

张剑明,叶成志,曾宇星,等,2021. 湖南春雨特征及异常成因分析[J]. 气象,47(12):1457-1468. Zhang J M, Ye C Z, Zeng Y X, et al, 2021. Characteristics of spring persistent rains in Hunan and its anomaly causes[J]. Meteor Mon, 47(12):1457-1468 (in Chinese).

## 湖南春雨特征及异常成因分析\*

张剑明<sup>1,3</sup> 叶成志<sup>2,3</sup> 曾宇星<sup>1,3</sup> 谢益军<sup>1,3</sup>

1 湖南省气候中心,长沙 410118

2 湖南省气象科学研究所,长沙 410118

3 气象防灾减灾湖南省重点实验室,长沙 410118

**提 要:** 确定了湖南春雨建立的上游西南风速关键区,定义了湖南春雨监测指标,分析了湖南春雨指标的时间变化特征及春雨的空间分布特征,探讨了湖南春雨强、弱年大气环流和水汽输送的异常及前期海温异常特征。结果表明,湖南春雨发生的时段气候平均为第 13~27 候,不同年份开始和结束的早晚不尽相同,湖南春雨量在 20 世纪 80 年代中期以前、2014 年以后偏多,20 世纪 80 年代中期至 2013 年偏少,空间分布表现为自东部、南部向西部、北部逐渐递减。全省一致偏多(偏少)型可以较好地表现湖南春雨的主要空间分布型特征。全省一致型强春雨年,西太平洋副热带高压明显偏强、偏西,印缅槽偏弱,低层风场在我国江南地区有异常气旋环流控制,湖南为异常气旋环流中心,导致春雨偏强;全省一致型弱春雨年,西太平洋副热带高压明显偏弱、印缅槽偏强,低层风场在西南地区东部至江南有一个异常反气旋,湖南为水汽异常辐散中心,导致春雨偏弱。El Niño 事件发展的次年,湖南春雨开始早、雨期长、雨量偏多、强度强;反之,La Niña 事件发展的次年,湖南春雨开始晚、雨期短、雨量偏少、强度弱。

**关键词:** 湖南,春雨,特征,环流异常,海温

**中图分类号:** P461, P463

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.12.003

## Characteristics of Spring Persistent Rains in Hunan and Its Anomaly Causes

ZHANG Jianming<sup>1,3</sup> YE Chengzhi<sup>2,3</sup> ZENG Yuxing<sup>1,3</sup> XIE Yijun<sup>1,3</sup>

1 Hunan Climate Centre, Changsha 410118

2 Institute of Meteorological Sciences of Hunan Province, Changsha 410118

3 Key Laboratory of Hunan Province for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Changsha 410118

**Abstract:** In this study, the key area of upwind southwest wind speed is established, which is closely associated with spring persistent rains in Hunan (SPRH). The monitoring indicators of SPRH from 1980 to 2014 are defined. The temporal and spatial patterns of SPRH rainfall are analyzed. Besides, the anomaly of the atmospheric circulations during the strong/weak SPRH period and sea surface temperature (SST) during the early period are discussed. Results show that the climate average of SPRH occurs from the 13th pentad to the 27th pentad, whereas the starting date and ending date of SPRH vary in different years. The rainfall of SPRH exceeded normal conditions during the periods before the mid-1980s and after 2014, but it was lower than normal conditions during the periods of the mid-1980s to 2013. The rainfall of SPRH decreased from south to north and from east to west in spatial distribution. The spatial pattern of more

\* 湖南省气象局 2020 年预报员专项(XQKJ20C011)、湖南省气象局第三期业务能力建设项目(NLJS04)和国家自然科学基金项目(42005058)共同资助

2020 年 12 月 25 日收稿; 2021 年 6 月 30 日收修定稿

第一作者:张剑明,主要从事气候诊断分析研究. E-mail: zhaolanxiao@sina.com

通讯作者:叶成志,主要从事暴雨预报预测技术研究. E-mail: yechengzhi\_hunan@hotmail.com

(less) precipitation in the whole province can show the main spatial distribution of SPRH. In the strong SPRH years in whole province, the Western Pacific subtropical high (WPSH) remarkably becomes stronger and westward, the Indo-Burmese trough tends to become weaker, and an anomalous anticyclone exists in the southern Yangtze River regions in low-level wind field. Hunan is located in the center of anomalous anticyclone, causing heavy SPRH. However, in the weak SPRH years, WPSH evidently becomes weaker, the Indo-Burmese trough tends to become stronger, and an anomalous anticyclone is found in southern China. Additionally, Hunan is located in the center of anomalous water vapor divergence, resulting in weaker SPRH in whole province. In the following year of the occurrence of El Niño events, SPRH starts earlier, persists longer and has more intensive rainfall amount compared with the normal years. On the contrary, during the following year of the occurrence of La Niña, SPRH starts later, has short rainy periods, lower rainfall amount and weaker rainfall intensity compared with the normal years.

**Key words:** Hunan, spring persistent rain, feature, circulation anomaly, sea surface temperature

## 引 言

每年春季位于长江中下游以南的江南春雨,是东亚独特的天气气候现象(万日金和吴国雄,2008)。江南春雨是中国乃至东亚地区最早出现的雨季(万日金和吴国雄,2006;胡雅君等,2017),通常指我国江南地区发生的持续低温阴雨天气,对该区域的春耕春播、交通造成不利的影响。江南春雨是南海夏季风爆发之前我国江南地区春季的一段持续而相对稳定的多雨期,它是除了初夏在长江中下游梅雨季节外的又一个多雨时段。江南地区春季降水年际变化非常大:2011年,长江中下游地区春雨异常偏少,较常年同期偏少5成以上,为近60年最少,出现近60年最重的冬春连旱,干旱使江河、湖泊、水库水位异常偏低,对水稻插秧、水产养殖业、水运及人们生活、生态环境产生较大影响(唐文苑,2011;李莹等,2012);而2014年5月,江南春雨异常偏多(侯威等,2015;蔡雪薇和张芳华,2014),共出现4次大范围强降水过程,其中5月21—26日的强降水过程降雨量大、影响范围广、局地强度强、灾害损失重,共造成福建、江西、湖南、广东、广西、贵州6省(自治区)405万人受灾,39人死亡或失踪,直接经济损失达61亿元。

20世纪50年代以来,我国很多气象工作者对江南春季连阴雨进行了广泛的研究(高由禧等,1962;中国科学院大气物理研究所二室,1977;吴宝俊和彭治班,1996;He et al,2003;Ding et al,2004;Lü et al,2006)。包澄澜(1980)将3—4月我国华南地区的多雨时段称为汛期雨季,Tian and Yasunari

(1998)提出春季持续降水的概念(spring persistent rains,中英文简称分别为江南春雨和SPR),将江南春雨作为气候事件提出,并指出西部中南半岛与东部的西太平洋至菲律宾之间的热力对比是导致江南春雨发生的成因。万日金和吴国雄(2006)认为从第13~27候发生于我国长江以南(30°N)、110°E以东、雷州半岛以北的我国中东部地区的持续性降水为江南春雨,并认为青藏高原在江南春雨的气候形成中起到了根本性的作用。王遵娅和丁一汇(2008)通过分析我国雨季的气候学特征,将第21~27候划分为江南春雨期,雨带主要位于23°~28°N的长江以南地区,江南春雨期属于西风带影响较强而季风影响较弱时期。刘宣飞和袁旭(2013)将南海季风爆发前(第28候)出现在长江以南、南岭以北地区的降水统称为江南春雨,并将第10~15候、第16~27候分为江南春雨期的两个阶段。张博等(2018)通过定义表征江南春雨变化特征的环流指数,并分析了该指数与降水和大气环流的关系。

