

张洁, 杨秀芹, 滑申冰, 等. 江淮流域梅雨降水特征及影响因素分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(3): 15-29. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.002

ZHANG Jie, YANG Xiuqin, HUA Shenbing, et al. Analysis of Meiyu precipitation characteristics and influencing factors over the Yangtze-Huai River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 15-29. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.002

# 江淮流域梅雨降水特征及影响因素分析

张洁<sup>1,2</sup>, 杨秀芹<sup>1,2</sup>, 滑申冰<sup>3</sup>, 刘晓琳<sup>3</sup>, 姚德贵<sup>4</sup>, 李哲<sup>4</sup>, 朱德华<sup>1</sup>

- (1. 南京信息工程大学 水利部水文气象灾害机理与预警重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 水文与水资源工程学院, 江苏 南京 210044; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 4. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450000)

**摘要:**【目的】梅雨是东亚特有的天气现象, 梅雨期间的降水情况影响着夏季旱涝灾害的形成及发展, 对社会经济造成严重的损失。因此需要对江淮流域梅雨期降水特征及影响因素进行分析, 为该地区旱涝灾害预警提供参考。【方法】基于江淮流域 239 个站点 1961—2020 年日降水资料、全球海表温度、Ni-no3.4 指数和水汽通量资料, 分析近 60 a 江淮流域梅雨期无雨日和特大暴雨频次, 通过正交经验函数分析法(EOF)分析江淮流域梅雨期的降水特征及其与海温和水汽通量的关系。【结果】1961—2020 年江淮流域梅雨期多年平均无雨日数由南向北递增分布, 并且在江淮区(Ⅲ区)呈显著的增加趋势; 期间累计发生特大暴雨 47 次, 且梅雨期间各日期日降水量达特大暴雨等级的站点个数有显著的上升趋势。通过 EOF 分析得出江淮流域梅雨期降水空间分布类型主要有两种, 第一模态呈现全流域降水变化趋势一致性, 且呈显著的增加趋势, 第二模态流域降水呈南北反相分布特征。【结论】江淮流域梅雨期局部地区无雨日数及达特大暴雨等级降水量的站点个数的增多需引起关注; Ni-no3.4 指数出现较高(低)值的次年, 江淮流域梅雨期降水的偏多(少)。江淮流域梅雨期降水的变化与热带印度洋、热带中东太平洋、热带大西洋海区在前期冬季、春季和同期的海表温度异常有显著正相关, 即当这些海区海温为正异常时, 江淮流域梅雨期降水往往偏多; 反之, 则偏少。影响江淮流域梅雨期降水的水汽输送主要来自孟加拉湾、南海和西太平洋副热带高压西侧, 6 月南海和西太平洋水汽输送汇合形成强烈的水汽通量带, 到了 7 月, 水汽通量带因南海和孟加拉湾水汽输送的汇合而进一步增强。

**关键词:** 江淮流域; 梅雨; EOF 分析; 海温; 水汽输送; 降水; 气候变化; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.002

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)03-0015-15



## Analysis of Meiyu precipitation characteristics and influencing factors over the Yangtze-Huai River Basin

ZHANG Jie<sup>1,2</sup>, YANG Xiuqin<sup>1,2</sup>, HUA Shenbing<sup>3</sup>, LIU Xiaolin<sup>3</sup>, YAO Degui<sup>4</sup>, LI Zhe<sup>4</sup>, ZHU Dehua<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Hydrometeorological Disaster Mechanism and Warning of Ministry of Water Resources, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China; 2. School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China; 3. China Electric Power Research

收稿日期: 2024-05-01; 修回日期: 2024-06-14; 录用日期: 2024-06-17; 网络出版日期: 2024-06-26

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5500-202324180A-1-1-ZN); 国家自然科学基金项目(52209032)

作者简介: 张洁(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事流域水文气候和水资源规划与管理研究。E-mail: 202212360004@nuist.edu.cn

通信作者: 杨秀芹(1981—), 女, 副教授, 硕士研究生导师, 博士, 主要从事流域水文气候和水资源规划与管理研究。E-mail: young\_sd@nuist.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Institute, Beijing 100192, Jiangsu, China; 4. State Grid Henan Electric Power Company Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450000, Henan, China)

**Abstract:** [Objective] The Meiyu phenomenon stands as a distinctive weather occurrence in East Asia, with its precipitation levels during this period exerting significant influence on the emergence of droughts and floods during the summer, thereby incurring substantial socio-economic losses. Therefore, it is necessary to analyze the precipitation characteristics and influencing factors during the Meiyu period over the Yangtze-Huai River Basin, which will help to provide reference for the early warning of drought and flooding. [Methods] This study used observed daily precipitation data from 239 meteorological stations over the Yangtze-Huai River Basin from 1961 to 2020 combined with NOAA and ERA5 reanalysis data to analyze the frequency of the number of days without rainfall and heavy downpour and through the application of Empirical Orthogonal Functions (EOF), it examines the precipitation patterns during the Meiyu period, alongside its correlation with sea surface temperature (SST) and water vapor flux. [Results] Over the Yangtze-Huai River Basin, the average number of days without rainfall during the Meiyu period is distributed incrementally from south to north, and there is a significant increasing trend in Jianghuai area (area III) from 1961 to 2020. Over the past six decades, the basin has witnessed 47 heavy downpour events, and the number of stations with daily precipitation up to the level of exceptionally heavy rainfall on each date during the Meiyu period had a significant upward trend. Two primary spatial precipitation distribution patterns emerge during the Meiyu period within the basin: one demonstrating uniform basin-wide trends, showcasing an overall upward trend in precipitation, while the other manifests a north-south antiphase distribution. [Conclusion] The increase in the number of days without rain and the number of stations with precipitation up to the level of exceptionally heavy rainfall during the Meiyu period over the Yangtze-Huai River Basin need to be of some concern. A notable correlation between the Nino3.4 index and Meiyu period precipitation, with higher (lower) Nino3.4 values indicative of increased (decreased) Meiyu precipitation in the Yangtze-Huai River Basin. Furthermore, precipitation fluctuations during this period exhibit significant positive correlations with SST anomalies across tropical Indian Ocean, tropical central-eastern Pacific, and tropical Atlantic regions during preceding winter, spring and concurrent periods. Specifically, positive SST anomalies in these regions correspond to increased Meiyu precipitation, and vice versa. Water vapor transport influencing Meiyu period precipitation primarily originates from the Bay of Bengal, South China Sea, and the western periphery of the western Pacific subtropical high. By June, the convergence of water vapor transport from the South China Sea and western Pacific fosters a robust water vapor flux belt. Subsequently, in July, intensified water vapor transport from the South China Sea and Bay of Bengal further fortifies this flux belt.

**Keywords:** Yangtze-Huai River Basin; Meiyu; EOF analysis; SST; water vapor transport; precipitation; climate change; influence factor

## 0 引言

梅雨是指每年6—7月在江淮流域常会出现的连续阴雨、潮湿闷热的天气现象。据中国气象局统计,江淮地区梅雨期降水量一般占年总降水总量的30%~40%,其持续时间及降雨量与江淮流域夏季的旱涝灾害的形成及持续密切相关<sup>[1-3]</sup>。例如2020年梅雨雨强和梅雨季长度均为1961年以来历史最长,该年“暴力梅”导致的洪涝灾害造成江西、安徽、湖北、湖南等27省区市共3789万人次受灾,造成严重经济损失<sup>[4-5]</sup>。深入分析梅雨期的降水特征及其影响因素,可为江淮流域梅雨期暴雨洪涝事件预警、水旱灾害防御提供参考。

早在1958年,陶诗言等<sup>[6]</sup>发现梅雨期与亚洲上空大气环流的季节变化密切相关。丁一汇等<sup>[7]</sup>从大气环流方面,发现梅雨是东亚夏季系统与欧亚地区中高纬度环流系统相互作用的结果,且与东亚夏季风阶段性的北推密切相关。唐玉等<sup>[8]</sup>进一步研究发现东

亚夏季风强度及其推进的速度将通过影响江淮流域入、出梅时间,梅雨期长度及梅雨量多寡,进而影响江淮流域梅雨期旱涝情况。充沛的水汽输送是持续性降水不可或缺的条件之一,郭志荣等<sup>[9]</sup>通过对我国夏季水汽输送的年代际演变特征研究,发现6—8月的水汽输送在1975年前后由强转弱,并且在我国东部有水汽输送异常显著区。丁一汇等<sup>[10]</sup>根据近百年资料将东亚夏季风水汽输送带分成了4种主要类型,并发现江淮流域梅雨时期的季风水汽输送带明显不同于影响华北和东北地区暴雨的。许多研究发现,来自孟加拉湾、中国南海和西太平洋的水汽输送对我国东南部和江淮地区夏季降水有着重要影响<sup>[11-15]</sup>。孙博等<sup>[16]</sup>发现太平洋年代际涛动对东亚夏季水汽输送的调控作用影响梅雨特征的年代际变化。

海洋是气候系统的重要圈层,海温的变化是影响大气环流的重要因子之一。早在20世纪60年代,BJERKNES<sup>[17]</sup>深入研究热带东太平洋海区的海气相互作用,发现赤道中东太平洋海温的异常增高现象能

明显影响全球大气环流。诸多研究表明,我国东部夏季降水与热带太平洋海温存在密切关系<sup>[18-22]</sup>。SUN等<sup>[23]</sup>发现厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, 简称 ENSO)可以通过调节西北太平洋上空的反气旋异常来影响梅雨。WANG等<sup>[24]</sup>提出,春季中部太平洋厄尔尼诺的暖(冷)阶段可能会导致江淮流域梅雨的延迟(提前)爆发。王婷等<sup>[25]</sup>、钱维宏等<sup>[26]</sup>研究表明,在厄尔尼诺年,江淮流域夏季降水偏多,拉尼娜年降水偏少。王永光等<sup>[27]</sup>对2020年长江中下游梅汛期降水异常分析发现,前冬印度洋海温持续偏暖是长江中下游梅汛期雨量异常偏多的重要影响因子之一。LI等<sup>[28]</sup>深入解析了2020年暴力梅机制,发现5月北大西洋与西北太平洋海温异常导致入梅偏早,7月北印度洋-南海海温异常促进梅雨降水偏多,导致出梅时间偏晚。ZHANG等<sup>[29]</sup>基于再分析数据发现春季热带南大西洋表面暖海温异常与梅雨爆发日期提前密切相关。

