8 | 1998 年 9 月至 2000 年 4 月 | 2000 年 2 月 | 20 | -1.246 | -0.943 | 2.853 | 强 |
| 9 | 2007 年 9 月至 2008 年 4 月 | 2008 年 3 月 | 8 | -1.635 | -1.202 | 2.012 | 中等 |
| 10 | 2008 年 9 月至 2009 年 3 月 | 2008 年 12 月 | 7 | -0.770 | -0.696 | 1.348 | 弱 |
| 11 | 2010 年 7 月至 2011 年 4 月 | 2010 年 10 月 | 10 | -2.019 | -1.641 | 2.590 | 强 |
| 12 | 2011 年 9 月至 2012 年 2 月 | 2012 年 1 月 | 6 | -1.049 | -0.902 | 1.456 | 弱 |

0.1 时,持续月数的值与平均值和极端值的大小相当,较为合理。由于极端值仅是个别月份达到的指标,平均强度和持续月数是整个过程的指标,因此,取平均强度的权重为 0.6,极端值的权重为 0.3,将特征参数按权重累加求和,得到综合 MEI 值(I_{MEI})。综合 MEI 值的等级划分见表 2。根据表 2 划分 1961—2014 年出现的 12 次拉尼娜事件强度,这种划分方法充分考虑了长历时事件的影响,与其他学者的等级划分结果在长历时事件上有所差异,但整体相近^[25-26]。

NCAR/NCEP 的再分析数据包括降水、气温、风矢量、比湿、垂直速度等多层要素,其中降水数据的水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,其余数据水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)是 Vicente-Serrano 等^[27]提出的干旱评价指标。SPEI 指数值(I_{SPEI})需要输入月平均气温、月降水量,通过计算月降水与潜在蒸散量的差值并进行正态标准化处理得到,其旱涝等级划分见表 2。

表 2 综合 MEI 值和 SPEI 等级划分

| 等级 | I_{MEI} | | I_{SPEI} | |
|----|------------|-------------|------------|-------------|
| | 厄尔尼诺 | 拉尼娜 | 湿润 | 干旱 |
| 弱 | < 2.0 | > -2.0 | [0.5,1.0) | (-1.0,-0.5] |
| 中等 | [2.0,2.5) | (-2.5,-2.0] | [1.0,1.5) | (-1.5,-1.0] |
| 强 | ≥ 2.5 | ≤ -2.5 | [1.5,2.0) | (-2.0,-1.5] |
| 极端 | | | [2.0,2.5) | (-2.5,-2.0] |

1.2 研究方法

选取旋转经验正交函数(rotated empirical orthogonal function, REOF)和合成分析方法作为研究方法。经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)是目前应用非常广泛的一种气象要素场分析方法,其基本原理是对包含多个空间点的场随时间变化进行分解,得到的前几个特征向量可以最大限度地表征原变量场整个区域的变率结构,但不能清晰表现局域相关特征。 EOF 是在传统 EOF 的基础上再做旋转,克服了传统 EOF 方法的局限性。旋转后的典型空间分布结构清晰,可以较好地表现局域变化和分布状况,因此很多学者采用这种方法进行区域划分^[28-31]。根据研究时段内长江中下游 70 个站点的 SPEI 值,采用最大方差正交旋转法进行 REOF 分析,在此基础上,对长江中下游进行分区,划分出旱涝响应较为一致的区域,从而进一步研究不同分区对拉尼娜事件的响应特征。合成分析法可以突出研究对象的综合特性。将拉尼娜事件发生年记为 Year-0,事件发生的次年和第二年分

别记为 Year-1 和 Year-2。对长江中下游各分区在不同等级拉尼娜事件下 Year-0、Year-1 和 Year-2 的 SPEI 指标进行合成,可以突出事件中旱涝转变的特性,以分析不同区域旱涝响应的时空变化特征。

2 结果与讨论

2.1 长江中下游分区

对长江中下游 70 个站点的 SPEI 值做 REOF 展开。前 4 个模态(EOF1、 EOF2、 EOF3、 EOF4)的方差贡献率分别为 22%、17%、14%、12%,其累积方差贡献率分别为 22%、39%、53%、65%。图 2 为 4 个主要模态荷载的空间分布。前 4 个模态的方差贡献率均在 10% 以上,其累积方差贡献率达到了 65%,4 个模态的高荷载区基本布满全区。故根据 4 个荷载场的空间分布特征,将长江中下游分为 4 个区域,并根据地理位置对遗漏和重复的站点进行处理,划分到合理区域。长江中下游气象站点的划分结果见表 3,各区的边界见图 1。

2.2 拉尼娜事件对长江中下游旱涝的影响

为了细化长江中下游不同分区对拉尼娜事件的响应差异,按照表 2 中拉尼娜事件的强弱等级分别进行分析。由于拉尼娜事件结束之后仍能对气候产生影响,因此,在分析拉尼娜事件影响时,取事件开始月到事件结束月,再加上结束之后的 8 个月,视之为拉尼娜影响时段。

2.2.1 强拉尼娜事件的影响

1961—2014 年一共出现了 4 次强拉尼娜事件。按照拉尼娜影响时段,将长江中下游 4 个分区的 SPEI 值提取出来,绘制综合 MEI 值与 SPEI 值的散点图(图 3)。按拉尼娜事件持续期和事件结束后两个时段进行统计,可以得到旱月、涝月和正常月的数量见表 4。

结合图 3 和表 4 可以发现,在强拉尼娜事件影响的两个时段,4 个分区的洪涝和干旱月份分布存在着规律。如果只比较旱涝的月数,可以发现,在强拉尼娜事件持续期中,洪涝出现的月份更多,而事件结束后,干旱出现的月份更多。以二区为例,事件持续期,出现 55 个洪涝月份,10 个干旱月份,而正常月份仅为 20 个。在事件结束后,没有出现洪涝,出现 15 个干旱月份,13 个正常月份。这种现象表明了强拉尼娜事件对长江中下游影响在时间尺度上有一个明显的由涝转旱的过程。同时,也可发现 4 个分区的 SPEI 值对强拉尼娜事件响应的程度存在差异:在一区,虽然干旱事件在数量上不占优势,但干旱等级较高,出现了 2 个极旱和 2 个重旱月份,反观洪涝等级均为轻涝;在二、三、四区,洪涝月份在次数