也有气象工作者分析 ENSO 事件的不同类型、不同空间型及其年代际变化与我国江南春雨异常的关系。研究发现,在东部型 El Niño 事件衰减年,中国南方春季降水增多(伍红雨和吴瑶,2018)。大约有一半中部型 El Niño 事件增强中国南方春季降水,另一半则中国南方春季降水偏少,中部型 El Niño 事件对华南北部降水的影响主要取决于热带太平洋 SSTA 的位置(Jiang et al,2019)。Chen et al(2019)将 La Niña 划分为持续型、增强型和迅速衰减型三种类型发现,虽然中国东部春季的降水响应呈现出显著差异,但是三种类型 La Niña 衰减年春季我国江南地区均降水明显偏少。Xu et al

(2019)发现 1979—1995 年华南地区春季降水的年际变化强度大于 1996—2014 年,可能是 1995/1996 年前西太平洋的海表温度异常的幅度更大,西太平洋较冷(较暖)的 SSTa 触发异常的反气旋(气旋),其西北侧的异常西南风(北风)将更多(更少)的水汽输送至我国南方地区。Jia et al(2019)研究中国春季降水在 20 世纪 80 年代中期年际变化主导模态的年际变化发现,80 年代中期以前我国南方降水呈空间一致性分布,之后我国南方地区春季降水呈南北偶极子分布,这是因为后一阶段热带西太平洋海温负异常的持续时间更长,导致春季西北太平洋反气旋偏强并向东北延伸,造成沿异常反气旋西侧西南风将水汽输送到江南地区。

湖南是中国东部大陆雨季开始早、春雨比重大的省份之一,其多年平均春季降水量占全年降水量的 34.7%,其中中南部达 36%~40%(图 1a)。从春季降水量年际分布来看(图 1b),1992 年春季降水可占到全年降水的 45%以上,而少的年份只占了不到 30%(1982、1993、2007、2011、2015 年等),可见同为春雨,不同年份降水的时空分布相差甚多,其差别与春雨的范围、当年春雨开始的时间早晚、雨期长度、春雨强度有着直接的关系。而湖南春雨只是一个气候意义上的概念,对具体某一年来讲,春雨何时开始、何时结束、春雨强度如何,目前还没有形成一个明确的标准。江南春雨的建立是发生在冬春季大气环流的缓变过程中,是冬季雨型向夏季雨型的过渡(王遵娅和丁一汇,2008;李超,2009),缺乏标志性

环流形势的调整,这给江南春雨建立时间的确定带来一定的困难。本文通过定义湖南春雨(spring persistent rains in Hunan, SPRH),建立春雨监测指标,为区域春雨监测提供客观评估依据。通过研究春雨强、弱年同期环流异常及前期海温异常特征,可为湖南春雨业务预测提供参考信息。

## 1 资料与方法

本文所用资料包括湖南省 97 个地面气象站 1980—2019 年逐日降水数据,采用的资料均进行了严格的质量控制。再分析资料来源于美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  经纬网格的日再分析资料(Kalnay et al,1996),包括位势高度、纬向风、经向风、比湿和地面气压等,时间段为 1980—2019 年;美国国家海洋和大气管理局(NOAA)水平分辨率为  $2^\circ \times 2^\circ$  经纬网格的月平均海洋表面温度重建资料(Reynolds et al,2002),时间段同上。

采用梁建茵等(1999)对西南风风速定义的方法:

$$V_{sw} = -F \sin(\Phi + 45^\circ) = (u + v) / \sqrt{2}$$

式中: $F$  为风速, $\Phi$  为风向, $u$ 、 $v$  分别为经、纬向风速, $V_{sw}$  为平均风在西南—东北方向上的投影, $V_{sw} > 0$  时为西南风分量,以此来表征风向的转变及西南风的强度。

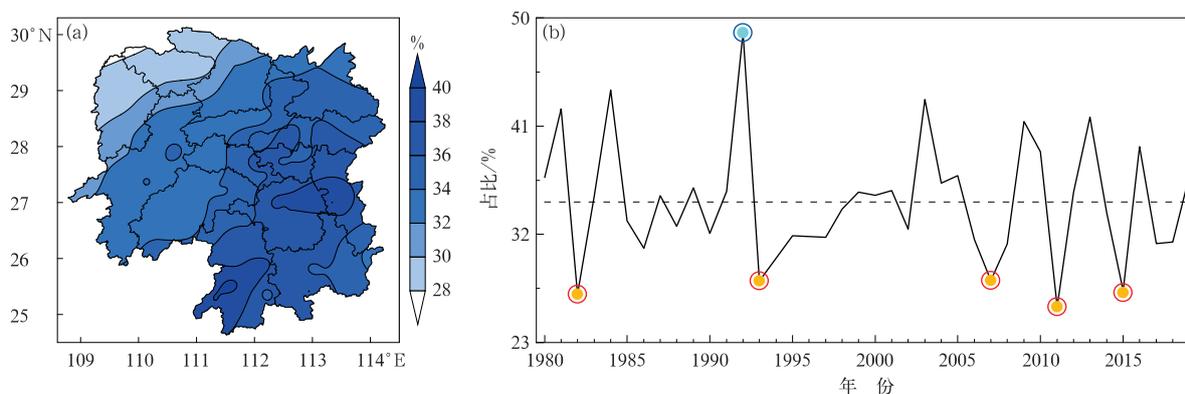


图 1 1980—2019 年湖南春季降水量在全年降水量的占比

(a) 多年平均空间分布,(b) 逐年变化

(蓝色、橙色圆圈分别表示占比超过 45%、低于 30% 的年份)

Fig. 1 The spring precipitation percentage in the annual precipitation in Hunan from 1980 to 2019

(a) spatial distribution of multiple-year mean, (b) temporal variation

(Blue and orange circles denote the years with spring precipitation accounting for more than 45%, less than 30% of annual precipitation, respectively)

采用经验正交分解方法(魏凤英,2007)分析湖南春雨的空间分布特征,采用小波分析方法(Torrence and Compo,1998;林振山和邓自旺,1999)分析湖南春雨指标的周期性。

本文气候平均态均采用 1980—2019 年的平均值。水汽整层积分由地表至 300 hPa(丁一汇,2005;Yi,1995)。

## 2 湖南春雨定义的确立

春雨的建立标志是干冷冬季结束,温暖春季开始,此时青藏高原南侧西南风风速增大,我国江南地区降水明显增加(万日金等,2008)。从 1980—2019 年湖南第 13~27 候总降雨序列与同期 850 hPa 风场及西南风风速相关(图 2)可以发现,降雨序列与 850 hPa 风场在中南半岛至我国南方地区存在显著的相关区域,降雨序列与 850 hPa 西南风风速在中

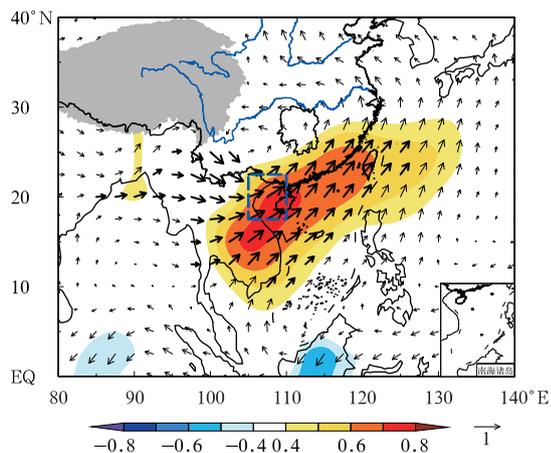


图 2 1980—2019 年湖南第 13~27 候降雨序列与同期 850 hPa 西南风风速的相关(填色), 及与 850 hPa 风场相关(矢量箭头)  
(蓝色虚线方框为湖南春雨上游西南风速区, 黑色粗箭头表示 850 hPa 风场通过显著性水平检验的区域,灰色区域为青藏高原)

Fig. 2 Correlation coefficient of the 13th—27th pentad rainfall in Hunan to 850 hPa southwest wind speed (colored), and with 850 hPa wind speed (vector arrows) from 1980 to 2019  
(Blue dotted box denotes upwind southwest area of SPRH, thick black arrows denote the area of 850 hPa wind speed having passed the significance test, gray area denotes the Qinghai-Tibet Plateau)