经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, 简称 EOF)分析<sup>[30]</sup>,是一种多元统计方法,其本质是通过方差识别数据中有用的信息并提取到少数几个空间分布和时间序列上,该方法已广泛用于大气、海洋和气候研究<sup>[31-32]</sup>。马章怀等<sup>[33]</sup>通过 EOF 分析较好地展现了东亚季风区夏季降水的时空分布,主要表现为南北向“-、+、-”的三极型结构以及南北方降水反相变化的偶极型结构。唐筱等<sup>[34]</sup>由 EOF 方法得到了1981—2020年华北—东北地区南部7—8月降水主模态的空间结构为整体一致型和南北相反型,并进一步建立季节预报模型。戚佳晨等<sup>[35]</sup>采用 EOF 方法分析了1978—2012年长江三角洲城市群极端小时降水的时空变化特征,证实其极端小时降水呈增加趋势。

梅雨作为东亚特有的天气现象,受到众多学者关注,目前关于梅雨及其影响因子的研究大多基于将6—7月作为梅雨期,而一般梅雨的持续时间不足两个月。多年来,前人对江淮梅雨期的划分指标进行了大量研究并因地区、研究目的及划分侧重的差异提出了不同的标准<sup>[36-40]</sup>。针对不统一的梅雨识别标准,2017年国家气候中心发布了国家标准《梅雨监测指标》(GB/T 33671—2017)<sup>[41]</sup>,梅雨的监测指标和识别标准得到了统一。姚飞等<sup>[42-43]</sup>按照该梅雨检测指标标准识别出1961—2020年江淮流域多年平均入梅日(6月8日)、出梅日(7月18日)、梅雨期长度(40 d)。因此,本文选用6月8日—7月18日作为江淮流域1961—2020年的多年平均梅雨期分析梅雨期无雨日和特大暴雨日频次以及梅雨期降水的时空特

征,并分析了江淮流域梅雨期降水与 Nino3.4 指数,前期冬季、春季、同期水汽输送、全球海温之间的影响关系。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据介绍

本文选用1961—2020年江淮流域(28°E—34°N, 110°E—123°E)239个气象站点逐日降水资料,按国标<sup>[41]</sup>将江淮流域分为江南区(I区)、长江中下游区(II区)和江淮区(III区)等3个子区域(见图1),数据来源于中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>)。采用1960—2020年NOAA月平均海表温度(Sea Surface Temperature, SST)资料,空间分辨率为1°×1°和ERSSTv5 Nino 3.4指数每月、季资料(下载网站为<https://www.noaa.gov/>)。ERA5再分析数据集提供的1961—2020年逐小时转化为月平均的整层水汽通量数据,空间分辨率为0.25°×0.25°(下载网站为<https://cds.climate.copernicus.eu/>)。

### 1.2 研究方法

选取逐年6月8日—7月18日的降水量总和为江淮流域各站点每年的梅雨期降水。本文中无雨日定义为站点日降水量小于0.1 mm;特大暴雨日定义为站点日降水量大于250 mm;海温资料分别选用3—5月、6—7月和12月至次年2月的平均作为春季、同期和前期冬季的平均海温场;月Nino3.4指数作3个月滑动平均;整层水汽通量资料3—5月的平均作为春季平均的水汽通量场。采用经验正交分析法(EOF)提取1961—2020年江淮流域梅雨期降水的空间模态和时间系数,采用皮尔逊相关系数法和回归分析及检验<sup>[44]</sup>,用于研究各模态与前期、同期水汽通量和海温的相关关系。

EOF分析得到的空间模态在一定程度上可以反映要素场的空间分布特点,时间系数能够代表对应特征向量所表征的空间分布模态的时间变化特征<sup>[45]</sup>,时间系数为正值,表明研究区域与空间模态变化方向相同,负值则相反;并且时间系数的绝对值越大,空间模态的分布特征就越显著。

Nino3.4指数是经纬度范围170°W—120°W, 5°N—5°S海洋区域的平均海温距平指数,是厄尔尼诺现象监测的一个重要指标。根据国家气候中心2017年定制的《厄尔尼诺/拉尼娜事件判别方法》<sup>[46]</sup>,将Nino3.4的3个月滑动平均值达到或超过0.5℃判定为一次厄尔尼诺事件,达到或小于-0.5℃判定为一次拉尼娜事件。

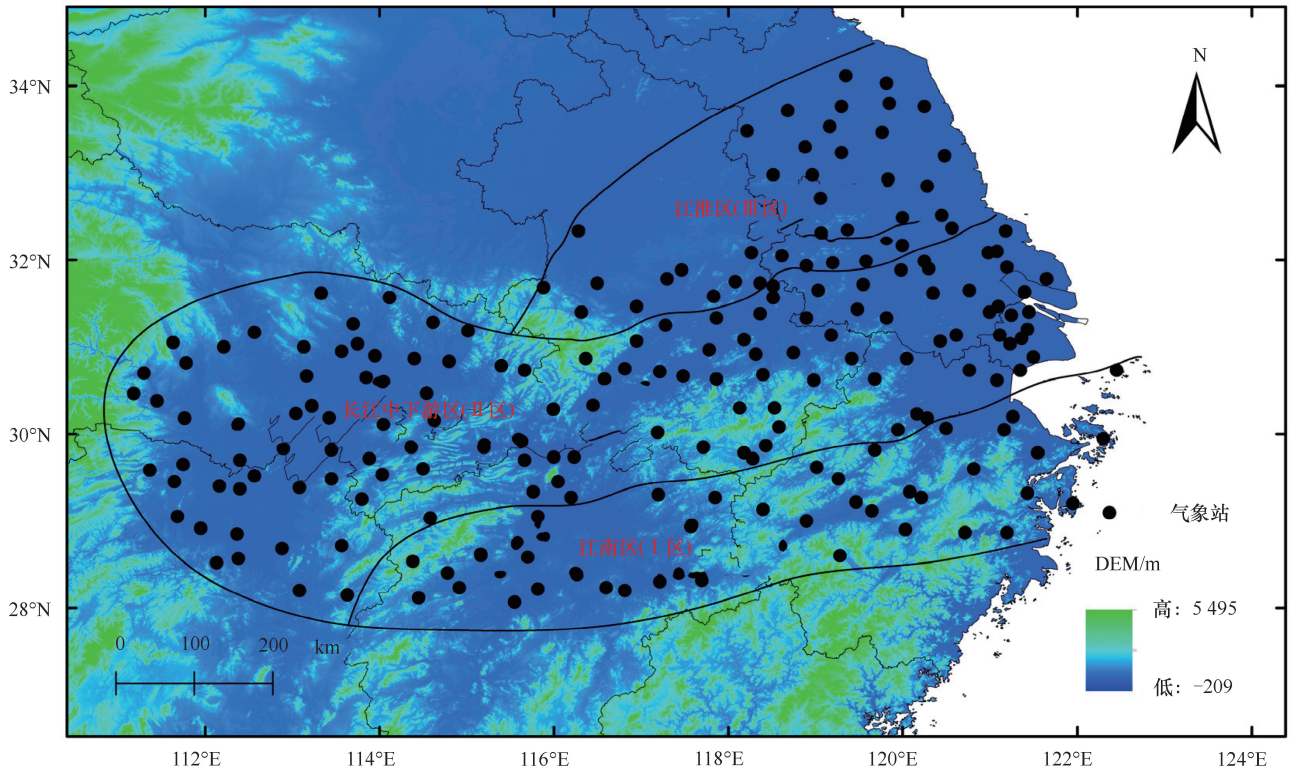


图 1 江淮流域梅雨监测区域范围及地面监测站点分布

Fig. 1 Spatial distribution of Meiyu monitoring stations over the Yangtze-Huai River Basin

## 2 研究结果分析

### 2.1 梅雨期无雨日分析

图 2 为 1961—2020 年梅雨期无雨日数统计图, 由图 2(a) 可知, 江淮流域各站点梅雨期多年平均无雨日数都超过 16 d, 且由南向北递增分布; 江南区 (I 区) 站点无雨日数基本都小于 20 d, 长江中下游区 (II 区) 仅西北部站点无雨日数超 24 d, 其余站点无雨日数在 20~24 d 之间, 而江淮区 (III 区) 大部分站点无雨日数超过 24 d。由图 2(b) 可知, 江南区 (I 区) 和长江中下游区 (II 区) 各站点梅雨期无雨日年代际变化不显著, 而江淮区 (III 区) 有 18 个站点通过了 95% 的置信度检验, 呈显著的增加趋势。由图 2(c)—(f) 可知, 1961—2020 年江淮流域、江南区 (I 区) 和长江中下游区 (II 区) 梅雨期无雨日数变化都不显著, 但在江淮区 (III 区) 梅雨期无雨日数呈显著增加趋势。

表 1 为在不同时间段江淮流域及各分区站点无雨日时间序列的变化速率, 江淮流域及各子区域梅雨期无雨日数在 1961—1990 年和 1991—2020 年的变化趋势都不显著。