荷载 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9

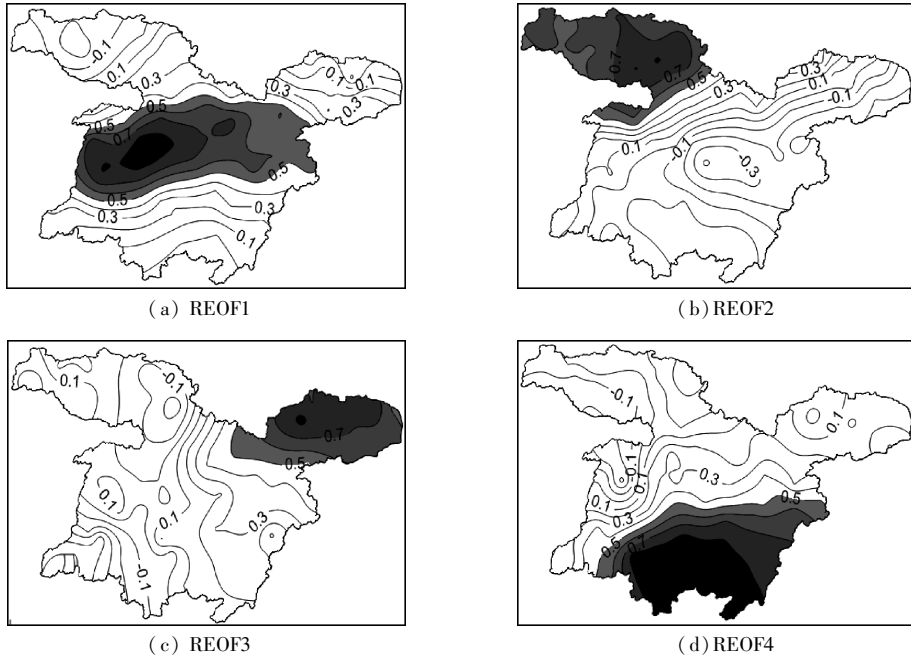


图2 REOF前4个主要模态荷载的空间分布

表3 长江中下游各分区包含的气象站点

| 分区 | 模态 | 站数/个 | 站名 |
|----|-------|------|--|
| 一区 | REOF2 | 12 | 汉中、佛坪、尚州、镇安、西峡、南阳、石泉、安康、房县、老河口、枣阳、钟祥 |
| 二区 | REOF1 | 30 | 麻城、恩施、五峰、荆州、天门、武汉、来凤、桑植、石门、南县、嘉鱼、岳阳、修水、吉首、沅陵、常德、安化、沅江、平江、铜仁、芷江、黄石、庐山、波阳、景德镇、南昌、玉山、英山、安庆、黄山 |
| 三区 | REOF4 | 17 | 邵阳、双峰、南岳、宜春、吉安、凯里、三穗、通道、武冈、衡阳、遂州、郴州、赣州、樟树、贵溪、南城、广昌 |
| 四区 | REOF3 | 11 | 滁县、南京、南通、吕泗、合肥、巢湖、常州、溧阳、吴县东山、宁国、平湖 |

表4 强拉尼娜事件4个区域旱涝月份统计

| 分区 | 事件持续期 | | | 事件结束后 | | | 总数 | | |
|----|-------|----|----|-------|----|----|----|----|----|
| | 洪涝 | 正常 | 干旱 | 洪涝 | 正常 | 干旱 | 洪涝 | 正常 | 干旱 |
| 一区 | 17 | 55 | 13 | 9 | 13 | 6 | 26 | 68 | 19 |
| 二区 | 55 | 20 | 10 | 0 | 13 | 15 | 55 | 33 | 25 |
| 三区 | 46 | 22 | 17 | 3 | 13 | 12 | 49 | 35 | 29 |
| 四区 | 34 | 37 | 14 | 4 | 17 | 7 | 38 | 54 | 21 |

和等级均强于多于干旱月份。这表明,长江中下游地区旱涝对拉尼娜事件响应存在明显的区域特征。为进一步分析长江中下游各区旱涝对拉尼娜事件时间尺度响应上的特征变化,对同等级的拉尼娜事件 Year-0、Year-1 和 Year-2 的 SPEI 值进行合成分析。图4为4次强拉尼娜事件中长江中下游各区 SPEI 值和综合 MEI 值均值随时间的变化情况,横坐标为事件发生 Year-0、Year-1、Year-2 的月份。强拉尼娜事件持续期较长,平均持续 21 个月。由图4可见,在强拉尼娜事件的 Year-0,长江中下游地区偏涝,其中二区和三区程度最重;在强拉尼娜的 Year-1(也可称为拉尼娜减弱期)夏季,二区正常,其他区域出现轻旱;在强拉尼娜事件的 Year-2,三区和四区出现轻

涝,一区和二区正常。

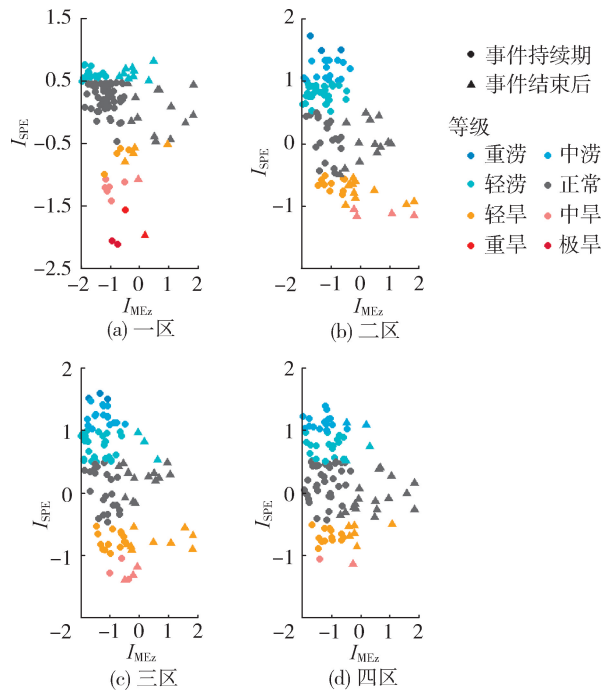


图3 强拉尼娜事件影响时段综合 MEI 值与4个区域 SPEI 值

表5 中等拉尼娜事件4个区域旱涝月份统计

| 分区 | 事件持续期 | | | 事件结束后 | | | 总数 | | |
|----|-------|----|----|-------|----|----|----|----|----|
| | 洪涝 | 正常 | 干旱 | 洪涝 | 正常 | 干旱 | 洪涝 | 正常 | 干旱 |
| 一区 | 17 | 35 | 12 | 30 | 4 | 2 | 47 | 39 | 14 |
| 二区 | 7 | 41 | 16 | 4 | 18 | 14 | 11 | 59 | 30 |
| 三区 | 14 | 35 | 15 | 4 | 12 | 20 | 18 | 47 | 35 |
| 四区 | 12 | 17 | 35 | 9 | 11 | 16 | 21 | 28 | 51 |