南半岛至我国东海地区的相关系数达到了 0.4 以上(通过 0.01 显著性水平检验),我国南海北部至华南南部地区的相关系数甚至达到了 0.6 以上。湖南春雨上游区域(17.5°~22.5°N、105°~110°E,图 2 蓝色虚线方框)的相关系数也在 0.6 以上,多年平均春雨期 850 hPa 风场图(图略)可以发现湖南春雨上游区域为西南风风速大值区,因此将该区域作为湖南春雨建立的关键区域。

选择每年从 2 月即全年第 7 候开始,当湖南候平均日降水量不小于 4 mm,同时其上游区域(17.5°~22.5°N、105°~110°E,图 2)850 hPa 候平均西南风速不小于 4 m·s<sup>-1</sup>,并且在紧接其后的 3 候中至少有 1 候满足上述条件(万日金和吴国雄,2008),则认为该候为湖南春雨建立的初始时间,即湖南春雨建立日期,由此得到反映湖南春雨建立早晚的时间指数。

南海夏季风是东亚季风的重要组成部分,南海夏季风的爆发标志着冬季环流向夏季环流的转变,也预示着东亚夏季风的来临和中国主雨季的开始(柳艳菊和丁一汇,2007)。因此可以认为南海夏季风爆发前一候为湖南春雨结束时间,由此得到反映湖南春雨结束早晚的时间指数。

湖南春雨建立和结束之间的时段为湖南春雨期,此期间的降雨总量即为湖南春雨量。

湖南区域春雨强度指数( $S_i$ )的计算公式为:

$$S_i = 0.5 \times \frac{R - R_0}{S_R} + 0.5 \times \frac{L - L_0}{S_L}$$

式中: $R$  为某一年春雨量(单位:mm), $R_0$  为历年春雨量的气候平均值, $S_R$  为春雨量的气候均方差, $L$  为某一年春雨期的长度(单位:d), $L_0$  为历年春雨期长度的气候平均值, $S_L$  为春雨期长度的气候均方差。

## 3 春雨的时空变化特征

### 3.1 春雨的时间变化

1980—2019 年湖南春雨开始、结束日期及长度时间序列(图 3a)表明,湖南春雨多年平均建立日期为第 13.3 候(3 月第 2 候),与气候平均第 13 候的西南风速和降水显著增长相对应,说明该指数判据的选取还是比较适当的;春雨多年平均结束日期为第 27.6 候(5 月第 3 候);春雨共经历了 16 候,春雨

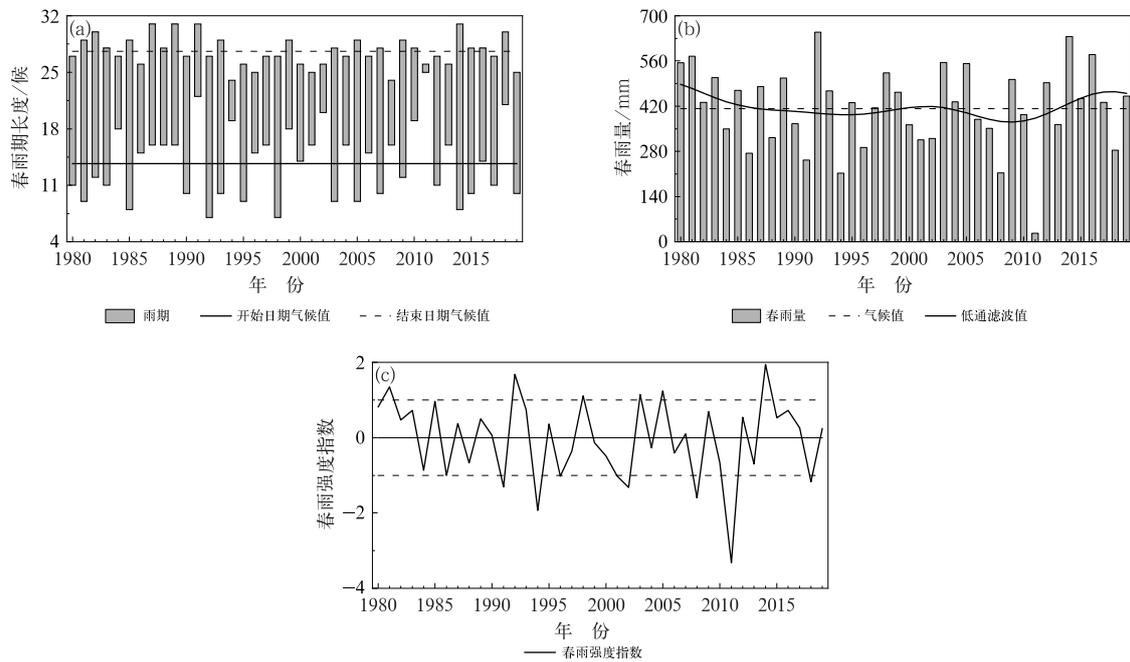


图 3 1980—2019 年湖南(a)春雨开始、结束、雨期长度,(b)春雨量,(c)春雨强度指数的逐年变化  
 Fig. 3 The time series of onset date, end date and duration (a), rainfall amount (b) and intensity index (c) of SPRH from 1980 to 2019

最早开始日期为第 7 候(1992 年、1998 年),最晚开始日期为第 25 候(2011 年);春雨期最短持续时间为 1 候(2011 年),最长持续时间为 24 候(2014 年)。可以发现,湖南春雨发生的时段气候平均为第 13~27 候,但不同年份开始和结束的早晚不尽相同。

1980—2019 年湖南春雨量的逐年变化(图 3b)表明,湖南春雨量在 26.4 mm(2011 年)~648.9 mm(1992 年),多年平均春雨量为 415.8 mm;20 世纪 80 年代中期、2014 年以后偏多,其余时段偏少,其中偏多年份有 1981、1992、2014、2016 年,偏少的年份有 1986、1991、1994、2008、2011、2018 年。

1980—2019 年湖南春雨强度指数的逐年变化(图 3c)表明,湖南春雨强度指数在 -3.37(2011 年)~1.98(2014 年),其中:强春雨年是 6 a、较强春雨年是 9 a、正常春雨年是 12 a、较弱春雨年是 5 a、弱春雨年是 8 a;弱春雨年均发生 1990 年以后,其中 20 世纪 90 年代是 3 a、21 世纪以后是 5 a。

### 3.2 春雨的周期变化

湖南春雨量存在 2~3、3~5、8~10 a 和 18 a 左右的振荡周期(图 4a),Morlet 小波功率谱表明(图 5a),2~3 a 振荡周期在 20 世纪 90 年代中期以前及 2005 年以后较显著,3~5 a 振荡周期在 20 世

纪 90 年代初至 2012 年较显著。

春雨期存在 2~3、4~5、8~10 a 和 18 a 左右的振荡周期(图 4b),其中 2~3 a 振荡周期整个研究时段均较显著,8~10 a 振荡周期在 2006—2011 年较显著(图 5b)。

春雨强度在本世纪初以前存在 2~3、4~5、10 a 和 18 a 左右的振荡周期,21 世纪初以后存在 2、8 和 18 a 左右的振荡周期(图 4c),其中 2~3 a 振荡周期在整个研究时段均较显著,4~5 a 振荡周期在 20 世纪 90 年代中期至 21 世纪初较显著(5c)。

### 3.3 春雨量的空间分布特征

1980—2019 年平均湖南春雨量的空间分布(图 6)表明,湖南多年平均春雨量为 292.9~569.8 mm,空间分布形态表现为自东部、南部向西部、北部逐渐递减,其中株洲、长沙、郴州、永州及益阳南部春雨量在 450 mm 以上,湘西州、张家界、怀化西部、常德西北部在 350 mm 以下。湖南春雨量存在 2 个高值区和 1 个低值区,高值区位于株洲中部、永州西南部,低值区位于湘西州北部。