### 2.2 梅雨期特大暴雨分析

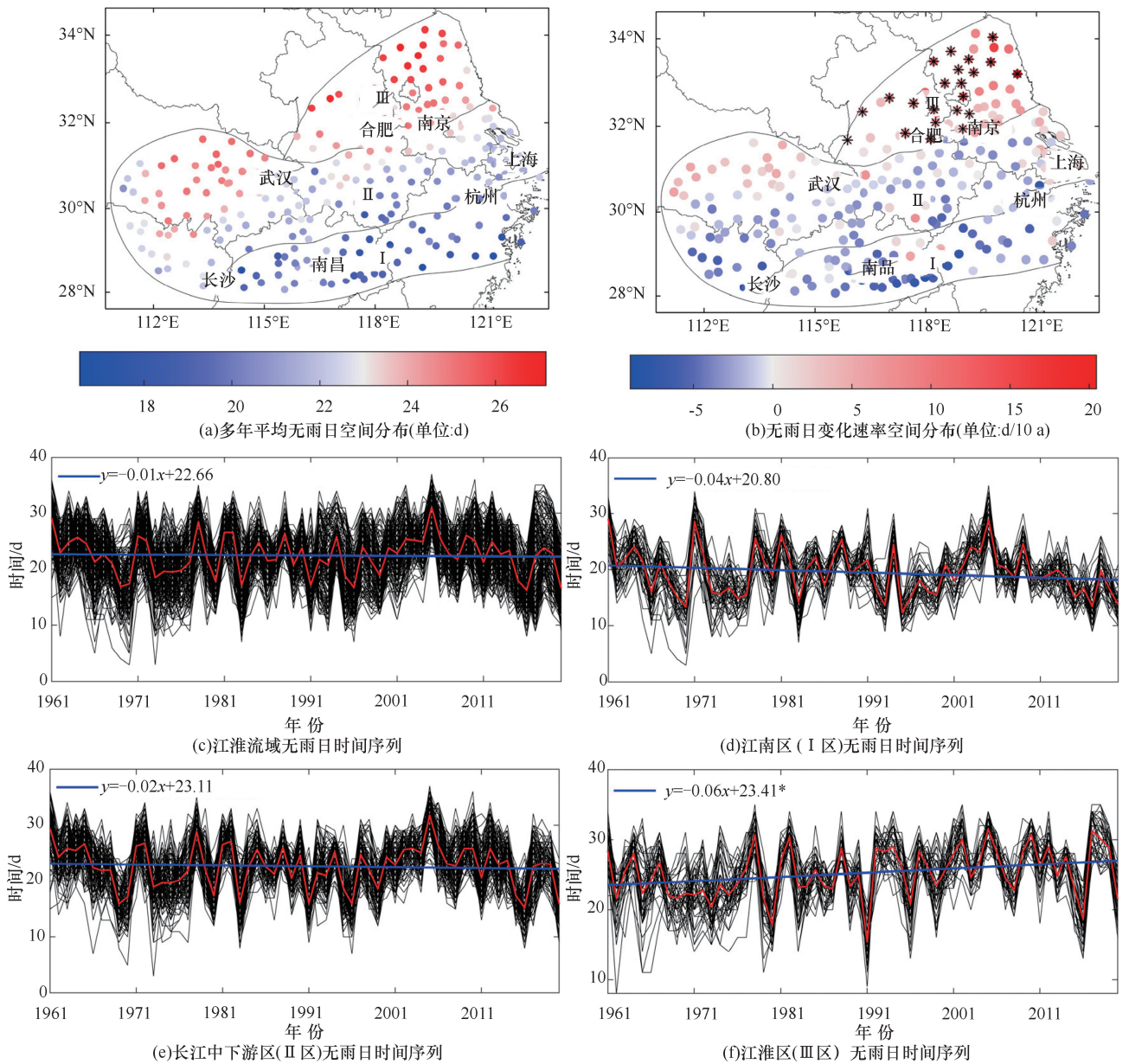
由图 3(a) 可知, 1961—2020 年江淮流域梅雨期

表 1 江淮流域及各分区不同时间段站点梅雨期无雨日  
时间序列变化速率 d/a

Table 1 Linear variation trend of the number of days without rainfall of Meiyu period at stations of different time periods over the Yangtze-Huai River Basin and its subregions d/a

年份	I 区	II 区	III 区	江淮流域
1961—1990	-0.02	-0.05	0.02	-0.03
1991—2020	-0.03	0.01	0.04	0.01

有 30a 出现日降水量达到特大暴雨 (日降水量 > 250 mm), 累计发生 47 次, 站点达 77 个。30 a 中各年发生日降水量达到特大暴雨等级的次数大多为 1~2 次, 日降水量达到特大暴雨等级的站点一般为 1~3 个, 但在 2016 年日降水量有 4 次达到了特大暴雨等级, 累计达到特大暴雨日降水量站点有 12 个。1961—2020 年江淮流域梅雨期各年发生特大暴雨的次数及日降水量达到特大暴雨等级的站点个数变化不显著。由图 3(b) 可知, 近 60 a 江淮流域在梅雨期发生特大暴雨的日期有 30 个, 大多数日期在 60 a 间只有 1~2 a 发生过特大暴雨, 站点个数也在 1—2 之间, 但 7 月 14 日虽然仅在 2016 年发生过特大暴雨, 但日降水量达到特大暴雨等级的站点个数有 8 个。出现特大暴雨最多次数的日期为 6 月 27 日, 有 4 次, 其次



(c)—(f)中黑线、红线和蓝线分别代表各站点的时间序列及其平均值和1961—2020年平均时间序列的线性趋势;“\*”——通过95%置信度检验

图2 1961—2020年梅雨期无雨日数统计

Fig. 2 Statistical chart of the number of days without rainfall during Meiyu period from 1961 to 2020

为7月5日、7月7日和7月8日,有3次。1961—2020年江淮流域梅雨期发生特大暴雨的日期变化不显著,而各日期日降水量达到特大暴雨等级的站点个数有显著的上升趋势。

### 2.3 梅雨期降水量的 EOF 分析

对江淮流域1961—2020年239个站点的梅雨期总降水量进行EOF分析,并对其进行North显著性检验。前2个特征向量的累计方差贡献率达到了70.69%,并且其特征向量的特征根误差范围无重叠部分,通过了North检验,即各模态相互独立,因此取前两个模态能较好解释江淮流域近60a梅雨期降

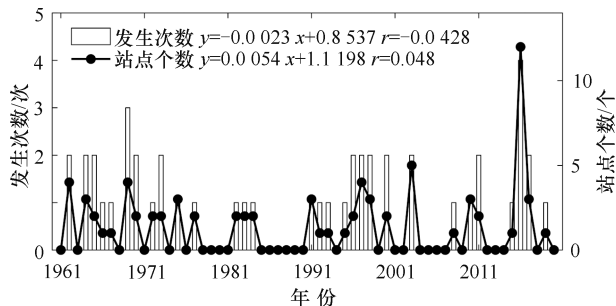
水量的降水分布类型,其中模态1的方差贡献率达52.43%,远高于模态2,是江淮流域梅雨期降水最主要的空间分布类型(见表2)。

由图4(a)可知,模态1中所有站点的特征值均为正值,表明1961—2020年江淮流域各地区梅雨期降水变化趋势具有高度一致性,即呈现出全流域降水量普遍偏多或偏少的分布特征。特征值高值基本集中在长江中下游区(II区)中部,表明该区域梅雨期降水量变率较大,对降水量的变化较为敏感;特征值最小值出现在江南区(I区)东部和江淮区(III区)北部,表明该部分地区梅雨期降水量变率较小,丰枯敏感

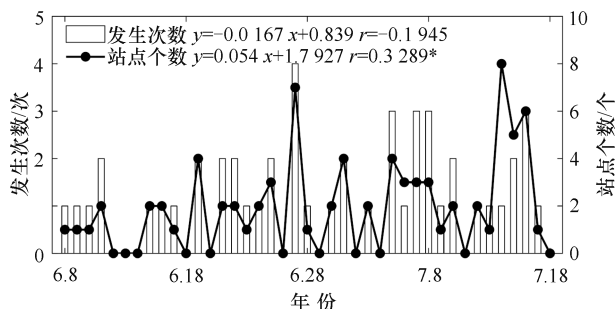
表2 梅雨期降水前6个模态特征根与方差贡献率

Table 2 Eigenvalues and variance contributions of the first 6 modes of precipitation during the Meiyu period

模态	特征根	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%	特征根下限	特征根上限
1	4 815 976.61	52.43	52.43	4 375 421.32	5 256 531.89
2	1 676 863.49	18.26	70.69	1 523 467.59	1 830 259.39
3	527 270.32	5.74	76.43	479 036.75	575 503.88
4	292 068.55	3.18	79.61	265 350.74	318 786.35
5	232 236.12	2.52	82.13	210 991.66	253 480.59
6	176 519.28	1.92	84.05	160 371.67	192 666.88



(a)各年发生特大暴雨次数及站点个数



(b)梅雨期各日期发生特大暴雨次数及站点个数

线性方程中  $x$  为年或日期,  $y$  为次数或站点个数,  $r$  为两者相关系数, “\*” — 通过 95% 置信度检验

图3 1961—2020年梅雨期特大暴雨频数统计

Fig. 3 Statistical chart of heavy downpour frequency during Meiyu period from 1961 to 2020

性较弱。从整体来看,特征值以长江中下游区(Ⅱ区)中部为中心向四周逐渐递减,说明流域梅雨期降水量的变化是从长江中下游区(Ⅱ区)中部向四周逐渐递减的。由图4(b)可知,模态1时间系数( $PC1$ 值)有显著上升趋势,表明江淮流域近60a梅雨期降水整体上呈增加趋势;且在1969年、1983年、1991年、1995年、1996年、1998年、2015年、2016年、2020年为较大值,表明在这些年江淮流域梅雨期全流域多雨,在1961年、1965年、1972年、1976年、1978年、1981年、1985年、1988年、2000年、2001年、2009年、2013年为较小值,表明在这些年江淮流域梅雨期全流域少雨。

由图4(c)可知,模态2的方差贡献率为18.26%,也是江淮流域梅雨期降水较典型的空间分布形式,特征值从北向南逐渐降低,呈现出南北反相分布模式。“零线”处于长江中下游区(Ⅱ区)30°N附近,江淮区(Ⅲ区)均为正值,江南区(Ⅰ区)均为负值且最小值集中在该子区域的中西部,表明当江淮区(Ⅲ区)梅雨期降水量较多时,江南区(Ⅰ区)降水量则较少;而江淮区(Ⅲ区)梅雨期降水量较少时,江南区(Ⅰ区)降水量则较多。

由图4(d)所示可知,当模态2时间系数( $PC2$ 值)为正值时,降水分布表现为江淮区(Ⅲ区)梅雨期降水量较多,江南区(Ⅰ区)降水量较少,且在 $PC2$ 值较大的1991年、2003年、2007年这3年这种降水分布更加显著;当 $PC2$ 值为负值时,表现则相反,且在1973年、1993年、1994年、1995年、1998年、2017年、2019年这几年该降水分布较为明显。1961—2020年江淮流域梅雨期降水模态2时间系数变化不显著。