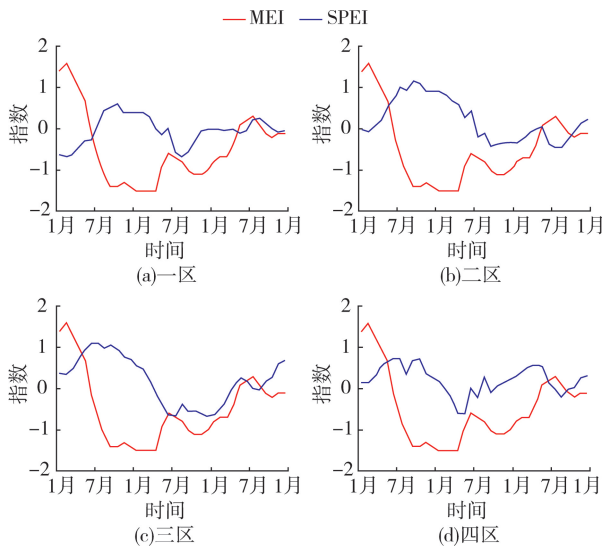


图4 强拉尼娜事件4个区域SPEI值和综合MEI值均值随时间变化

在强拉尼娜事件的 Year-0 和 Year-1, 4 个分区有相似的旱涝特征, 而到强拉尼娜事件的 Year-2, 4 个分区有不一致的变化特征, 但是旱涝程度均很小。将图 4 与图 3 相比较可以发现, 尽管合成后削弱了旱或涝的程度, 没有出现严重的旱涝月份, 但是, 长江中下游地区在强拉尼娜事件发生时易发洪涝, 结束后易发干旱的现象仍然显现出来, 这是非常值得重视的现象。

2.2.2 中等拉尼娜事件的影响

1961—2014 年共有 5 次中等拉尼娜事件, 平均持续时间是 13 个月左右。图 5 为中等拉尼娜事件长江中下游 4 个分区 SPEI 值与综合 MEI 值的散点图, 表 5 为中等拉尼娜事件旱涝月数的统计, 图 6 为 5 次中等拉尼娜事件中长江中下游各区 SPEI 值和综合 MEI 值均值随时间的变化情况, 横坐标为事件发生 Year-0、Year-1 的月份。长江中下游 4 个区的 SPEI 值对中等拉尼娜的响应特征既存在空间上的差异, 也存在时间上的差异。无论是事件持续期还是结束后, 一区的洪涝月数和强度都强于干旱, 二、三、四区则是干旱的月数和强度都强于洪涝。虽然二、三、四区的旱涝分布特征相近, 但在强度上存在差别, 三、四区的旱涝等级都高于二区, 出现多个重度旱涝月份。在中等拉尼娜事件中, 还有一个现象值得关注, 在事件结束后, 二、三、四区干旱月份出现的频率很高, 三区甚至达到 55.6%, 并且出现多个重旱极旱月份。

由图 6 可见, 长江中下游在中等强度拉尼娜事件发生期间, SPEI 指数在正常范围内波动, 在事件结束后表现出不同的旱涝趋势。一区在拉尼娜事件结束后有偏涝的趋势; 二、三、四区有偏旱趋势, 个别

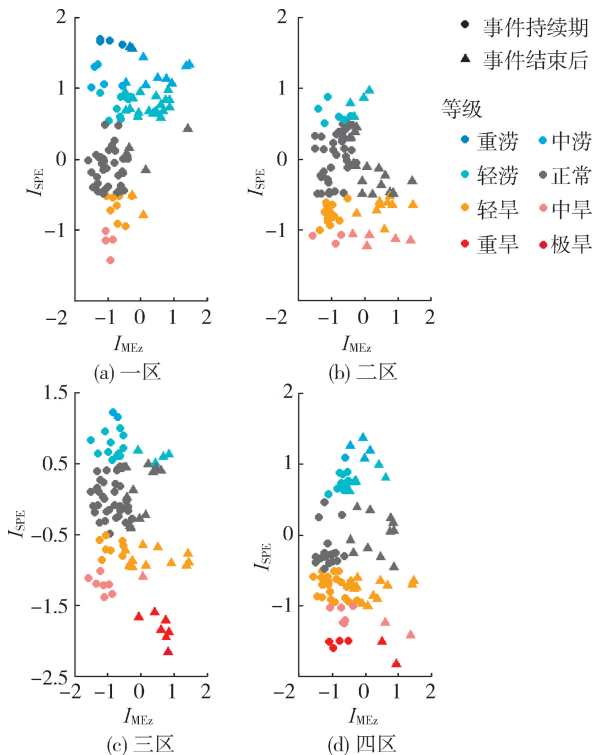


图5 中等拉尼娜事件影响时段的综合MEI指数与4个区域SPEI指数

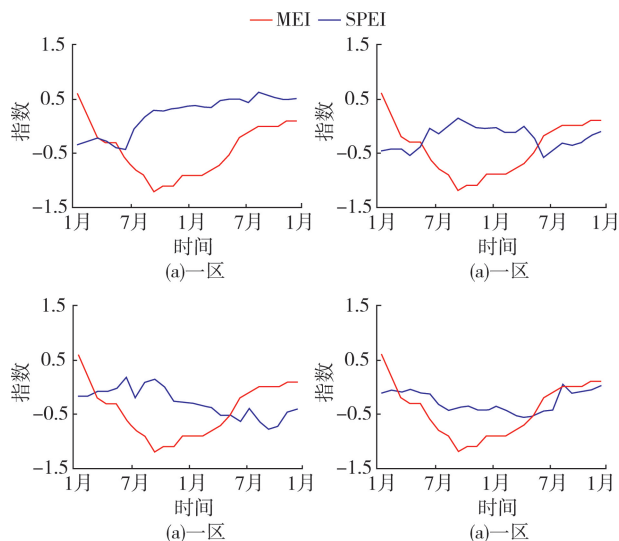


图6 5次中等强度拉尼娜事件4个区域SPEI值和综合MEI值均值随时间变化

月份干旱等级达到轻旱。图 6 表现出的特征与图 5 吻合, 在中等强度拉尼娜事件结束后, 一区更容易出现洪涝, 其他地区更容易出现干旱, 这是一个值得警惕的现象。虽然中等拉尼娜事件对长江中下游旱涝

的影响不及强事件,但也有着自己的特点。

2.2.3 弱拉尼娜事件的影响

1961—2014 年共有 3 次弱拉尼娜事件。图 7 为弱拉尼娜事件长江中下游 4 个分区 SPEI 值与综合 MEI 值的散点图,表 6 为弱拉尼娜事件旱涝月数的统计,图 8 为 3 次弱拉尼娜事件中长江中下游各区 SPEI 值和综合 MEI 值均值随时间的变化情况,横坐标为事件发 Year-0、Year-1 的月份。无论是弱拉尼娜事件持续期还是结束后,对长江中下游的影响都比较小,表现为,除了三区,其他区域正常的月份比例都达到 50% 以上。但是,各区域偏旱或偏涝的趋势更一致了。在图 7 中,一区 and 四区的分布特征比较相似,二区和三区的分布特征比较相似。一区和四区在弱拉尼娜事件持续期和结束后均易发生轻度洪涝,而二区和三区易发生轻到中度干旱,特别是在弱拉尼娜持续期,干旱程度较重,有数月达到了重度干旱程度。