### 3.4 春雨量的空间分布型

对 1980—2019 年湖南春雨进行 EOF 分解得到

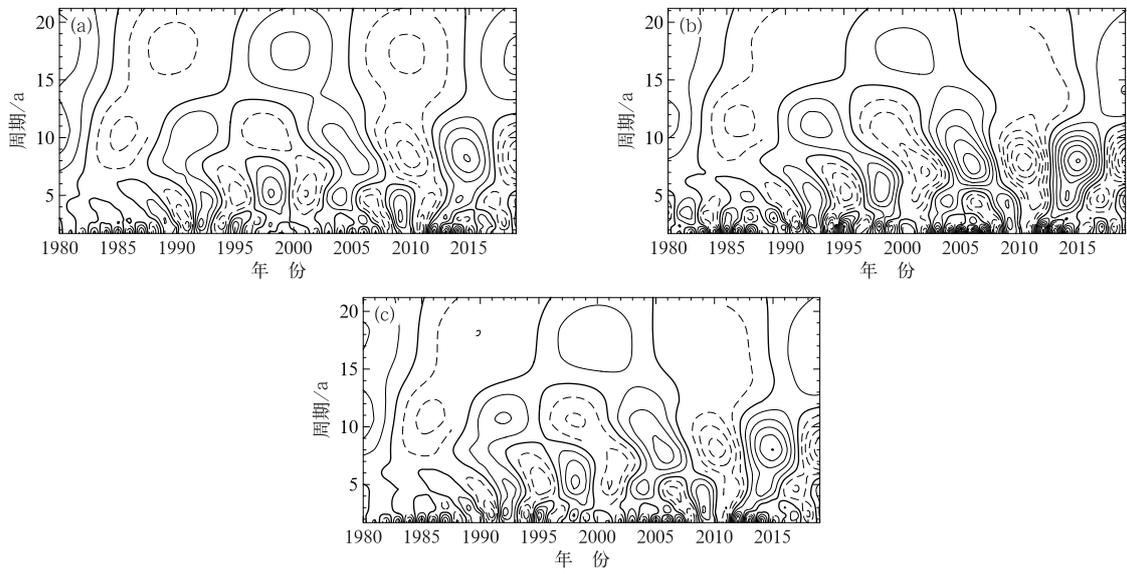


图 4 1980—2019 年湖南(a)春雨量,(b)春雨期,  
(c)春雨强度指数 Morlet 小波系数实部等值线分析

Fig. 4 The Morlet wavelet analysis of rainfall (a), length of rainy season (b) and intensity index (c) of SPRH from 1980 to 2019

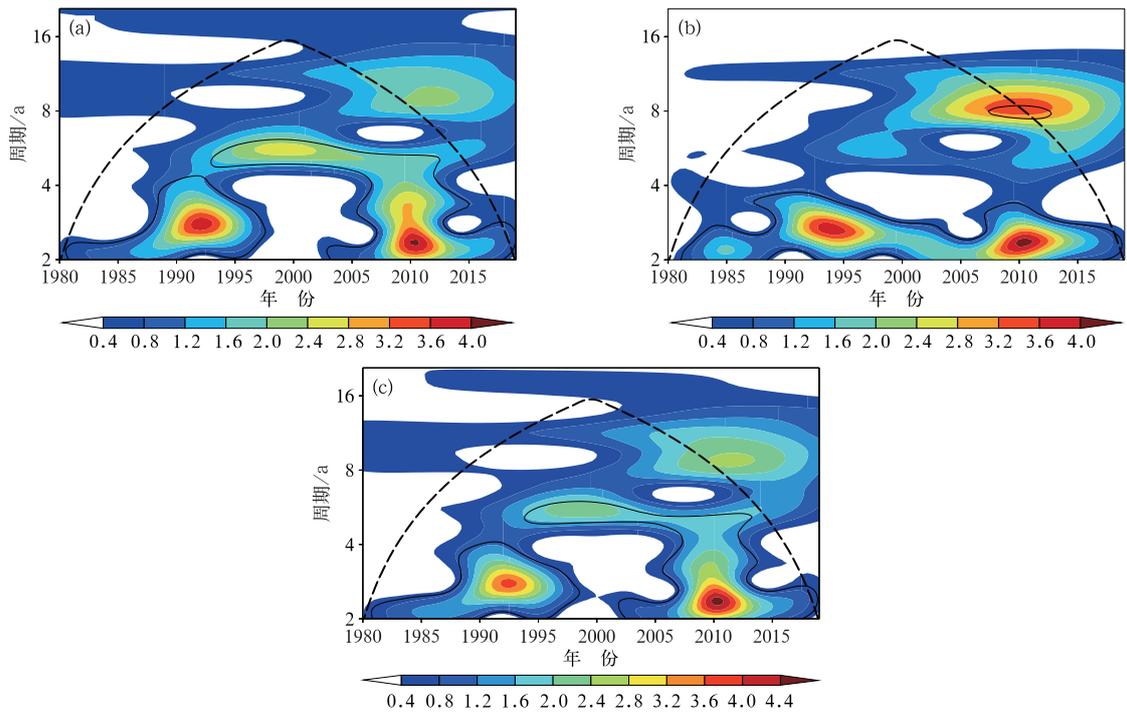


图 5 同图 4,但为 Morlet 小波功率谱分析

(黑实线表示通过 0.05 显著性水平检验,虚线以下区域表示去除边界效应的周期尺度)

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the Morlet wavelet power spectrum analysis

(Solid lines denote power spectrum having passed the 0.05 significant level test and regions below the dashed line denote the period scale after the removal of the boundary effect)

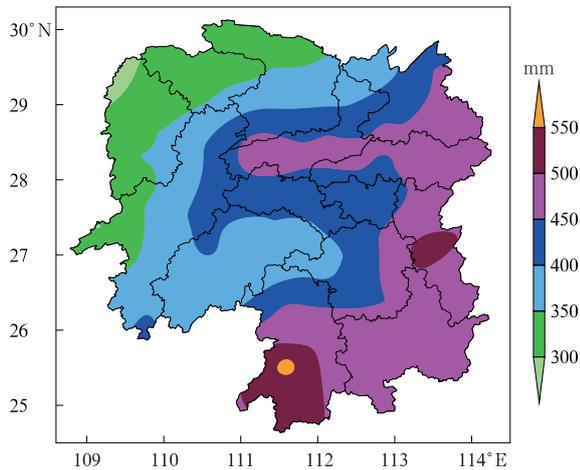


图 6 1980—2019 年湖南春雨量的多年平均空间分布  
 Fig. 6 Spatial distribution of multiple-year mean of the rainfall of SPRH from 1980 to 2019

前两个模态。第一模态(方差贡献为 70.1%)在湖南均为正值,表明湖南春雨具有较好的空间一致性,春雨量普遍偏多或偏少,其中第一模态正值的大值区主要分布在湘中以南地区(图 7a)。采用 1.2 倍标准差为基准,得到第一模态时间系数异常年份,其中 1981、1992、2014、2016 年超过 1.2 倍标准差,为全省一致强春雨型;1991、1994、2008、2011 年超过 -1.2 倍标准差,为全省一致弱春雨型(图 7b)。

第二模态(方差贡献为 10.1%)在湖南呈“北负南正”分布,零等值线基本沿湖南省中部一线分布(图 7c),说明湖南春雨呈南北反位相的关系,即南部偏多北部偏少或南部偏少北部偏多。采用 1.2 倍标准差为基准,得到第二模态时间系数异常年份,其中 1999、2002、2003、2015、2018 年超过 -1.2 倍标准差,为北部偏多型;1980、1996、2000、2019 年超过 1.2 倍标准差,为南部偏多型(图 7d)。