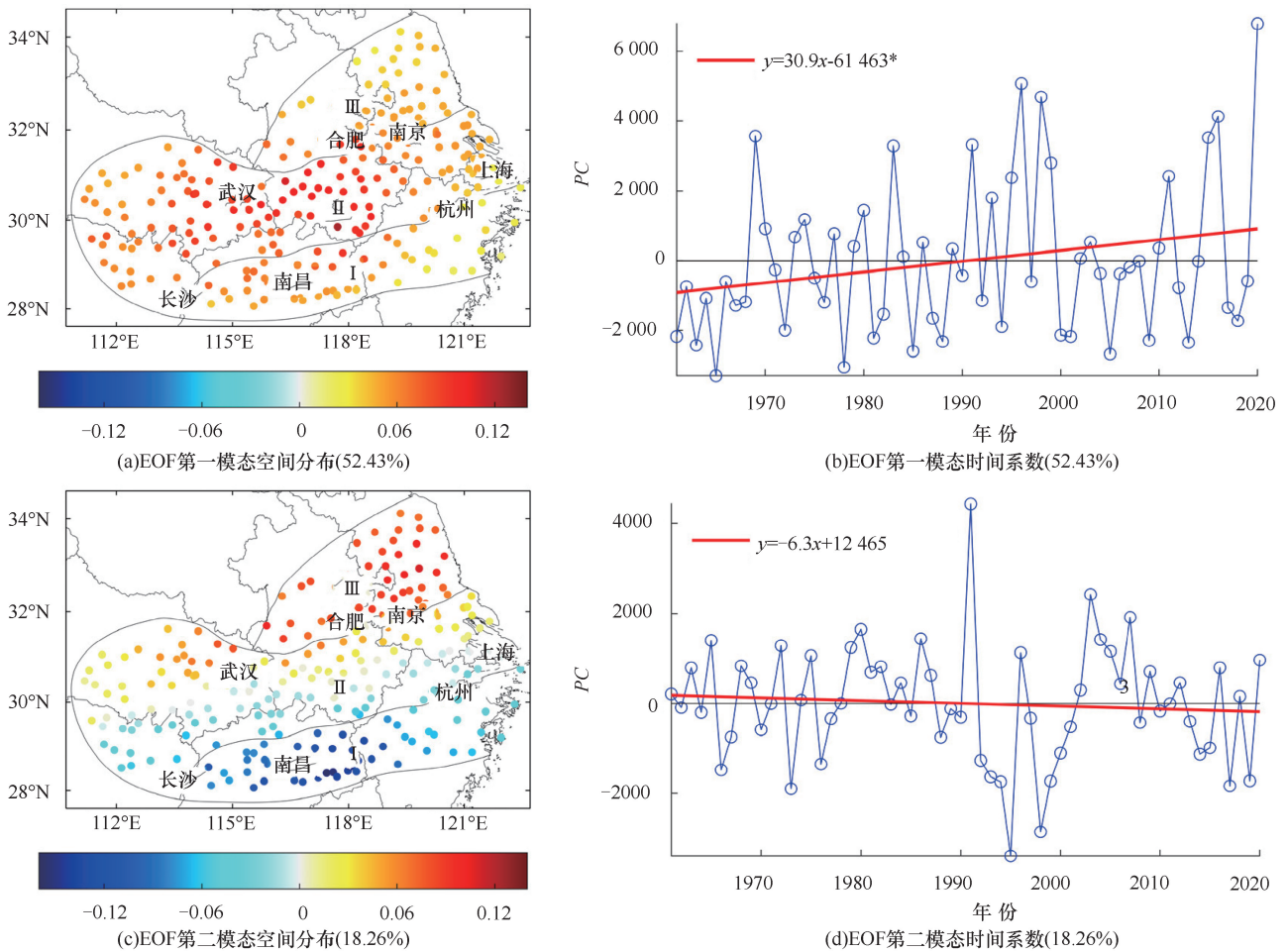
## 2.4 江淮流域梅雨期降水影响因子分析

### 2.4.1 海温

图5给出了经3个月滑动平均处理后的1960—2020年的Nino3.4月指数的变化规律。结合EOF第一模态的时间系数,如图4(b)所示,可以看出对于Nino3.4出现较大值(超过0.5℃,即发生厄尔尼诺事件)的年份如1972年、1982年、1994年、1997年、2015年等的次年,第一模态时间系数为正值,即梅雨期降水都表现为全流域多雨;对于Nino3.4出现较小值(小于-0.5℃,即发生拉尼娜事件)的年份如1964年、1971年、1975年、1984年、1999年等的次年,第一模态时间系数为负值,即梅雨期降水都表现为全流域少雨。结合EOF第二模态的时间系数与Nino3.4月指数,如图4(d)所示,在Nino3.4出现较大值(超过0.5℃)的年份如1972年、1994年、1997年等的次年第二模态时间系数都为负值,表明江淮流域梅雨期降水呈由南向北递减分布,即江南区(Ⅰ区)降水量较多,江淮区(Ⅲ区)降水量较少。因此,厄尔尼诺事件对江淮流域梅雨期降水具有一定影响。

图6为标准化后的第一、二模态时间系数与Nino3.4季指数的散点图,可以看到,第一模态时间系数 $PC1$ 与Nino3.4季指数在前期冬季和春季呈正相关且通过了95%的置信度检验,但在夏季其相关性并不明显;第二模态时间系数 $PC2$ 在前期冬季、春季和夏季都不显著。

Nin3.4指数仅能表现出特定范围内海洋区域的



“\*” —通过 95%置信度检验

图 4 梅雨期降水量 EOF 第一、二模态特征值空间分布及其时间系数

Fig. 4 Spatial distribution of the first and second modal eigenvalues of precipitation EOF and their time coefficients during the Meiyu period

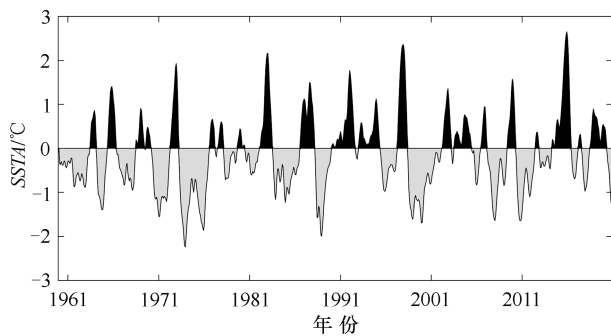


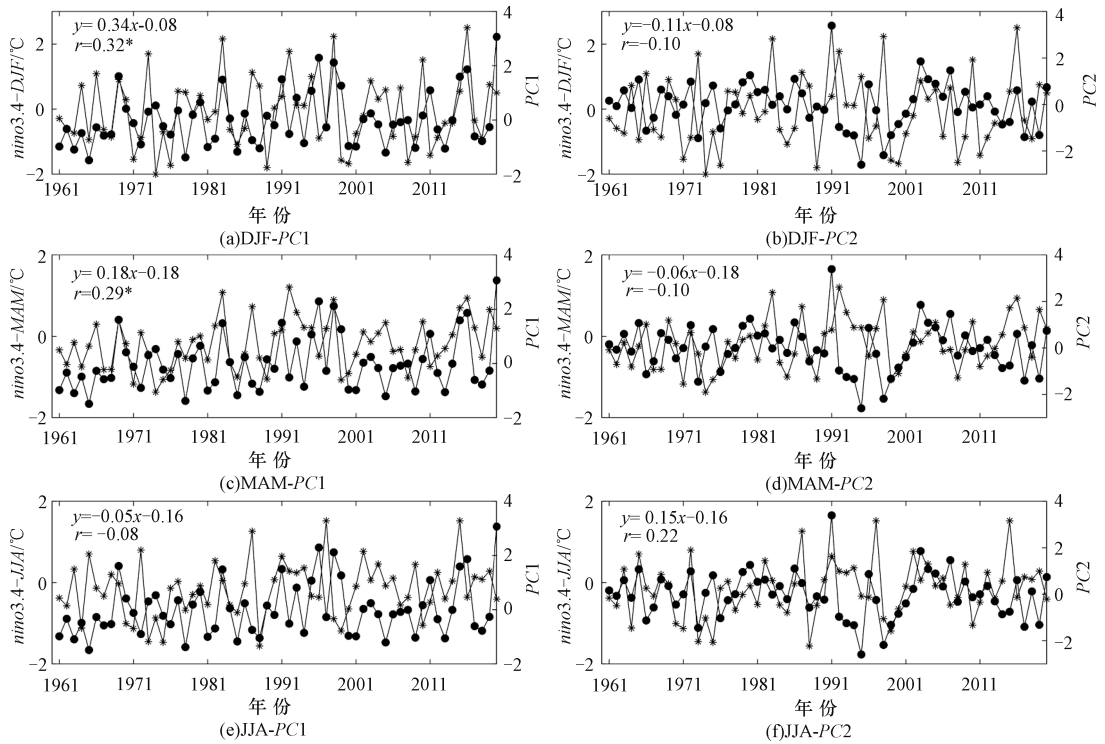
图 5 1960—2020 年的 Nino3.4 月指数变化统计

Fig. 5 Statistical chart of change in the Nino3.4 monthly index from 1961 to 2020

海温异常,为进一步探讨江淮流域梅雨期降水与海温的关系,本文计算了江淮流域梅雨期降水 EOF 的前两个模态时间系数与不同时期全球海温的关系。图 7 为 1961—2020 年江淮流域站点梅雨期降水 EOF 第一、二模态对应时间系数与前期冬季、春季和同期海温相关系数分布图。

在前期冬季,由图 7 (a)可见, EOF 第一模态时间系数与太平洋、印度洋和大西洋海区的海温都呈现出大范围的正相关。在太平洋海区关系密切区域分布在热带中东太平洋海区、墨西哥西部海区、部分黑潮区域以及澳大利亚东部海域;在印度洋海区关系密切区域主要位于阿拉伯海和部分孟加拉湾海区;在大西洋海区关系密切区域主要分布在热带大西洋海区和加勒比海域。而 EOF 第二模态时间系数与海温只在热带东太平洋海区、南海和巴西东南部海区有较大范围的弱负相关,在温带南太平洋海区有较大范围的正相关,如图 7 (b)所示。