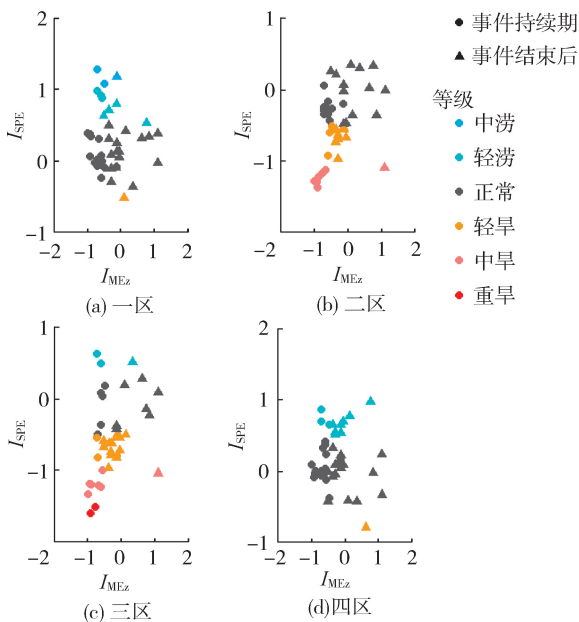


图 7 弱拉尼娜事件影响时段综合 MEI 值与 4 个区域 SPEI 值

表 6 弱拉尼娜事件 4 个区域旱涝月份统计

| 分区 | 事件持续期 | | | 事件结束后 | | | 总数 | | |
|----|-------|----|----|-------|----|----|----|----|----|
| | 洪涝 | 正常 | 干旱 | 洪涝 | 正常 | 干旱 | 洪涝 | 正常 | 干旱 |
| 一区 | 6 | 13 | 0 | 5 | 18 | 1 | 11 | 31 | 1 |
| 二区 | 0 | 10 | 9 | 0 | 13 | 11 | 0 | 23 | 20 |
| 三区 | 2 | 5 | 12 | 1 | 7 | 16 | 3 | 12 | 28 |
| 四区 | 3 | 16 | 0 | 8 | 15 | 1 | 11 | 31 | 1 |

由图 8 可见,弱拉尼娜持续时间更短,平均在 6 个月左右。可以看出,在弱拉尼娜事件发展期间,二区和三区有明显的出现;而事件减弱期和结束后,一区和四区有轻微的洪涝。可见,弱拉尼娜事件更容易引起长江中下游南部(二和三区)出现干旱,引起北部(一区和四区)出现洪涝。

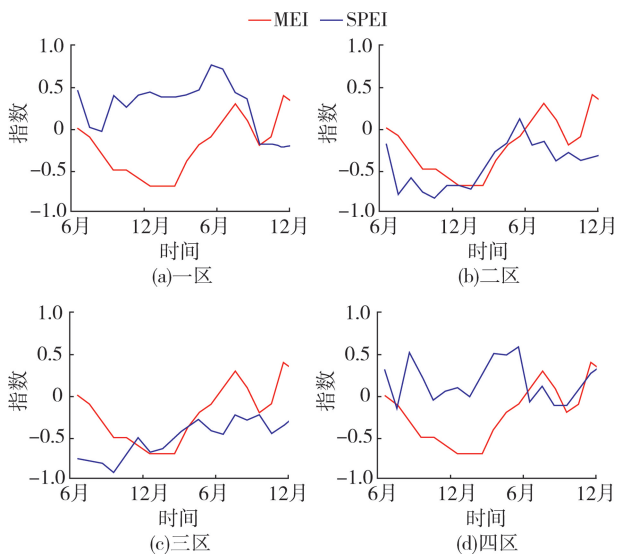


图 8 3 次弱拉尼娜事件 4 个区域 SPEI 值和综合 MEI 值均值随时间变化

2.3 研究区对拉尼娜事件的响应

长江中下游 4 个分区对不同等级拉尼娜事件的响应各有特点,并没有表现出完全一致的变化。为了剖析长江中下游对拉尼娜响应差异的原因,选取典型强(1998 年 9 月至 2000 年 4 月)、中等(1964 年 4 月至 1965 年 1 月)和弱(1984 年 12 月至 1985 年 5 月)拉尼娜事件为例,研究长江中下游区域对不同等级拉尼娜事件旱涝响应差异的原因。这 3 次事件中,4 个区域的旱涝分布特征和前文所述相近,是出现极端旱涝月份的事件,具有代表性。分析将从降水、水汽条件和垂直运动 3 个角度出发。长江中下游一区和四区纬度接近,经度不同,而二区和三区,经度范围大致相同,纬度差异较大。因此,对于一区和四区用经度-时间剖面图(对 30°N ~ 35°N 取平均)分析降水、水汽条件和垂直运动的差异,对于二区和三区用纬度-时间剖面图(对 107.5°E ~ 117.5°E 取平均)进行分析。距平是对 1981—2010 年基准期进行的,用 a、b、c、d 4 个红色方框分别表示一区、四区、三区和二区的大致位置。

2.3.1 研究区对强拉尼娜事件的响应

图 9 为 1998 年 9 月至 2000 年 12 月强拉尼娜事件中降水距平、水汽通量距平和垂直速度距平的剖面图。因为水汽主要集中在对流层中低层,忽略 300 hPa 以上大气中的水汽,整层大气水汽输送通量由地面积分到 300 hPa 高度得到,垂直运动则以 850 hPa 垂直速度为代表。

该拉尼娜事件开始于 1998 年 9 月,止于 2000 年 4 月,事件持续期间出现两个峰值,第一和第二个峰值分别出现在 1999 年 2 月和 2000 年 2 月,2 个峰值综合 MEI 值比较接近,第二个峰值稍稍大于第一