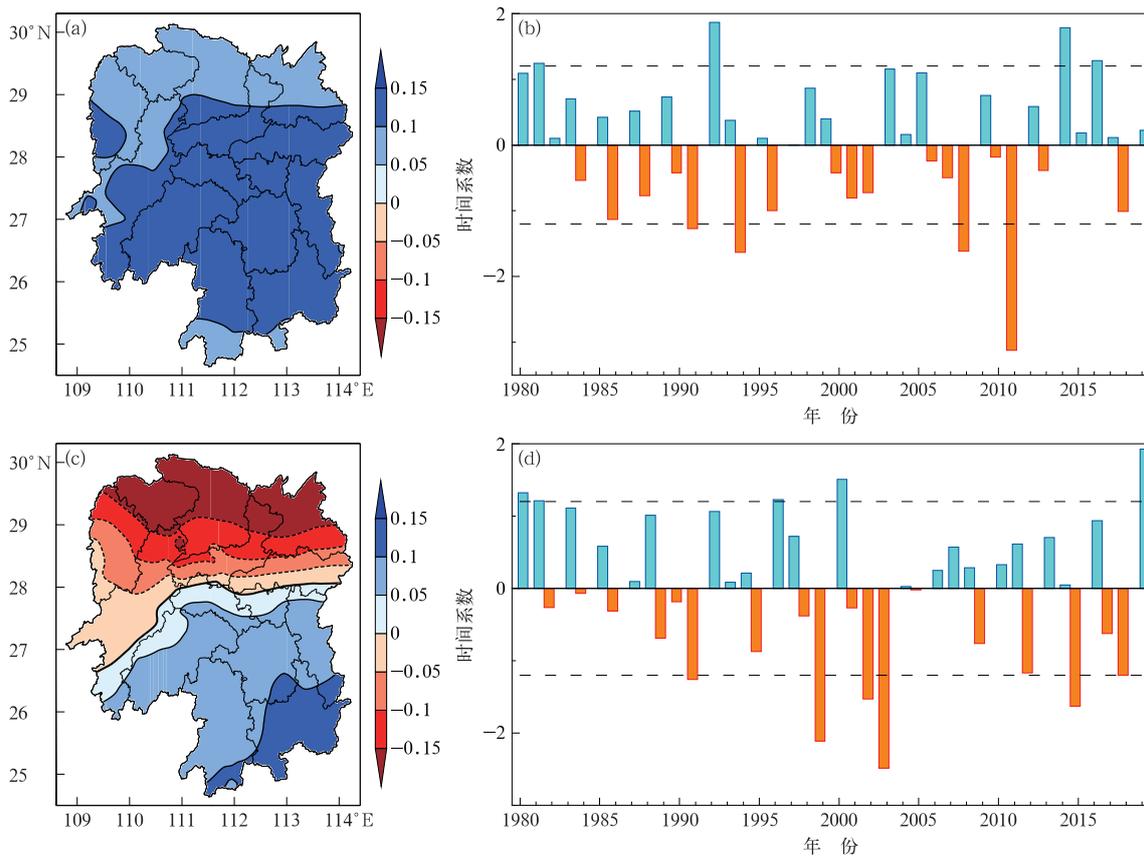


图 7 1980—2019 年湖南春雨量 EOF 分解的(a)第一空间模态及其(b)时间系数,和(c)第二空间模态及其(d)时间系数

Fig. 7 Spatial distribution (a, c) and corresponding time coefficients (b, d) of the first (a, b) and second (c, d) modes of EOF of SPRH rainfall amount from 1980 to 2019

由于第一空间模态的方差贡献率达到 70.1%，可以较好地表现湖南春雨的主要空间分布型特征，因此本文只对湖南全省一致强/弱春雨型的异常环流特征进行分析。

#### 4 春雨期环流及前期海温异常特征

大气环流异常变化是影响湖南春雨变化最直接、最重要的因素，海温变化通过海气相互作用导致大气环流异常进而影响湖南春雨的多寡。对前面通过 EOF 分析划分的湖南全省一致强、弱春雨年的大气环流(500 hPa 位势高度场、850 hPa 风场及整层水汽输送场等)进行合成分析，得到湖南强、弱春雨的环流异常特征，通过对湖南春雨指标与前期海温进行相关分析，得到不同海温异常分布型背景下的湖南春雨异常特征。

##### 4.1 春雨强弱年大气环流异常特征

大气环流异常是导致降水异常的最直接的原因(谭桂容等,2018),500 hPa 位势高度场能够较清晰地反映大气环流的异常特征(魏凤英等,2012),850 hPa 风场作为低层大气环流的代表可以反映大气环流的辐合辐散。从全省一致型强、弱春雨年 500 hPa 位势高度距平场和 850 hPa 风场距平场的合成(图 8)

可以看出,全省一致型强春雨年(图 8a),欧亚中高纬“西低东高”,长江以南至南海以北地区正高度距平相对偏低,其中江南南部至华南北部为负高度距平场控制,西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)较常年明显偏强、偏西。印缅槽涡度指数(Wang et al,2011)距平为-0.32,表明印缅槽较常年偏弱,850 hPa 风场异常表现为孟加拉湾、菲律宾以东洋面和我国东北地区为异常反气旋环流控制,在中南半岛至华南地区为明显的异常西南风控制,我国东北地区至黄海为异常偏北风控制,有利于偏东路的冷空气与西南暖湿气流在我国西南地区东部至江南地区汇合,西南地区东部至我国江南地区为异常气旋环流控制,湖南为异常气旋环流中心,导致春雨较常年明显偏多。

全省一致型弱春雨年(图 8b)500 hPa 位势高度距平场表现为中高纬为纬向环流控制,东亚地区“北正南负”分布,由河套地区至我国西南地区东部为正高度距平控制,西太副高较常年明显偏弱,印缅槽涡度指数距平为 0.53,表明印缅槽较常年偏强,850 hPa 风场异常表现为孟加拉湾和菲律宾以东洋面为异常气旋环流控制,我国东部地区为偏北风控制,在西南地区东部至江南西部有一个异常反气旋,不利于水汽输送,导致湖南春雨较常年明显偏少。

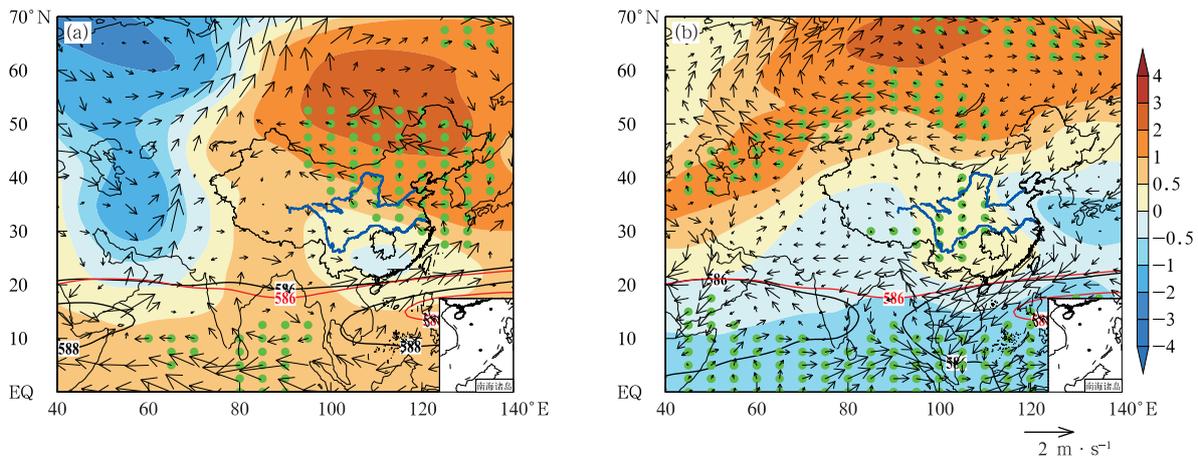


图 8 (a)强春雨年、(b)弱春雨年的 500 hPa 高度距平场(填色,单位:dagpm)和 850 hPa 风场距平场的合成(黑色粗线表示 588 dagpm 和 586 dagpm 线,红实线表示气候平均态 588 dagpm 和 586 dagpm 线,绿色圆点表示 500 hPa 高度距平场通过 0.05 显著性水平检验的区域)

Fig. 8 The strong (a) and weak (b) SPRH years composition of 500 hPa geopotential height anomalies (colored, unit: dagpm) and 850 hPa wind anomalies (Red solid lines indicate the average climate state of 586 and 588 dagpm lines, black solid lines indicate 586 and 588 dagpm lines, green dots indicate the 500 hPa geopotential height having passed the 0.05 significant level test)