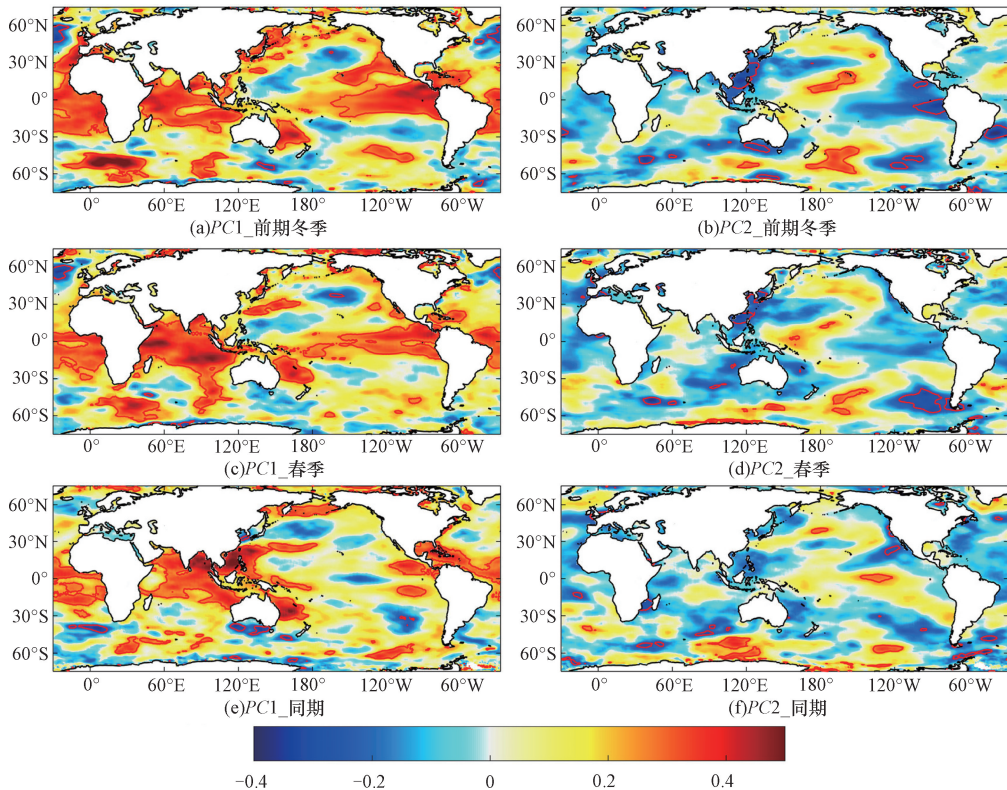
在春季,由图 7 (c)可见, EOF 第一模态时间系数与海温的密切关系都表现为正相关,且与印度洋海区的海温关系最密切,其密切相关区域几乎覆盖  $30^{\circ}$  S 以北的印度洋海区。在太平洋海区的部分密切相关区域主要为热带中东太平洋和澳大利亚东部海域,而在大西洋海区关系密切区域主要分布在热带大西洋海



线性方程中  $x$  为标准化模态时间系数,  $y$  为 Nino3.4 季指数,  $r$  为两者相关系数, “\*” — 通过 95% 置信度检验; DJF、MAM、JJA 分别为前期冬季(12月至次年2月), 春季(3—5月), 夏季(6—8月); PC1、PC2 分别为第一、二模态标准化时间系数

图 6 1960—2020 年的第一、二模态标准化时间系数与 Nino3.4 季指数的相关分析

Fig. 6 Correlation analysis of normalized time coefficient of the first and second mode and seasonal index of Nino3.4 from 1961 to 2020



该图海岸线基于中华人民共和国自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1666 号的标准地图制作, 底图无修改。

红色等值线内为通过 95% 显著性检验的区域

图 7 江淮流域站点梅雨降水量 EOF 第一、二模态时间系数与前期冬季、春季、同期 SST 的相关

Fig. 7 Correlation between EOF first and second mode time coefficients of precipitation during the Meiyu period over the Yangtze-Huai River Basin and SST of the preceding winter, spring and the same period

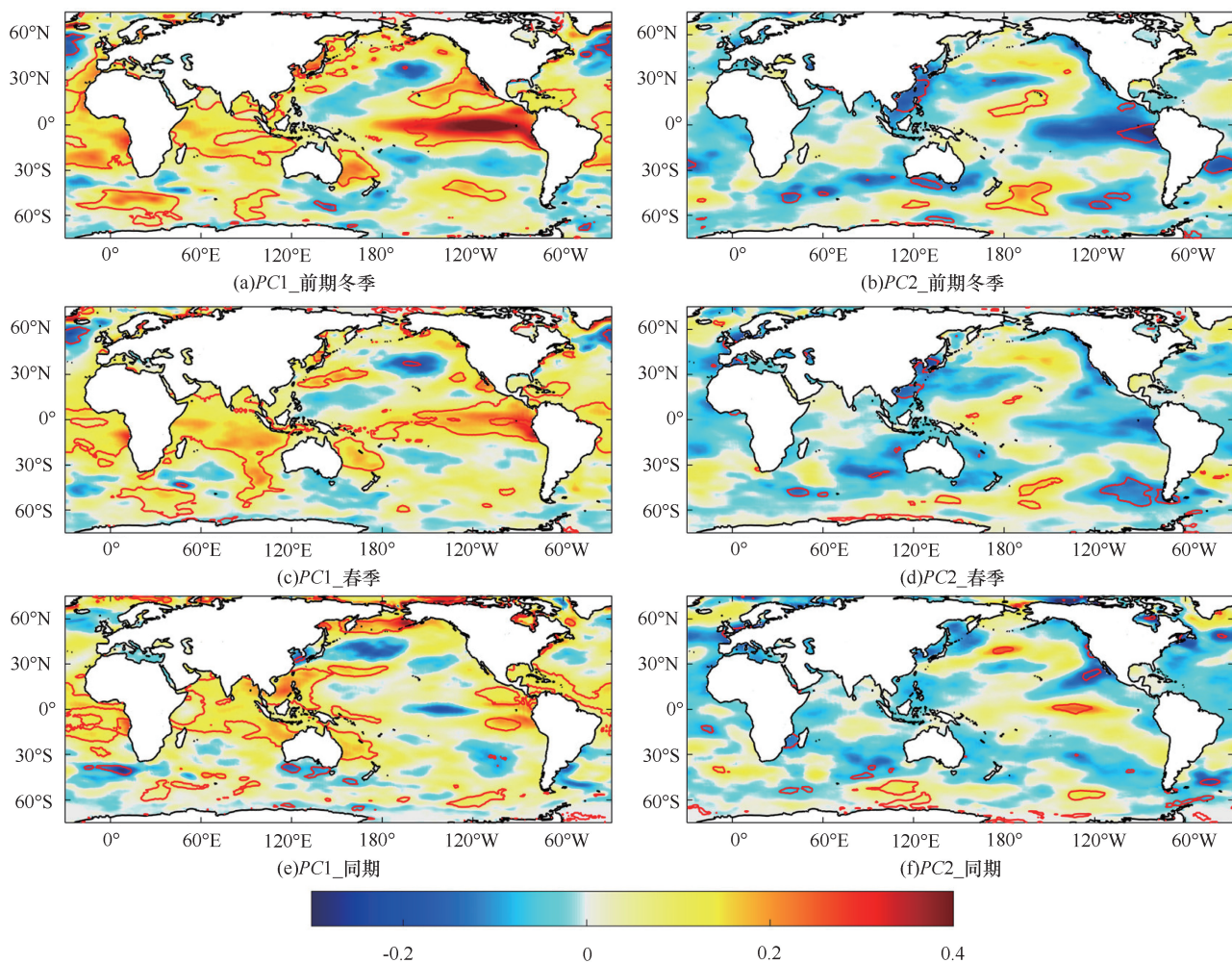
区和加勒比海海域,但都比前期冬季海温分布范围小。而 EOF 第二模态时间系数的密切关系区域主要在南海部分区域和太平洋东南部海区有大范围的弱负相关,在温带南太平洋海区有大范围的正相关,如图 7 (d) 所示。

在同期,由图 7 (e) 可见,全球海温与 EOF 第一模态时间系数关系密切区域与前期冬季、春季基本相似但范围都要小得多,但在太平洋海区部分与南海、东海海区表现出显著正相关。EOF 第二模态时间系数与赤道中东大西洋和南温带印度洋海区的海温有较小范围的密切正相关区域,如图 7 (f) 所示。

相比江淮流域梅雨期 EOF 第一模态时间系数和前期冬季、春季、同期的密切相关区域分布, EOF 第二模态时间系数和各个时期海温的密切相关区域都小得多。当 EOF 第一模态时间系数与各时期全球海

温的密切关系表现为图 7 (a)(c)(e) 所示的正异常时,江淮流域梅雨期降水往往偏多,反之,则偏少。当 EOF 第二模态时间系数与相关海区的海温为图 7 (b)(d)(f) 所示的正负异常时,江淮流域梅雨期降水分布表现为自北向南递减,即江淮区(Ⅲ区)梅雨期降水量较多,江南区(Ⅰ区)降水量较少;反之,降水分布则表现为自南向北递减。

图 8 为江淮流域站点梅雨期降水量 EOF 第一、二模态时间系数对前期冬季、春季和同期海温的回归。海温在 EOF 第一模态时间系数上的回归在前期冬季显示为厄尔尼诺型,热带中、东太平洋为正海温异常,以 35°N 为中心的副热带地区和热带西太平洋为负海温异常,热带大西洋、热带印度洋以及部分黑潮地区都为正海温异常且大部分通过了置信度 95% 检验,如图 8(a) 所示;在春季,除黑潮地区外,正、



该图海岸线基于中华人民共和国自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1666 号的标准地图制作,底图无修改。

红色等值线内为通过 95% 显著性检验的区域

图 8 江淮流域站点梅雨期降水量 EOF 第一、二模态时间系数对前期冬季、春季、同期 SST 的回归(单位:  $^{\circ}\text{C}/\text{a}$ )

Fig. 8 Regression of EOF first and second mode time coefficients of precipitation during the Meiyu period over the Yangtze-Huai River Basin to SST of the preceding winter, spring and the same period( Unit:  $^{\circ}\text{C}/\text{a}$ )