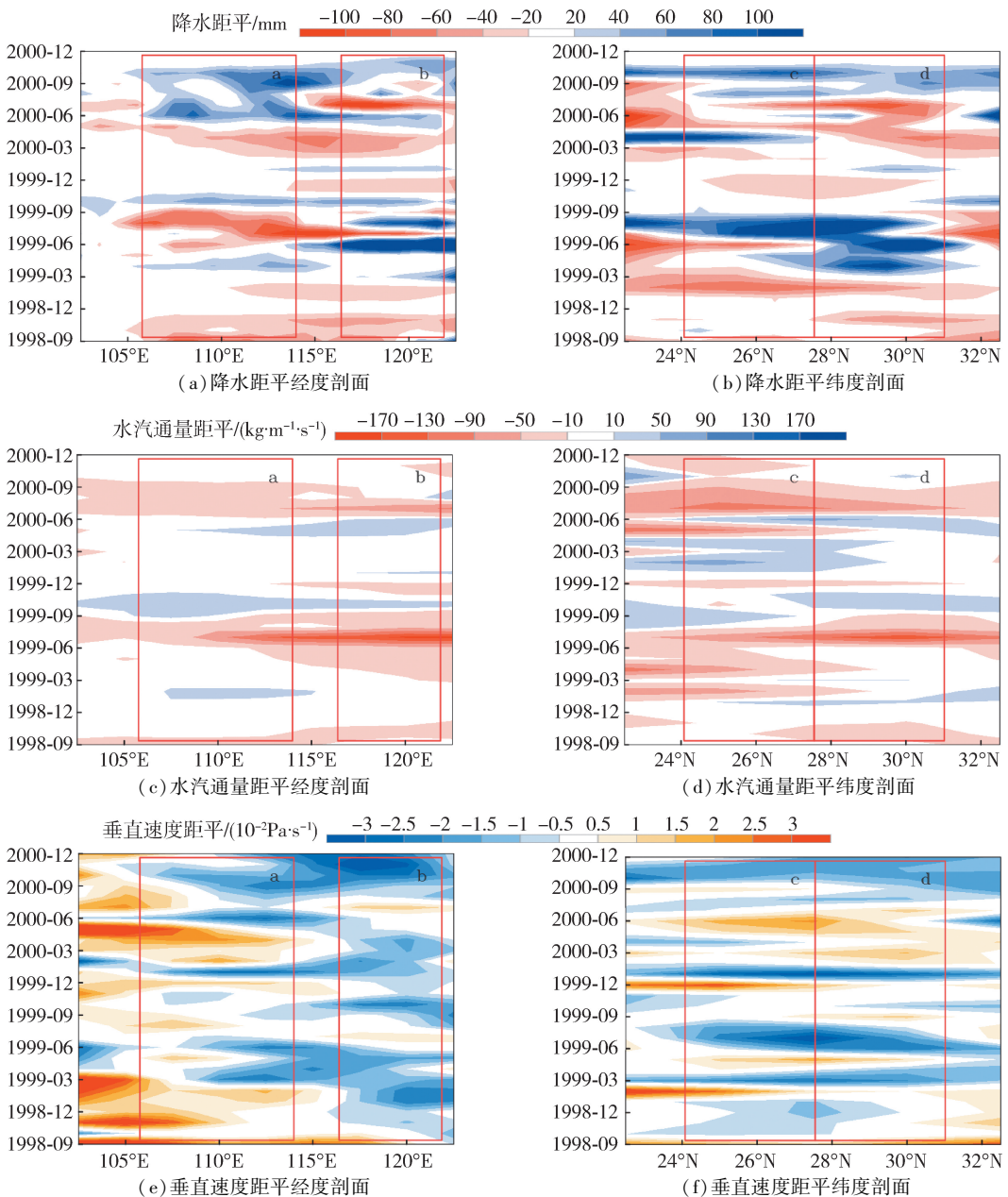


图9 1998年9月至2000年12月降水距平、水汽通量距平和垂直速度距平的剖面

个。由图9(a)(b)可见,在强拉尼娜事件持续期(2000年4月之前),一区(a框)降水异常,多为负距平,正距平月数较少。降水减少最强烈的时间出现强拉尼娜事件第一个峰值之后(1999年8—9月),降水负距平达到了 $-100 \sim -80 \text{ mm}$,对应的旱涝等级是极旱等级。在强拉尼娜事件结束后,一区则以降水正距平为主,表明降水增多。这与一区旱涝频率较低,但事件持续期易发严重干旱,事件结束后易发轻度洪涝的现象吻合。其他区域在强拉尼娜事件持续期降水距平常的月份多于一区,尤其是1999年7月左右,降水正距平可高达 100 mm ,其中二区(d框)持续时间最长,四区(b框)持续时间最短。这与表4和图3中3个区域所表现出的特征相同,四区旱涝频率和强度是3个区域中最弱的,而二

区是最强的。在事件结束后(2000年4月之后),3个区域降水负距平明显增强,其中二区(d框)降水减少最明显,同时它也是3个区域中干旱频率和等级最高的分区。降水是影响旱涝的主要因素,降水距平时间剖面图中各区降水的变化特征和前文分析的旱涝变化特征基本吻合。

降水的多寡与水汽条件和垂直运动密切相关,水汽输送强劲有利于降水。垂直速度负值为上升,正值为下降,负距平表明上升运动加强,下沉运动减弱,有利于降水,正距平则相反。由图9(c)~(f)可以看出,一区(a框)在事件持续期整层水汽通量的正负距平分布大致与降水相同,在水汽通量正距平出现的时段,垂直运动基本为正距平,这意味着水汽量少的地方,垂直运动大多是下沉运动或上升运动

很微弱,导致水汽不能被输送到高空。这也说明水汽输送和垂直运动的变化共同导致了降水的多寡。而强拉尼娜事件结束后,水汽输送变化不明显,而垂直速度距平显示上升运动增强而下沉运动减弱,说明此时降水增多是由于受垂直运动增强的影响。在二、三、四区,事件持续期和结束后降水的距平演变与垂直速度距平演变更相近,这说明其他区域降水增多或减少主要受垂直运动的影响,即使水汽条件尚可,但是,无好的水汽辐合条件,仍无法形成有效降水。因此,长江中下游4个分区在强拉尼娜事件中旱涝特征不一致,是由于水汽输送强度不同、气流的辐合上升运动不同而导致降水变化和旱涝特征不同。

2.3.2 研究区对中等拉尼娜事件的响应

图10为1964年4月至1965年9月中等拉尼娜事件中降水距平、水汽通量距平和垂直速度距平的剖面

的剖面图。该事件开始于1964年4月,终止于1965年1月,持续时间为10个月,在1964年8月达到峰值。

由图10(a)(b)可见,在此次中等拉尼娜事件开始期,一区(a框)降水出现负距平,在事件达到峰值前后,降水明显偏多,最大降水正距平可达100 mm,在事件结束后,降水转为正常,但是,在第二年的夏季开始降水减少很明显。而二、三、四区降水负距平的月数不仅多,而且数值很大,多个月份降水负距平达到-100 mm。降水的变化特征与图5和图6反映的旱涝响应特征类似。