我国南方地区的主要水汽来源包括来自孟加拉湾的水汽及西太副高西侧的西太平洋和南海的水汽,且对流层低层来自印度洋的水汽输送为最主要水汽来源(丁一汇和胡国权,2003;李淑萍等,2015;曲姝霖等,2021)。从强、弱春雨整层水汽输送距平及水汽通量散度异常场(图 9)可以看出,在强春雨年(图 9a)低纬地区的西南水汽较常年明显偏强,水汽分别经西南、正南输送路径将水汽输送东亚地区,在西南地区东部至东海形成一条异常水汽辐合带,导致上述区域降水偏多,而湖南处于异常水汽辐合带的辐合中心,导致降水较常年明显偏多。在弱春雨年(图 9b)我国东部地区为东北干冷气流控制,在西南地区东部至东海形成一条异常水汽辐散带,而湖南位于异常水汽辐散中心,导致春雨期降水偏少。

### 4.2 春雨与前期海温相关

海表热力异常尤其是热带海表热力异常,可通过影响大气环流的变化进而影响我国气候,被认为是影响我国天气气候异常的强信号(宗海锋等,2010;陈丽娟等,2013)。从湖南春雨监测指标与前冬海温相关(图 10)可以发现,各监测指标与前冬海温有非常好的一致性,当前冬赤道中东太平洋海温偏暖、赤道中东太平洋南北两侧海温偏冷时,春雨开始时间较常年偏早,春雨期较常年偏长,春雨量较常

年偏多,春雨强度较常年偏强。即:前期冬季 El Niño 事件发展,湖南春雨开始早、雨期长、雨量偏多、强度强,反之前期冬季 La Niña 事件发展,湖南春雨开始晚、雨期短、雨量偏少、强度弱。这表明湖南春雨强弱与 ENSO 异常紧密联系,这是由于前期冬季 El Niño 发展时,通过沃克环流在海洋性大陆激发出异常下沉运动及西北太平洋异常反气旋,该反气旋被认为是 El Niño 事件影响东亚气候异常的重要纽带(Zhang et al,1999),El Niño 通过风蒸发反馈机制激发西北太平洋异常反气旋(Wang et al,2000;Wang and Zhang,2002),西北太平洋异常反气旋(或气旋)、赤道沃克环流和北半球哈得来环流分别是联系 ENSO 与西太副高活动和东亚西风带纬向/经向型环流的重要环节(宗海锋,2017)。通过对前冬 Niño3.4 区海温指数与春雨期 500 hPa 高度场和 850 hPa 风场进行相关性分析(图 11)发现,在 500 hPa 高度场和 850 hPa 风场上中低纬度地区存在显著的正相关区,表明前期冬季平均 Niño3.4 区海温正指数时,春季西太副高加强西伸,西北太平洋和孟加拉湾存在反气旋环流,导致西太副高西侧、南侧的大量水汽通过异常西南风输送至我国江南地区(刘明竑等,2018;李海燕等,2016),有利于该地区持续性较强降水发生,导致湖南春雨偏早、春雨量偏多、强度偏强。

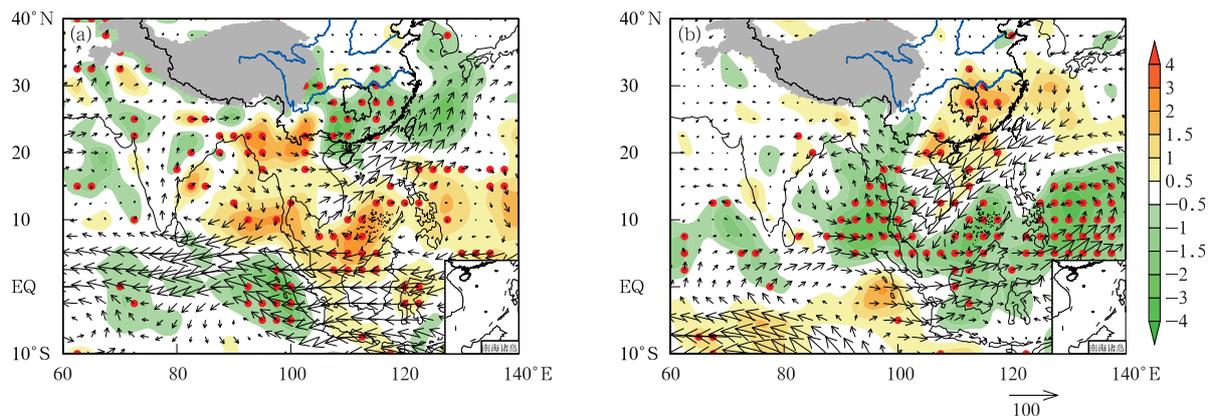


图 9 (a)强春雨年、(b)弱春雨年的整层水汽通量距平(矢量箭头,单位: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )和水汽通量散度异常场(填色,单位: $10^{-5} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )  
(红色圆点表示水汽通量散度通过 0.05 显著性水平检验的区域,灰色阴影为青藏高原)

Fig.9 The strong (a) and weak (b) SPRH years composition of vertically integrated water vapor flux anomalies (vector arrow, unit:  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ) and its divergence anomalies (colored, unit:  $10^{-5} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )

(Red dots indicate the vertically integrated water vapor flux divergence having passed the 0.05 significant level test, and gray area denotes the Qinghai-Tibet Plateau)

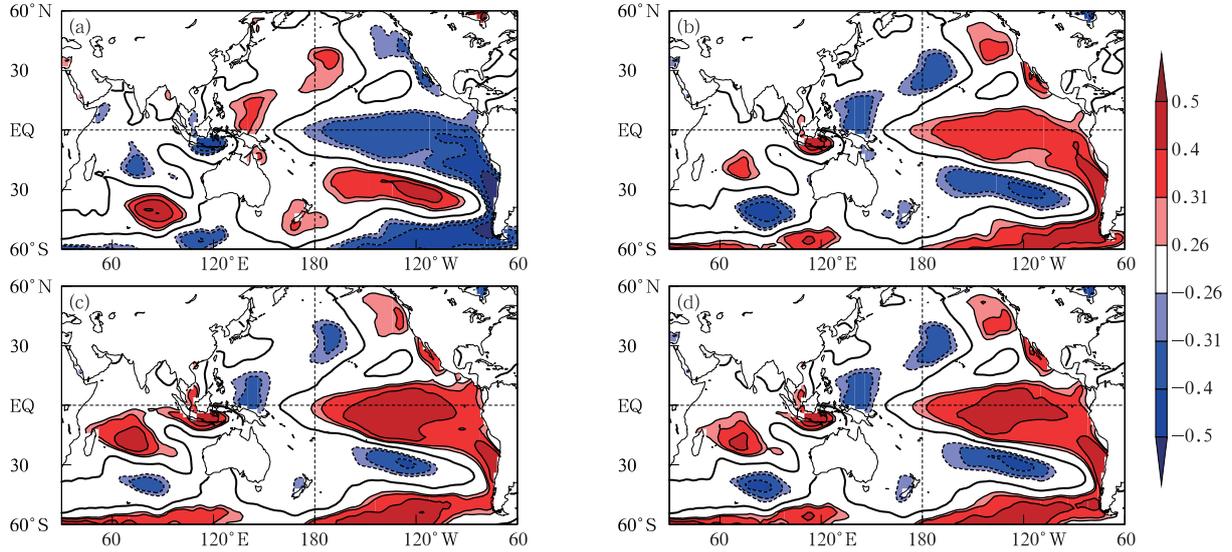


图 10 1980—2019 年湖南春雨指标与前冬海温的相关

(a) 春雨开始时间, (b) 春雨期, (c) 春雨量, (d) 春雨强度指数

Fig. 10 Distribution of correlation coefficient between the SPRH monitoring index and sea surface temperature (SST) in previous winter from 1980 to 2019

(a) onset date, (b) length of rainy season, (c) rainfall, (d) intensity index of SPRH