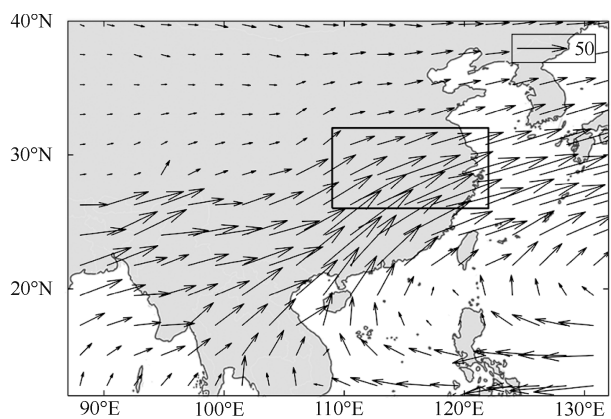
负海温异常区域与前期冬季分布相似,但在热带中、东太平洋和热带大西洋分布范围更小,在热带印度洋和以 $35^{\circ}\text{N}$ 为中心的副热带地区分布范围更广,如图8(c)所示;在同期,主要在热带东太平洋、热带印度洋、热带大西洋有正海温异常,如图8(e)所示。总体上,海温在EOF第一模态时间系数上的回归分布表明,当各时期的热带中东太平洋、热带印度洋、热带大西洋以及同期的南海海区为正海温异常时,江淮流域梅雨期降水偏多。

相较于EOF第一模态时间系数,海温在EOF第二模态时间系数上的回归显著相关区域分布较小,并且这些正负海温异常表明江淮流域梅雨期降水呈自北向南递减。在前期冬季,主要在热带东太平洋、东海和南海和 $25^{\circ}\text{S}$ 为中心的副热带大西洋区域有负海温异常,在以 $15^{\circ}\text{N}$ 为中心的热带太平洋地区和以 $45^{\circ}\text{S}$ 为中心的温带太平洋地区有正海温异常,如图8(b)所示;在春季,海温正负异常分布与其在前期冬季相似但范围更小,如图8(d)所示;在同期,在热带中东太平洋、以 $45^{\circ}\text{S}$ 为中心的温带印度洋和温带太平洋区域有正海温异常,在以 $25^{\circ}\text{N}$ 为中心的副热带太平洋地区和以 $50^{\circ}\text{N}$ 和 $50^{\circ}\text{S}$ 为中心的温带大西洋地区有小范围的负海温异常,如图8(f)所示。

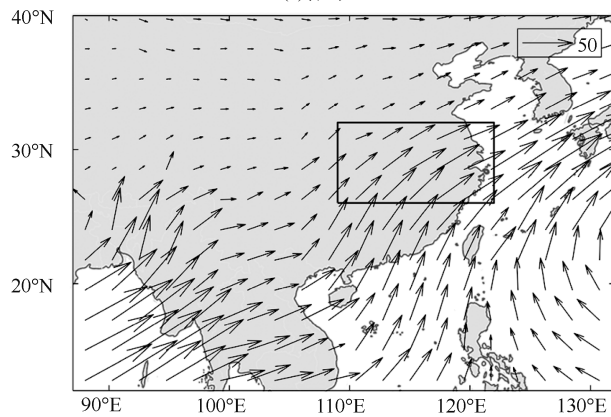
#### 2.4.2 水汽输送

由图9可知,影响江淮流域梅雨期降水的水汽输送主要来自于孟加拉湾、南海和西太平洋副热带高压西侧。在春季,来自孟加拉湾的水汽输送较强;6月,南海地区水汽输送增强,来自西太平洋副热带高压西侧的水汽输送也有一定的增强,两者在南海北部汇合形成了强烈的水汽通量带;7月,来自孟加拉湾的水汽输送进一步加强,与南海地区的水汽输送在华南汇合,进一步在江淮流域形成了更强烈的水汽通量带。

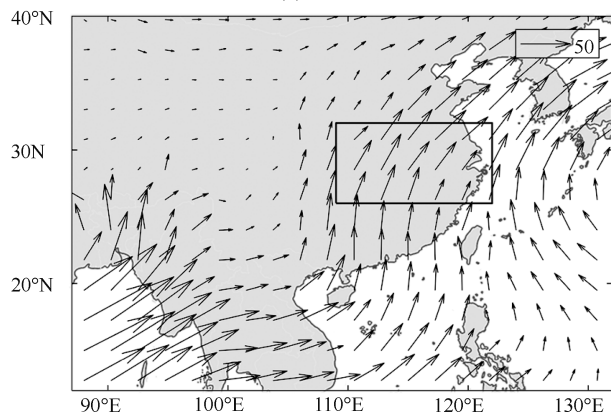
图10与图11分别为江淮流域站点梅雨期降水量EOF第一、二模态时间系数与春季、6月、7月水汽通量的相关和回归矢量场。水汽通量的相关与回归结果显示,第一模态时间系数在春季与来自孟加拉湾和东海的水汽输送密切相关;在6月,该降水型与来自 $18^{\circ}\text{N}$ 以南的南海、西太平洋区域以及部分孟加拉湾区域的水汽输送密切相关;在7月,主要为来自孟加拉湾和 $10^{\circ}\text{N}$ 以南的南海、西太平洋区域的水汽输送与第一模态时间系数相关密切。第二模态时间系数在春季的水汽输送密切相关区域较小;在6月,与来自西太平洋副热带高压的水汽输送相关较密切;到了7月,密切相关区域减少。



(a)春季



(b)6月



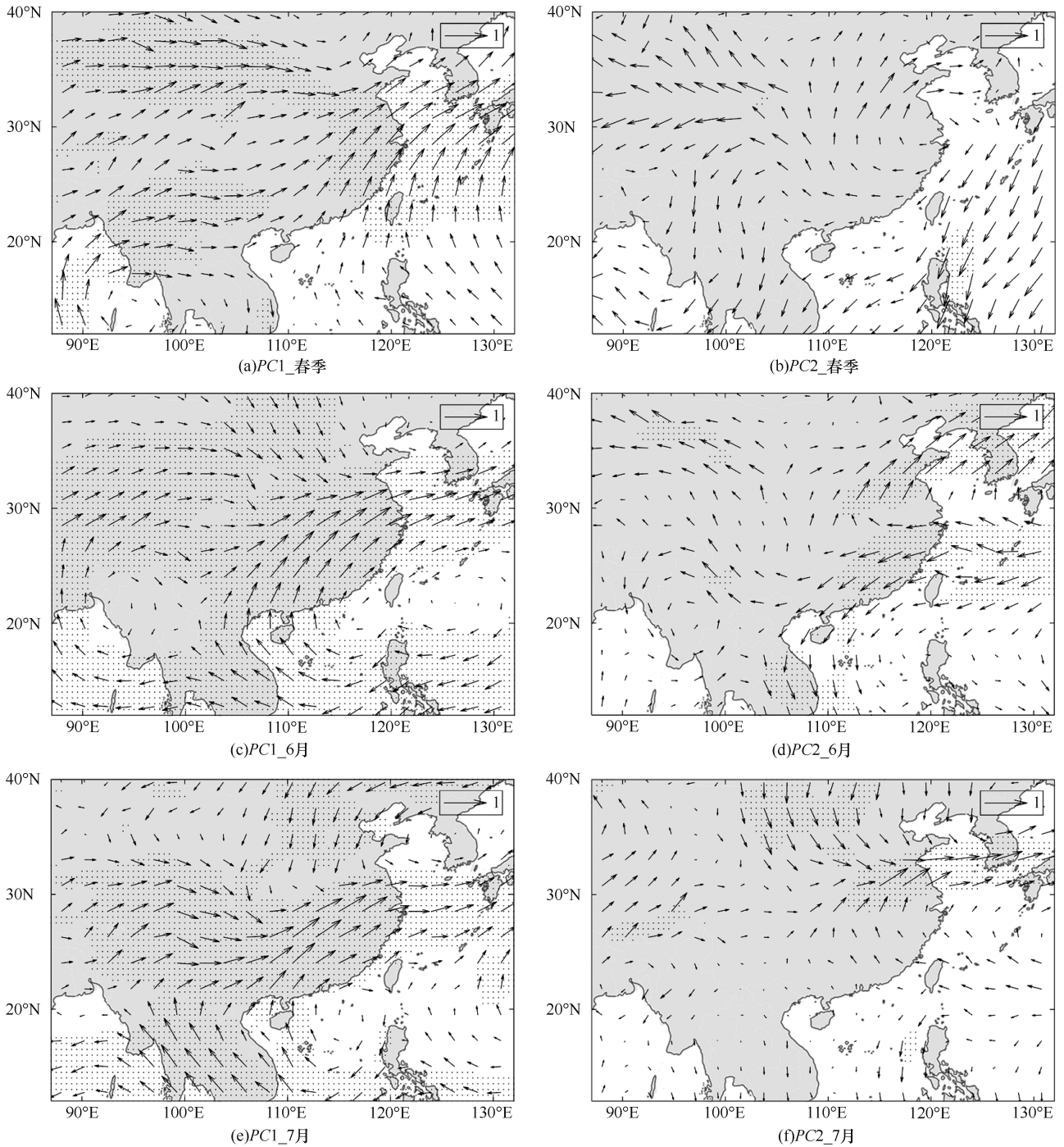
(c)7月

矩形框为研究区域。该图海岸线基于中华人民共和国自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1666号的标准地图制作,底图无修改

图9 春季、6月和7月整层水汽通量(单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig. 9 The water vapor fluxes in spring, June and July  
(Unit:  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

在总体上,EOF第一模态在不同时期与来自孟加拉湾、西太平洋和南海区域的水汽输送密切相关,当这些区域的水汽输送较强时,江淮流域梅雨期降水偏多;反之,则偏少。EOF第二模态只在6月与来自西太平洋副热带高压的水汽输送密切相关,且当水汽输送较强烈时,江淮流域梅雨期降水表现为自



打点处为通过 95% 显著性检验的区域。该图海岸线基于中华人民共和国自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016) 1666 号的标准地图制作, 底图无修改