由图10(c)(d)可见,4个区域的水汽输送强弱变化趋势一致,在中等拉尼娜事件发展期水汽输送明显增强,事件衰弱期和结束后5个月内水汽输送

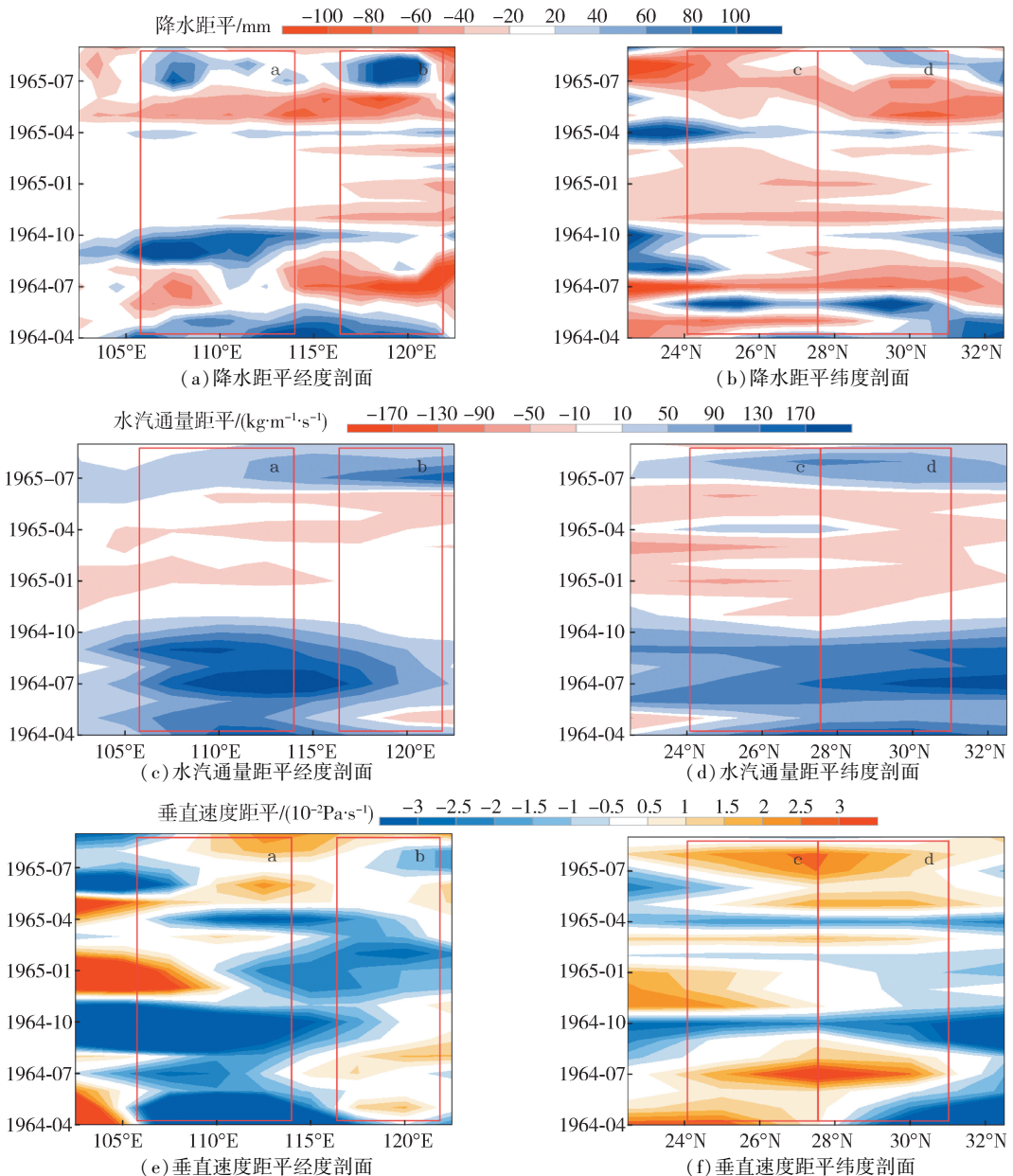


图10 1964年4月至1965年9月降水距平、水汽通量距平和垂直速度距平的剖面

略有减弱,而事件结束后6~8个月,水汽输送又略有增强。不同之处在于,一区的水汽输送增多明显多于其他区域。在中等事件中,虽然4个区域水汽通量增减的数值不同,但趋势是大体一致的,所以各区降水的差异主要取决于垂直运动的差异。在事件发生时,一区水汽输送增强,同时上升运动加强或下沉运动减弱(图10(e)(f)),导致一区降水明显增多。而事件结束后,水汽输送减少时,上升运动加强,下沉运动减弱,降水未有明显异常;水汽输送增多时,上升运动减弱,下沉运动加强,降水有增有减。而其他区域在事件持续期和结束后,水汽输送增多或减少时,垂直运动大多上升运动减弱,下沉运动加强,不利于降水,降水也就以偏少为主。可见,在中等拉尼娜事件中,长江中下游4个区域水汽通量的变化相近,主要是垂直运动的差异导致了长江中下

游不同分区降水的多寡,进而造成旱涝分布特征出现差异。

2.3.3 研究区对弱拉尼娜事件的响应

图11为1984年12月至1986年1月弱拉尼娜事件中降水距平、水汽通量距平和垂直速度距平的剖面图,该事件开始于1984年12月,止于1985年5月,事件持续了6个月,峰值出现在1985年3月。

由图11(a)(b)可见,在弱拉尼娜事件持续期和结束后,一区(a框)和四区(b框)降水变化趋势比较一致,只是一区的降水异常轻微一些,无论降水正距平还是负距平,几乎都不超过 ± 40 mm;四区降水正负距平的强度略大于一区。二区(d框)和三区(c框)降水变化趋势比较相似,只是二区在弱拉尼娜事件初期和结束期,降水正距平的持续时间和数值略大于三区。