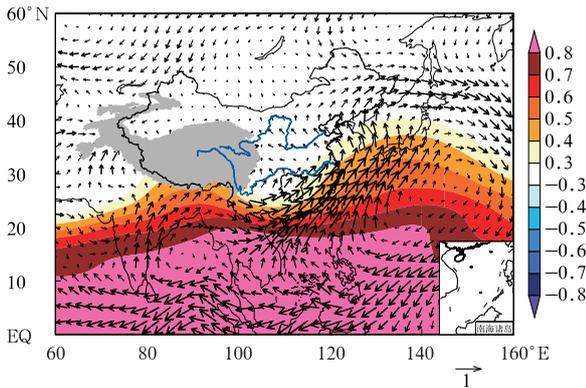


图 11 1980—2019 年前冬 Niño3.4 区海温指数与春雨期 500 hPa 高度场及 850 hPa 风场的相关

(黑色粗箭头表示 850 hPa 风场通过显著性水平检验的区域, 灰色区域为青藏高原)

Fig. 11 Correlation between Niño3.4 index in early winter and 500 hPa geopotential height field and 850 hPa wind in SPRH respectively from 1980 to 2019

(Thick black arrows denote the area of 850 hPa wind speed having passed the significant level test, and gray area denotes the Qinghai-Tibet Plateau)

### 5 结 论

本文采用湖南 97 个气象站点逐日降水资料, 结合再分析资料等, 确定了湖南春雨建立的上游西南风速关键区, 定义了湖南春雨监测指标, 分析了湖南春雨指标的时间变化特征及春雨的空间分布特征,

探讨了湖南春雨强、弱年大气环流和水汽输送的异常及前期海温异常特征, 主要得出以下结论:

(1) 确定了湖南春雨建立的关键区域为上游西南风速高相关区(17.5°~22.5°N, 105°~110°E), 定义了湖南春雨建立、春雨结束、春雨期、春雨量及春雨强度指数等监测指标。

(2) 湖南春雨发生的时段气候平均为第 13~27 候, 但不同年份开始和结束的早晚不尽相同。湖南春雨量在 20 世纪 80 年代中期以前、2014 年以后偏多, 20 世纪 80 年代中期至 2013 年偏少。湖南弱春雨年均发生 1990 年以后, 其中 20 世纪 90 年代发生 3 a、2000—2019 年发生 5 a。湖南春雨存在 2~3、3~5、8~10 a 和 18 a 左右的振荡周期。

(3) 湖南春雨量呈自东部、南部向西部、北部逐渐递减的空间分布形态, 全省一致偏多(偏少)型可以较好地表现湖南春雨的主要空间分布型特征。

(4) 全省一致型强春雨年西太副高明显偏强、偏西, 印缅槽偏弱, 低层风场在我国江南地区有异常气旋环流控制, 有利于水汽在上述区域辐合, 湖南为异常气旋环流中心, 导致降水较常年明显偏多; 全省一致型弱春雨年西太副高明显偏弱、印缅槽偏强, 低层风场在我国东部地区为偏北风控制, 在西南地区东部至江南西部有一个异常反气旋, 不利于水汽输送, 导致湖南降水较常年明显偏少。

(5) El Niño 事件发展的次年湖南春雨开始早、雨期长、雨量偏多、强度强, 反之 La Niña 事件发展

的次年湖南春雨开始晚、雨期短、雨量偏少、强度弱。这是由于前期冬季 El Niño 发展时,通过沃克环流在海洋性大陆激发出异常下沉运动及西北太平洋异常反气旋,导致西太副高西侧、南侧的大量水汽通过异常西南风输送至我国江南地区,有利于湖南春雨偏强。

## 参考文献

- 包澄澜,1980. 热带天气学[M]. 北京:科学出版社:130-132. Bao C L, 1980. Tropical Synoptic Meteorology[M]. Beijing: Science Press:130-132(in Chinese).
- 蔡雪薇,张芳华,2014. 2014 年 5 月大气环流和天气分析[J]. 气象, 40(8):1026-1032. Cai X W, Zhang F H, 2014. Analysis of atmosphere circulation and weather in May 2014[J]. Meteor Mon, 40(8):1026-1032(in Chinese).
- 陈丽娟,袁媛,杨明珠,等,2013. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展[J]. 应用气象学报, 24(5):521-532. Chen L J, Yuan Y, Yang M Z, et al, 2013. A review of physical mechanisms of the global SSTA impact on EASM[J]. J Appl Meteor Sci, 24(5):521-532(in Chinese).
- 丁一汇,2005. 高等天气学:第 2 版[M]. 北京:气象出版社. Ding Y H, 2005. Advanced Synoptic Meteorology[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 丁一汇,胡国权,2003. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究[J]. 气象学报, 61(2):129-145. Ding Y H, Hu G Q, 2003. A study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods[J]. Acta Meteor Sin, 61(2):129-145(in Chinese).
- 高由禧,徐淑英,郭其蕴,等,1962. 中国的季风区域和区域气候[M] //东亚季风的若干问题. 北京:科学出版社:49-63. Gao Y X, Xu S Y, Guo Q Y, et al, 1962. China's monsoon area and regional climate[M] // Some Problems of East Asian Monsoon. Beijing: Science Press:49-63(in Chinese).
- 胡雅君,刘屹岷,吴琼,等,2017. 影响江南春雨年际变化的前期海洋信号及可能机理[J]. 大气科学, 41(2):395-408. Hu Y J, Liu Y M, Wu Q, et al, 2017. Preceding oceanic influences on the inter-annual variation of spring persistent rain in Jiangnan of China and the possible mechanism[J]. Chin J Atmos Sci, 41(2):395-408(in Chinese).
- 侯威,邹旭凯,王朋岭,等,2015. 2014 年中国气候概况. 气象, 41(4):480-488. Hou W, Zou X K, Wang P L, et al, 2015. Climatic characteristics over China in 2014[J]. Meteor Mon, 41(4):480-488(in Chinese).
- 李超,2009. 江南春雨气候特征及形成机制的研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Li C, 2009. Research on the climatic characteristics of spring persistent rains in Jiangnan and its formation mechanism[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 李海燕,张文君,何金海,2016. ENSO 及其组合模态对中国东部各季节降水的影响[J]. 气象学报, 74(3):322-334. Li H Y, Zhang W J, He J H, 2016. Influences of ENSO and its combination mode on seasonal precipitation over Eastern China[J]. Acta Meteor Sin, 74(3):322-334(in Chinese).
- 李淑萍,侯威,封泰晨,2015. 近 52 年长江中下游地区夏季年代际尺度干湿变化及其环流演变分析[J]. 大气科学, 39(5):885-900. Li S P, Hou W, Feng T C, 2015. Decadal variation of summer dryness/wetness over the middle and lower reaches of the Yangtze River and the evolution of atmospheric circulation in the last 52 years[J]. Chin J Atmos Sci, 39(5):885-900(in Chinese).
- 李莹,高歌,叶殿秀,等,2012. 2011 年中国气候概况[J]. 气象, 38(4):464-471. Li Y, Gao G, Ye D X, et al, 2012. Climatic characters over China in 2011[J]. Meteor Mon, 38(4):464-471(in Chinese).
- 梁建茵,吴尚森,游积平,1999. 南海夏季风的建立及强度变化[J]. 热带气象学报, 15(2):97-105. Liang J Y, Wu S S, You J P, 1999. The research on variations of onset time of the SCS summer monsoon and its intensity[J]. J Trop Meteor, 15(2):97-105(in Chinese).
- 林振山,邓自旺,1999. 子波气候诊断技术的研究[M]. 北京:气象出版社. Lin Z S, Deng Z W, 1999. The Research on Wavelet Climate Diagnostic Technology[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 刘明竑,任宏利,张文君,等,2018. 超强厄尔尼诺事件对中国东部春夏季极端降水频率的影响[J]. 气象学报, 76(4):539-553. Liu M H, Ren H L, Zhang W J, et al, 2018. Influence of super El Niño events on the frequency of spring and summer extreme precipitation over eastern China[J]. Acta Meteor Sin, 76(4):539-553(in Chinese).
- 刘宣飞,袁旭,2013. 江南春雨的两个阶段及其降水性质[J]. 热带气象学报, 29(1):99-105. Liu X F, Yuan X, 2013. Two stages of spring persistent rains over southeastern China and the nature of precipitations[J]. J Trop Meteor, 29(1):99-105(in Chinese).
- 柳艳菊,丁一汇,2007. 亚洲夏季风爆发的基本气候特征分析[J]. 气象学报, 65(4):511-526. Liu Y J, Ding Y H, 2007. Analysis of the basic features of the onset of Asian summer monsoon[J]. Acta Meteor Sin, 65(4):511-526(in Chinese).
- 曲姝霖,苏涛,韩子轩,等,2021. 华南夏季降水两次年代际转折的水汽输送异常成因初探[J]. 大气科学, 45(2):273-286. Qu S L, Su T, Han Z X, et al, 2021. Preliminary research on moisture transport anomalies in two interdecadal changes in summer precipitation in South China[J]. Chin J Atmos Sci, 45(2):273-286(in Chinese).
- 谭桂容,范艺媛,牛若芸,2018. 江淮地区强降水分型及其环流演变[J]. 应用气象学报, 29(4):396-409. Tan G R, Fan Y Y, Niu R Y, 2018. Pattern classification of heavy rainfall in Jianghuai region and associated circulation[J]. J Appl Meteor Sci, 29(4):396-409(in Chinese).
- 唐文苑,2011. 2011 年 5 月大气环流和天气分析[J]. 气象, 37(8):1031-1037. Tang W Y, 2011. Analysis of the May 2011 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 37(8):1031-1037(in Chinese).
- 万日金,王同美,吴国雄,2008. 江南春雨和南海副热带高压的时间演变及其与东亚夏季风环流和降水的关系[J]. 气象学报, 66(5):800-807. Wan R J, Wang T M, Wu G X, 2008. Temporal variations of the spring persistent rains and SCS subtropical high and their correlations to the circulation and precipitation of the East