图 10 江淮流域站点梅雨期降水量 EOF 第一、二模态时间系数与春季、6 月和 7 月水汽通量的相关矢量场

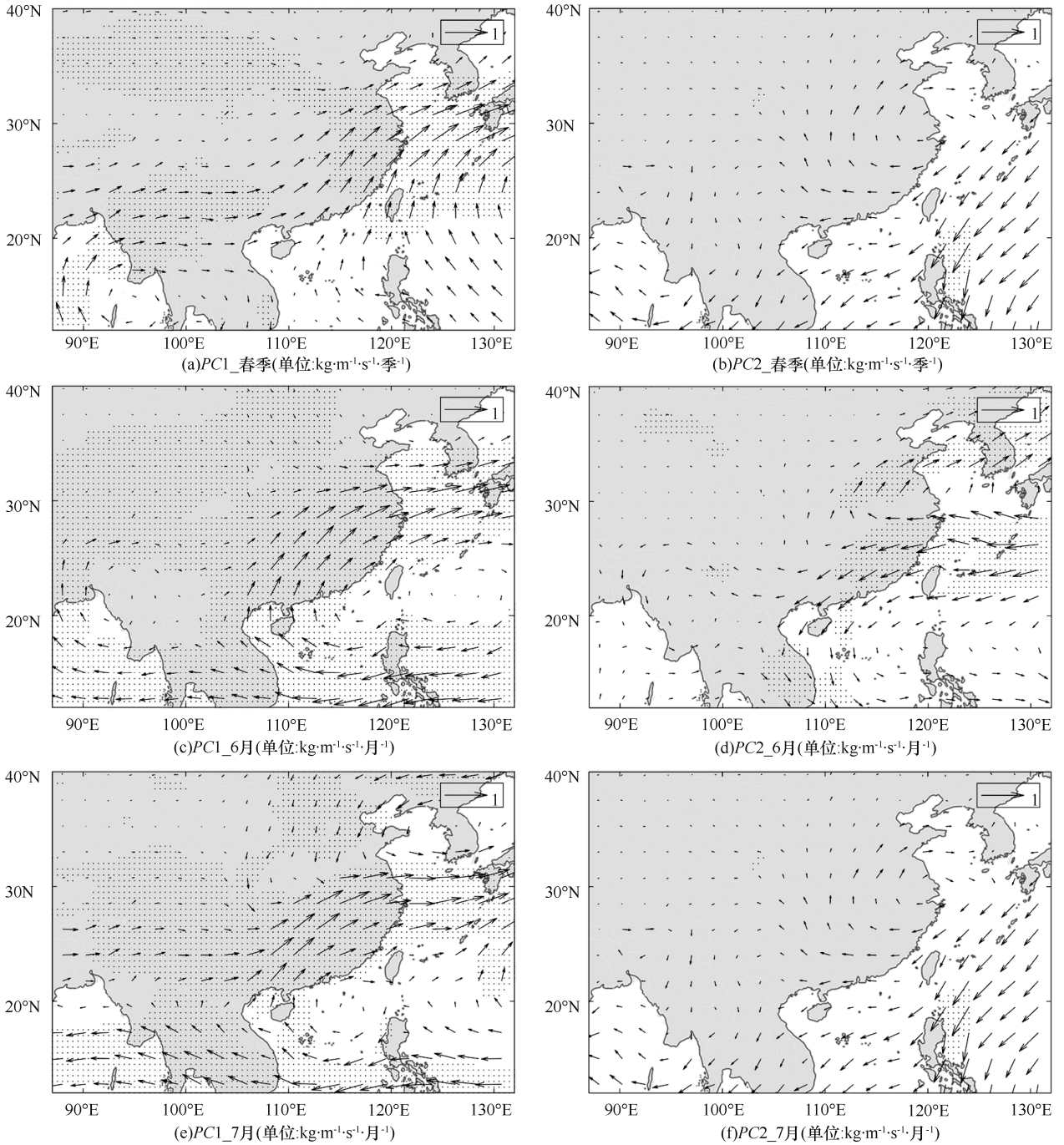
Fig. 10 Correlation vector fields between EOF first and second mode time coefficients of precipitation during the Meiyu period over the Yangtze-Huai River Basin and water vapor flux in spring, June and July

北向南递减; 反正, 则自北向南递增。

### 3 结论

(1) 1961—2020 年江淮流域各站点梅雨期多年平均无雨日数呈由南向北递增的空间分布特征, 且江淮

区(Ⅲ区)呈显著的增加趋势。1961—2020 年间江淮流域梅雨期有 30 a 发生特大暴雨, 累计次数达 47 次; 梅雨期间(6 月 8 日—7 月 18 日)发生过特大暴雨的日期共有 30 个, 其中有四次在 6 月 27 日出现特大暴雨, 并且各日期日降水量达到特大暴雨等级的



打点处为通过 95% 显著性检验的区域。该图海岸线基于中华人民共和国自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1666 号的标准地图制作, 底图无修改

图 11 江淮流域站点梅雨期降水量 EOF 第一、二模态时间系数对春季、6 月和 7 月水汽通量的回归矢量

Fig. 11 Regression vector field of EOF first and second mode time coefficient of precipitation during the Meiyu period over the Yangtze-Huai River Basin to water vapor flux in spring, June and July

站点个数有显著的上升趋势。

(2) 1961—2020 年江淮流域梅雨期降水主要表现为两种空间模态。第一种模态方差贡献率达 52.43%, 为该流域最主要的空间分布类型, 即江淮流域各地区梅雨期降水变化趋势高度一致, 且长江中

下游区(Ⅱ区)中部梅雨期降水量变率较大, 该模态时间系数呈上升趋势, 表明近 60 a 来江淮流域梅雨期降水整体上呈增加趋势。第二种模态方差贡献率为 18.26%, 呈现为南北反相分布模式。

(3) 通过 Nino3.4 月指数的变化与 EOF 第一模态

的对比,可以看出在发生厄尔尼诺(拉尼娜)事件的次年,江淮流域梅雨期降雨偏多(偏少); Nino3.4 季指数与 EOF 第一模态在前期冬季和春季呈显著正相关但在夏季的相关性并不显著;而 Nino3.4 月、季指数与 EOF 第二模态时间系数之间的相关性不显著。EOF 第一模态在前期冬季与海温密切相关区域分布最大,其次在春季,其密切相关区域主要在热带中东太平洋、热带印度洋和热带大西洋海区有正海温异常,并且在前期冬季还与部分黑潮区域密切相关,在同期与东海和南海海区密切相关。EOF 第二模态与各时期的海温密切相关区域分布较小。

(4)江淮流域梅雨期降水主要与来自孟加拉湾、南海和西太平洋副热带高压西侧的水汽输送相关。EOF 第一模态与来自孟加拉湾、西太平洋和南海的水汽输送密切相关,而 EOF 第二模态主要在 6 月受到来自西太平洋副热带高压的水汽输送影响。

#### 参考文献(References):

- [1] 谢志清, 杜银, 曾燕, 等. 江淮流域年极端降水事件分类特征及其致洪风险[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(9): 1153-1168.
- XIE Z Q, DU Y, ZENG Y, et al. Classification of yearly extreme precipitation events and associated flood risk in the Yangtze-Huaihe River valley [J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(9): 1341-1356.
- [2] 姚蕊, 杨惠琳, 张书亮, 等. 安徽省极端降水演变规律及与气候因子遥相关研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(1): 62-73.
- YAO R, YANG H L, ZHANG S L, et al. Spatio-temporal evolution of extreme precipitation and their teleconnection with climate factors in Anhui Province[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(1): 62-73.
- [3] 傅云飞, 罗晶, 王东勇, 等. 夏季江淮地区降水的气候变化研究进展[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(4): 317-324.
- FU Y F, LUO J, WANG D Y, et al. A review of studies on climate change of summer precipitation in the Jianghuai region[J]. Torrential Rain and Disasters, 2020, 39(4): 317-324.
- [4] 刘芸芸, 丁一汇. 2020 年超强梅雨特征及其成因分析[J]. 气象, 2020, 46(11): 1393-1404.
- LIU Y Y, DING Y H. Characteristics and possible causes for the extreme Meiyu in 2020[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(11): 1393-1404.
- [5] ZHOU Z Q, XIE S P, ZHANG R H. Historic Yangtze flooding of 2020 tied to extreme Indian Ocean conditions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(12): e2022255118.

- [6] 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 东亚的梅雨期与亚洲上空大气环流季节变化的关系[J]. 气象学报, 1958, 29(2): 119-134.
- TAO S Y, ZHAO Y J, CHEN X M. The relationship between Mei-yu in far east and the behaviour of circulation over Asia[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1958, 29(2): 119-134.
- [7] 丁一汇, 柳俊杰, 孙颖, 等. 东亚梅雨系统的天气-气候学研究[J]. 大气科学, 2007, 31(6): 1082-1101.
- DING Y H, LIU J J, SUN Y, et al. A study of the synoptic-climatology of the Meiyu system in East Asia[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(6): 1082-1101.
- [8] 唐玉, 李栋梁. 江淮梅雨与东亚副热带夏季风进程变异的关系[J]. 气象科学, 2020, 40(2): 169-179.
- TANG Y, LI D L. The relationship between the Meiyu in the Yangtze-Huaihe Region and the variation of the East Asian subtropical summer monsoon process[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2020, 40(2): 169-179.
- [9] 郭志荣, 陈旭红, 江燕如, 等. 中国东部夏季水汽输送的年代际变化特征[J]. 大气科学学报, 2014, 37(5): 568-574.
- GUO Z R, CHEN X H, JIANG R Y, et al. Interdecadal variation characteristic of water vapor transfer over eastern China in summer [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2014, 37(5): 568-574.
- [10] 丁一汇, 柳艳菊, 宋亚芳. 东亚夏季风水汽输送带及其对中国大暴雨与洪涝灾害的影响[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 629-643.
- DING Yihui, LIU Yanju, SONG Yafang. East Asian summer monsoon moisture transport belt and its impact on heavy rainfalls and floods in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 629-643.
- [11] SHI Y, JIANG Z H, LIU Z Y, et al. A Lagrangian analysis of water vapor sources and pathways for precipitation in East China in different stages of the East Asian summer monsoon [J]. Journal of Climate, 2020, 33(3): 977-992.
- [12] 施逸, 江志红, 李肇新. 基于拉格朗日方法的中国东部雨季水汽输送垂直特征[J]. 大气科学, 2022, 46(2): 380-392.
- SHI Y, JIANG Z H, LI Z X. Vertical characteristics of water vapor transport during the rainy season in Eastern China based on the Lagrangian method [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2022, 46(2): 380-392.
- [13] 黄丁安, 卢楚翰, 孔阳, 等. 基于 ERA5 再分析资料对 2020 年 6 月江淮区域水汽源汇的诊断分析[J]. 气象科学, 2022, 42(1): 44-50.
- HUANG D A, LU C H, KONG Y, et al. Diagnostic study of moisture sources and sinks over the Yangtze-Huaihe River Basin in June 2020 based on ERA5 reanalysis data [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2022, 42(1): 44-50.
- [14] DING Y H, SUN Y. A study on anomalous activities of East Asian