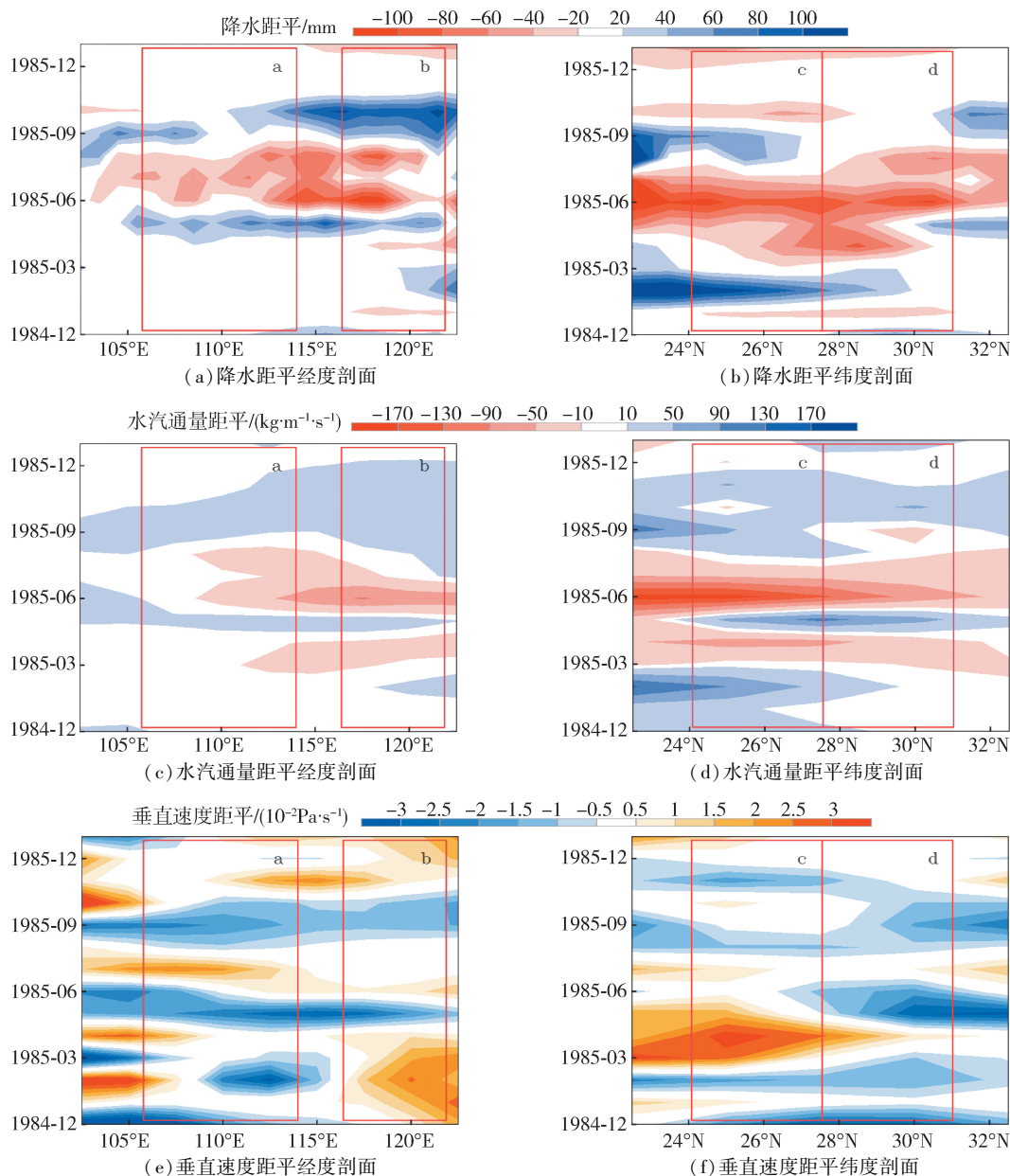


图11 1984年12月至1985年5月降水距平、水汽通量距平和垂直速度距平的剖面

水汽输送(图 11(c)(d))和垂直运动(图 11(e)(f))互相配合,共同作用导致降水的增多或减少。在降水增多的时段,水汽输送增多,上升运动加强或下沉运动减弱,在降水减少时,正好相反。因此,在弱拉尼娜事件中,二、三区降水偏少导致其易发干旱,一、四区(特别是四区)在事件后期降水略偏多,出现洪涝。

3 结 论

a. 不同强度等级的拉尼娜事件持续期和结束后,4 个区域旱涝发生的频率和强度等级存在明显差异,旱涝空间分布也存在差异。

b. 强拉尼娜事件下,在时间尺度上,长江中下游存在明显的旱涝转变趋势,在事件持续期易发生洪涝,事件结束后易发生干旱,且洪涝发生的频率大于干旱。在空间尺度上,4 个分区的旱涝响应程度也存在差异。在一区,旱和涝的频率均小于二、三、四区,洪涝程度多为轻涝,但是,干旱程度常常达到重旱和极旱,非常值得警惕。在二、三、四区,洪涝的频率和等级都强于干旱,特别是二区和三区易发严重洪涝,出现多个重涝月份。

c. 中等拉尼娜事件下,在时间尺度上,长江中下游没有明显的旱涝转变趋势,但在空间尺度上,一区 and 二、三、四区表现出完全相反的特征。整个拉尼娜事件影响时段,一区洪涝发生的频率和等级都明显高于干旱,出现了多个重涝月份,尤其在事件结束后,极易发生中等以上级别的洪涝。而二、三、四区发生干旱的频率和强度都大于洪涝,特别事件结束后,极易发生干旱,其中三区干旱等级最高,出现多个极旱和重旱月份。

d. 弱拉尼娜事件对长江中下游各区的影响要小很多,少有重旱重涝出现,但是,存在明显的南北区域差异。北部两个区(一区 and 四区)一致偏涝;南部两个区(二区和三区)一致偏旱,而且南部区域干旱频率更高,程度更重。

e. 对典型事件的分析表明,拉尼娜事件可通过影响水汽输送强度和辐合上升运动,影响长江中下游的降水,进而影响旱涝。1998—2000 年的强拉尼娜事件中,一区干旱程度偏强,与水汽通量偏少,导致降水减少有关;二、三、四区洪涝月数偏多,与上升运动增强,降水增多有关。1964—1965 年中等拉尼娜事件中,一区洪涝月份偏多,与水汽输送较多,上升运动强烈,导致降水偏多有关;二、三、四区在拉尼娜结束后干旱程度较重,与水汽输送偏少、下沉运动增强,导致降水偏少有关。1984—1985 年弱拉尼娜事件中,一区和四区易发洪涝,与水汽通量略偏大,

上升运动较强,降水略偏多有关;二区和三区干旱偏强,与水汽通量偏小,下沉运动较强,而上升运动不足,降水偏少有关。

参考文献:

- [1] 胡玉恒,荣艳淑,魏佳,等. 华南前汛期降水与前期印度洋海温的关系[J]. 水资源保护,2017,33(5):106-116. (HU Yuheng, RONG Yanshu, WEI Jia, et al. Relationship between pre-flood season precipitation in South China and Indian Ocean SST at earlier stages [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 106-116. (in Chinese))
- [2] RASMUSSEN E M, WALLACE J M. Meteorological aspects of El Niño/Southern Oscillation [J]. Science, 1983, 222: 1195-1202.
- [3] CHANG C P, ZHANG Y S, LI T. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. part I: roles of the subtropical ridge [J]. Journal of Climate, 2000, 13: 4310-4325.
- [4] TEDESCHI R G, GRIMM A M, CAVALCANTI I F A. Influence of central and east ENSO on precipitation and its extreme events in South America during austral autumn and winter [J]. International Journal of Climatology, 2016, 36: 1-11.
- [5] ZHANG Ronghua, GAO Chuan. Processes involved in the second-year warming of the 2015 El Niño event as derived from an intermediate ocean model [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 60(9): 1601-1613.
- [6] ZHAI Panmao, YU Rong, GUO Yanjun, et al. The strong El Niño of 2015/16 and its dominant impacts on global and China's climate [J]. Meteorology Research, 2016, 30(3): 283-297.
- [7] OVERPECK J T. Climate science: the challenge of hot drought [J]. Nature, 2013, 503: 350-351.
- [8] ZHANG Zengxin, XU Chongyu, YONG Bin, et al. Understanding the changing characteristics of droughts in Sudan and the corresponding components of the hydrologic cycle [J]. Journal of Hydrometeorology, 2012, 13: 1520-1535.
- [9] 刘丽,杨若文,邢冬,等. ENSO 发展和衰减阶段对云南夏季降水的影响研究 [J]. 热带气象学报, 2011, 27(2): 278-282. (LIU Li, YANG Ruowen, XING Dong, et al. The influence of developing and decaying stages of ENSO on summer precipitation in Yunnan [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27(2): 278-282. (in Chinese))
- [10] CHEN Yongli, ZHAO Yongping, FENG Junqiao, et al. ENSO cycle and climate anomaly in China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30(6): 985-1000.
- [11] WANG Yi, Yan Zhongwei. Changes of frequency of summer precipitation extremes over the Yangtze River association with large scale oceanic-atmospheric conditions [J]. Advance Atmosphere Science, 2011, 28(5): 1118-

- [12] 吴萍,丁一汇,柳艳菊.厄尔尼诺事件对中国夏季水汽输送和降水分布影响的新研究[J].气象学报,2017,75(1):371-383. (WU Ping, DING Yihui, LIU Yanju. A new study of El Niño impacts on summertime water vapor transport and rainfall in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2017, 75(1):371-383. (in Chinese))
- [13] 赵强,严华生,程路. ENSO 发展和衰减阶段的陕西夏季降水异常特征[J].应用气象学报,2013,24(4):495-503. (ZHAO Qiang, YAN Huasheng, CHENG Lu. Characteristics of Shaanxi summer precipitation anomalies in ENSO developing and decaying stages [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2013, 24(4):495-503. (in Chinese))
- [14] 袁媛,李崇银,杨崧.与厄尔尼诺和拉尼娜相联系的中国南方冬季降水的年代际异常特征[J].气象学报,2014,72(2):237-255. (YUAN Yuan, LI Chongyin, YANG Song. Decadal anomalies of winter precipitation over Southern China in association with El Niño and La Niña [J]. Journal of Meteorological Research, 2014, 72(2):237-255. (in Chinese))
- [15] 闪丽洁,张利平,张艳军,等.长江中下游流域旱涝急转事件特征分析及其与 ENSO 的关系[J].地理学报,2018,73(1):24-40. (SHAN Lijie, ZHANG Liping, ZHANG Yanjun, et al. Characteristics of dry-wet abrupt alternation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin and their relationship with ENSO [J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 73(1):24-40. (in Chinese))
- [16] WANG Xin, WANG Dongxiao, ZHOU Wen, et al. Interdecadal modulation of the influence of La Niña events on Meiyu rainfall over the Yangtze River valley [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2012, 29(1):157-168.
- [17] ZHANG Wenjun, JIN Feifei, STUECKER M F, et al. Unraveling El Niño's impact on the East Asian Monsoon and Yangtze River summer flooding [J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(21):11375-11382.
- [18] CAO Qiang, HAO Zhenchun, YUAN Feifei, et al. ENSO Influence on rainy season precipitation over the Yangtze River Basin [J]. Water, 2017, 9(7):469.
- [19] 王淼,曹润东,姚瑶,等.东部型、中部型 ENSO 影响长江流域降水的调查与分析[J].资源节约与环保,2017(4):65-67. (WANG Miao, CAO Rundong, YAO Yao, et al. The influence of developing and decaying stages of Enso on summer precipitation in Yunnan [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2017(4):65-67. (in Chinese))
- [20] ZHANG Qiang, XU Chongyu, JIANG Tong, et al. Possible influence of ENSO on annual maximum streamflow of the Yangtze River, China [J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(2/3/4):265-274.
- [21] 王绍武,龚道溢.近百年来的 ENSO 事件及其强度[J].气象,1999,25(1):9-14. (WANG Shaowu, GONG Daoyi. ENSO events and their intensity during the past century [J]. Meteorological Monthly, 1999, 25(1):9-14. (in Chinese))
- [22] 魏佳,荣艳淑,张亮.极强 ENSO 事件对长江流域降水和径流的影响分析[C]//第十四届中国水论坛论文集.郑州:水论坛组委会,2017.
- [23] WOLTER K, TIMLIN M S. Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index [C]//Proceeding of the NOAA Climate Diagnostics Workshop. Washington D C: NOAA, 1993.
- [24] WOLTER K, TIMLIN M S. Measuring the strength of ENSO events: how does 1997/98 rank? [J]. Weather, 1998, 53(9):315-324.
- [25] 李芬,张玮,乔云红.近 56 年山西季节旱涝对 ENSO 事件的响应[J].灾害学,2015(4):85-90. (LI Fen, ZHANG Yi, QIAO Yunhong. Response of Shanxi's seasonal droughts and floods to ENSO events in latest 56 years [J]. Journal of Catastrophology, 2015(4):85-90. (in Chinese))
- [26] 欧延升,赵景波.广西北部湾地区 1951-2010 年间气候变化与 ENSO 事件影响[J].灾害学,2017,32(1):228-234. (OU Yansheng, ZHAO Jingbo. Effects of ENSO events on climate in Beibu Gulf Area of Guangxi during 1951-2010 [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(1):228-234. (in Chinese))
- [27] VICENTESERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZMORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7):1696-1718.
- [28] 吴珊珊,黄彩婷.基于 REOF 方法的江西省 6 月降水趋势分区预测[J].气象与减灾研究,2015,38(1):8-15. (WU Shanshan, HUANG Caiting. Prediction of partition precipitation trends of Jiangxi in June based on REOF [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2015, 38(1):8-15. (in Chinese))
- [29] 方国华,丁紫玉,闻昕,等.厄尔尼诺事件及其对我国夏季降水量时空分布的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(6):481-488. (FANG Guohua, DING Ziyu, WEN Xin, et al. El Nino event and its impact on the spatial and temporal distribution of summer precipitation in China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(6):481-488. (in Chinese))
- [30] 吴洪宝,吴蕾.气候变率诊断和预测方法[M].2版.北京:气象出版社,2005:37-48.
- [31] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2版.北京:气象出版社,1999:117-122.

(收稿日期:2018-09-04 编辑:王芳)