- Asia summer monsoon[J]. *Acta Meteor Sin*, 66(5): 800-807 (in Chinese).
- 万日金, 吴国雄, 2006. 江南春雨的气候成因机制研究[J]. *中国科学 (D辑地球科学)*, 36(10): 936-950. Wan R J, Wu G X, 2006. Mechanism of the spring persistent rains over southeastern China[J]. *Sci China D: Earth Sci*, 36(10): 936-950 (in Chinese).
- 万日金, 吴国雄, 2008. 江南春雨的时空分布[J]. *气象学报*, 66(3): 310-319. Wan R J, Wu G X, 2008. Temporal and spatial distribution of the spring persistent rains over southeastern China[J]. *Acta Meteor Sin*, 66(3): 310-319 (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).
- 魏风英, 2007. 现代气候统计诊断与预测技术: 第 2 版[M]. 北京: 气象出版社. Wei F Y, 2007. *Modern Technology of Climate Statistical Diagnosis and Prediction* [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 魏风英, 陈官军, 李茜, 2012. 中国东部夏季不同雨带类型的海洋和环流特征差异[J]. *气象学报*, 70(5): 1004-1020. Wei F Y, Chen G J, Li Q, 2012. Differences of oceanic and atmospheric circulation features among the rainfall-band patterns in summer in eastern China[J]. *Acta Meteor Sin*, 70(5): 1004-1020 (in Chinese).
- 吴宝俊, 彭治班, 1996. 江南岭北春季连阴雨研究进展[J]. *科技通报*, 12(2): 65-70. Wu B J, Peng Z B, 1996. Progress in persistent rainy processes in spring over areas between south of Changjiang River and North of Five Ridges[J]. *Bull Sci Tech*, 12(2): 65-70 (in Chinese).
- 伍红雨, 吴遥, 2018. 不同类型和强度的厄尔尼诺事件对次年华南前汛期降水的可能影响[J]. *大气科学*, 42(5): 1081-1095. Wu H Y, Wu Y, 2018. Possible impacts of El Niño events of different types and intensity on precipitation in the subsequent first rainy season in South China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(5): 1081-1095 (in Chinese).
- 张博, 金荣花, 赵滨, 等, 2018. 一个表征江南春雨的环流指数及其天气学特征[J]. *应用气象学报*, 29(2): 129-140. Zhang B, Jin R H, Zhao B, et al, 2018. A circulation index of the spring persistent rainfall in the south of the Yangtze and its synoptic characteristics[J]. *J Appl Meteor Sci*, 29(2): 129-140 (in Chinese).
- 中国科学院大气物理研究所二室, 1977. 春季连续低温阴雨天气的预报方法[M]. 北京: 科学出版社. Lab 2, The Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1977. *The Forecast Method of Spring Persistent Low-Temperature and Rains* [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- 宗海锋, 2017. 两个典型 ENSO 季节演变模态及其与我国东部降水的联系[J]. *大气科学*, 41(6): 1264-1283. Zong H F, 2017. Two typical ENSO seasonal evolution modes and their relations with rainfall over eastern China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 41(6): 1264-1283 (in Chinese).
- 宗海锋, 陈烈庭, 张庆云, 2010. ENSO 与中国夏季降水年际变化关系的不稳定性特征[J]. *大气科学*, 34(1): 184-192. Zong H F, Chen L T, Zhang Q Y, 2010. The instability of the interannual relationship between ENSO and the summer rainfall in China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 34(1): 184-192 (in Chinese).
- Chen S J, Zhu Z W, Ge Z A, et al, 2019. The diversity of La Niña decay and the corresponding spring and summer precipitation anomalies over eastern China[J]. *Int J Climatol*, 39(7): 3396-3411.
- Ding Y H, Li C Y, Liu Y J, 2004. Overview of the South China Sea monsoon experiment[J]. *Adv Atmos Sci*, 21(3): 343-360.
- He J H, Xu H M, Wang L J, et al, 2003. Climatic features of SCS summer monsoon onset and its possible mechanism[J]. *Acta Meteor Sin*, 17(S1): 19-34.
- Jia X J, You Y J, Wu R G, et al, 2019. Interdecadal changes in the dominant modes of the interannual variation of spring precipitation over China in the mid-1980s[J]. *J Geophys Res Atmos*, 124(20): 10676-10695.
- Jiang F, Zhang W J, Geng X, et al, 2019. Impacts of Central Pacific El Niño on Southern China spring precipitation controlled by its longitudinal position[J]. *J Climate*, 32(22): 7823-7836.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3): 437-471.
- Lü J M, Zhang Q Y, Tao S Y, et al, 2006. The onset and advance of the Asian summer monsoon[J]. *Chin Sci Bull*, 51(1): 80-88.
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al, 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate[J]. *J Climate*, 15(13): 1609-1625.
- Tian S F, Yasunari T, 1998. Climatological aspects and mechanism of spring persistent rains over central China[J]. *J Meteor Soc Japan*, 76(1): 57-71.
- Torrence C, Compo G P, 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 79(1): 61-78.
- Wang B, Wu R G, Fu X H, 2000. Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate? [J]. *J Climate*, 13(9): 1517-1536.
- Wang B, Zhang Q, 2002. Pacific-East Asian teleconnection. part II: how the Philippine Sea anomalous anticyclone is established during El Niño development[J]. *J Climate*, 15(22): 3252-3265.
- Wang T M, Yang S, Wen Z P, et al, 2011. Variations of the winter India-Burma trough and their links to climate anomalies over southern and eastern Asia [J]. *J Geophys Res Atmos*, 116(D23): D23118.
- Xu C, Qiao Y T, Jian M Q, 2019. Interdecadal change in the intensity of interannual variation of spring precipitation over Southern China and possible reasons[J]. *J Climate*, 32(18): 5865-5881.
- Yi L, 1995. Characteristics of the mean water vapor transport over monsoon Asia[J]. *Adv Atmos Sci*, 12(2): 195-206.
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M, 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China[J]. *Adv Atmos Sci*, 16(2): 229-241.