- summer monsoon during 1999[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 2001, 79(6): 1119-1137.
- [15] XU X D, LU C G, DING Y H, et al. What is the relationship between China summer precipitation and the change of apparent heat source over the Tibetan Plateau? [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2013, 14(4): 227-234.
- [16] 孙博, 王会军, 周波涛, 等. 中国水汽输送年际和年代际变化研究进展[J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 644-653.
- SUN B, WANG H J, ZHOU B T, et al. A review on the interannual and interdecadal variations of water vapor transport over China during past decades[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 644-653.
- [17] BJERKNES J. Atmospheric teleconnection from equatorial Pacific [J]. *Monthly Weather Review*, 1969, 97(3), 163-172.
- [18] 钟倩媚, 马静, 王璐. 2016 与 2020 年江淮流域梅雨期降水准双周振荡特征的对比分析[J]. *气象学报*, 2023, 81(2): 235-257.
- ZHONG Q M, MA J, WANG L. Biweekly oscillation of the Meiyu-season precipitation in 2016 and 2020 over the Yangtze-Huaihe River Basin: a comparative analysis [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2023, 81(2): 235-257.
- [19] 马潇祎, 范可, 杨洪卿. 2021 年盛夏中国东部极端降水月际演变成因及可预测性[J]. *大气科学学报*, 2024, 47(4): 541-556.
- MA X Y, FAN K, YANG H Q. Causes and predictability of inter-month evolution of extreme precipitation over eastern China in midsummer 2021 [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2024, 47(4): 541-556.
- [20] 陈兵, 蒋元春, 李栋梁, 等. 江淮梅雨对东亚副热带夏季风进程及海温异常的响应[J]. *气象科学*, 2020, 40(5): 669-678.
- CHEN Bing, JIANG Yuanchun, LI Dongliang, et al. Response of Meiyu in Jianghuai region on the process of East Asian subtropical summer monsoon and sea surface temperature anomaly[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2020, 40(5): 669-678.
- [21] TANG S L, LUO J J, HE J Y, et al. Toward understanding the extreme floods over Yangtze River valley in June-July 2020: role of tropical oceans [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(12): 2023-2039.
- [22] 蒲于莉, 冯娟, 李建平. 东部型 El Niño 事件发展期秋季对中国极端降水的影响[J]. *高原气象*, 2023, 42(6): 1457-1467.
- PU Y L, FENG J, LI J P. Influence of developing phase of eastern Pacific El Niño events on the autumn extreme precipitation in China [J]. *Plateau Meteorology*, 2023, 42(6): 1457-1467.
- [23] SUN B, WANG H J, WANG A H, et al. Regularity and irregularity of the seasonal northward march of the east asian summer wet environment and the influential factors[J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(2): 545-566.
- [24] WANG J, HE J H, LIU X F, et al. Interannual variability of the Meiyu onset over Yangtze-Huaihe River valley and analyses of its previous strong influence signal [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(4): 687-695.
- [25] 王婷, 李双双, 延军平, 等. 基于 ENSO 发展过程的中国夏季降水时空变化特征[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(3): 803-815.
- WANG Ting, LI Shuangshuang, YAN Junping, et al. Spatio-temporal variation of summer precipitation in China based on ENSO development process[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(3): 803-815.
- [26] 钱维宏, 朱江, 王永光, 等. 江淮梅雨和赤道太平洋区域海温变化的关系[J]. *科学通报*, 2009, 54(1): 79-84.
- QIAN W H, ZHU J, WANG Y G, et al. Regional relationship between the Jiang-Huai Meiyu and the equatorial surface-subsurface temperature anomalies [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(1): 79-84.
- [27] 王永光, 姜德君, 刘芸芸. 2020 年长江中下游梅汛期降水异常特征及其成因分析[J]. *暴雨灾害*, 2020, 39(6): 549-554.
- WANG Yongguang, LOU Dejun, LIU Yunyun. Characteristics and causes analysis of abnormal Meiyu rainfall in the middle and lower reaches of Yangtze River valley in 2020 [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2020, 39(6): 549-554.
- [28] LI H, SUN B, WANG H J, et al. Joint effects of three oceans on the 2020 super Meiyu [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2022, 15(1): 100127.
- [29] ZHANG S Y, LIU Y M, SHENG C, et al. Influence of boreal spring sea surface temperature anomalies over the tropical South Atlantic on the Meiyu onset [J]. *Climate Dynamics*, 2023, 60(11): 3613-3628.
- [30] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- WEI Fengying. *Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007.
- [31] 夏志明, 廖凯涛, 郭利平, 等. 基于 EOF 和 MK 趋势分析的赣江流域降水时空分布格局[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 223-233.
- XIA Zhiming, LIAO Kaitao, GUO Liping, et al. Spatiotemporal distribution pattern of precipitation in Ganjiang River Basin based on EOF and MK trend analysis [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5): 223-233.
- [32] XU X R, TIAN H Y, TIAN W S, et al. The spatiotemporal patterns of the upper-tropospheric water vapor over the Tibetan Plateau in summer based on EOF analysis [J]. *Journal of Climate*, 2022, 35(15): 5033-5051.
- [33] 马章怀, 王一博, 高泽永. 基于 EOF 的 1951—2020 年东亚季风区降水特征及其对夏季风不同配置的响应研究[J]. *高原气象*,

- 2024; 1-13. <https://link.cnki.net/urlid/62.1061.20240207.2142.006>.
- MA Z H, WANG Y B, GAO Z Y. An EOF-Based study of precipitation characteristics and their responses to different configurations of summer monsoon in the east Asian monsoon region from 1951 to 2020 [J]. *Plateau Meteorology*, 2024; 1-13. <https://link.cnki.net/urlid/62.1061.20240207.2142.006>.
- [34] 唐筱, 陶丽, 邓敏君. 华北—东北地区南部汛期降水影响因子分析及季节预报模型的建立[J]. *气象学报*, 2023, 81(5): 741-763.
- TANG X, TAO L, DENG M J. Screening of predictors and development of a statistical prediction model for flood-season precipitation in North—southern Northeast China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2023, 81(5): 741-763.
- [35] 戚佳晨, 宋晓猛. 1978—2012年长江三角洲城市群极端小时降水时空变化特征[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(12): 75-92.
- QI J C, SONG X M. Spatio-temporal changes of extreme hourly precipitation in the Yangtze River Delta urban agglomeration during 1978—2012 [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(12): 75-92.
- [36] SHI X R, YANG P, XIA J, et al. Effects of precipitation on vegetation and surface water in the Yellow River Basin during 2000-2021 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2024, 34(4): 633-653.
- [37] 周曾奎. 江淮梅雨[M]. 北京: 气象出版社, 1996.
- ZHOU Zengkui. *Jianghuai Meiyu* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1996.
- [37] 徐群. 121年梅雨演变中的近期强年代际变化[J]. *水科学进展*, 2007, 18(3): 327-335.
- XU Qun. Recent strong decadal change of Meiyu in 121 years [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(3): 327-335.
- [38] ZHU X, WU Z, HE J. Anomalous Meiyu onset averaged over the Yangtze River valley [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2008, 94(1): 81-95.
- [39] 梁萍, 丁一汇, 何金海, 等. 江淮区域梅雨的划分指标研究[J]. *大气科学*, 2010, 34(2): 418-428.
- LIANG Ping, DING Yihui, HE Jinhai, et al. A study of determination index of regional Meiyu over the Yangtze-Huaihe Basin [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 34(2): 418-428.
- [40] SUN B, WANG H J, ZHOU B T, et al. Interdecadal variation in the synoptic features of Mei-Yu in the Yangtze River valley region and relationship with the Pacific decadal oscillation [J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(19): 6251-6270.
- [41] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 梅雨监测指标; GB/T 33671—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of China. *Meiyu monitoring index; GB/T 33671—2017*. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [42] 姚飞, 杨秀芹, 刘慕嘉, 等. 江淮流域梅雨过程识别及梅雨期分级降水时空特征[J]. *地理科学进展*, 2023, 42(1): 145-160.
- YAO Fei, YANG Xiuqin, LIU Mujia, et al. Identification of Meiyu process and spatiotemporal characteristics of different precipitation levels during the Meiyu period over the Yangtze-Huai River Basin [J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(1): 145-160.
- [43] 姚飞, 杨秀芹, 刘慕嘉, 等. 江淮流域及其子区域梅雨监测时空数据集(1961—2020) [J/OL]. *全球变化数据仓储电子杂志(中英文)*, 2022, 9(10). <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.10.01.V1>.
- YAO Fei, YANG Xiuqin, LIU Mujia, et al. *Meiyu Monitoring Dataset over Yangtze-Huai River Basin (1961—2020)* [J/OL]. *Digital Journal of Global Change Data Repository*, 2022, 9(10). <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.10.01.V1>.
- [44] TAO L, Chen D. An evaluation of rotated EOF analysis and its application to tropical Pacific SST variability [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(15): 5361-5373.
- [45] 刘祥, 何军, 庞玥, 等. 重庆水流域夏季降水模态分析及其水汽输送特征[J]. *高原气象*, 2024, 43(2): 421-433.
- LIU X, HE J, PANG Y, et al. The analysis of summer precipitation modes and its characteristics of water vapor transportation in hydroelectric basins of Chongqing. *Plateau Meteorology*. 2024, 43(2): 421-433.
- [46] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 厄尔尼诺/拉尼娜事件判别方法; GB/T 33666—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of China. *Identification method for El Nino/La Nina events; GB/T 33666—2017* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

(责任编辑 王海锋)