

刘芸芸,高辉,2021.2021 年春季我国气候异常特征及可能成因分析[J].气象,47(10):1277-1288. Liu Y Y, Gao H, 2021. Features and possible causes of climate anomalies in China in spring 2021[J]. Meteor Mon, 47(10):1277-1288(in Chinese).

2021 年春季我国气候异常特征及可能成因分析*

刘芸芸^{1,2} 高 辉¹

1 国家气候中心,中国气象局气候研究开放实验室,北京 100081

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044

提 要: 利用中国站点降水和气温资料、NCEP/NCAR 大气再分析资料和海温数据,总结了 2021 年春季(3—5 月)我国气候异常特征,并初步分析了其可能成因。2021 年春季全国平均气温为 11.6℃,为 1961 年以来第四暖,但 4 月我国中部地区出现阶段性气温偏低;全国平均降水量为 145.3 mm,接近常年同期,但季内阶段性变化显著,这与环流的阶段性调整密切相关。3—4 月亚洲中纬度环流为“东高西低”型,副热带高压偏弱偏东,有利于来自西北太平洋的水汽向长江以北输送,降水呈“北多南少”分布。5 月中纬度环流转变为“东低西高”型,副热带高压西伸北扩,低层西南暖湿气流增强,在江南、华南强烈辐合上升,为强对流天气的频繁发生提供了有利条件,降水调整为“南多北少”分布。此外 4 月中旬开始,中高纬阻塞活动逐渐频繁,一方面导致我国中部地区气温阶段性偏低,另一方面也是造成南方强对流天气发生的重要因素之一。春季后期环流出现明显调整与高低纬度环流相互作用及热带海温的演变有关。4 月中旬北极圈大气明显回暖,乌拉尔山高压脊增强,进而造成上述“东低西高”型环流异常;同时,随着 5 月热带印度洋的快速增暖,前期表现为对 La Niña 事件响应的东亚低纬度环流形势也出现明显调整,从而导致季内降水分布也发生了明显变化。

关键词: 春季气候异常,西太平洋副热带高压,La Niña,热带印度洋增暖

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.10.010

Features and Possible Causes of Climate Anomalies in China in Spring 2021

LIU Yunyun^{1,2} GAO Hui¹

1 Laboratory for Climate Studies, National Climate Centre, CMA, Beijing 100081

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,

Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Based on the precipitation and temperature data of national stations in China, NCEP/NCAR re-analysis and sea surface temperature data, the features and possible causes of climate anomalies in spring 2021 (March—April—May) in China are analyzed in this paper. In 2021, China experienced the fourth warmest spring since 1961 with an average temperature anomaly of 1.2℃, except that Central China was cooler than normal in April. The precipitation was near normal with a national average of 145.3 mm, but which the sub-seasonal periodic variation was quite significant, which is closely related to the periodic adjustment of circulation. From March to April, the mid-latitude circulation over Asia maintained an anomalous pattern of positive geopotential height (GPH) anomalies in the east of Lake Baikal but negative anomalies over the Ural Mountains. The Western Pacific subtropical high (WPSH) was weaker and further eastward than normal, which was conducive to water vapor transportation from the Northwest Pacific to the north of the Yangtze River, resulting in more precipitation in northern China but less precipitation in

* 广东省基础与应用基础研究重大项目(2020B0301030004)和国家自然科学基金项目(42175056)共同资助

2021 年 6 月 17 日收稿; 2021 年 8 月 26 日收修定稿

第一作者:刘芸芸,主要从事短期气候预测研究. E-mail:liuyuny@cma.gov.cn.

通讯作者:高辉,主要从事短期气候预测研究. E-mail:gaohui@cma.gov.cn

South China and Southwest China. However, the above patterns reversed in May, with positive GPH anomalies over the Ural Mountains and negative anomalies in Northeast Asia as well as the intensified and further northwestward WPSH. Correspondingly, the warm and humid southwesterly flow at lower-level strengthened, and the water vapor convergence and upward movement developed in southern China. This pattern was favorable for less precipitation in northern China while more precipitation in southern China, especially for frequent heavy rainstorms and severe convective weathers in the regions south of the Yangtze River. From mid-April, blocking activities in mid-high latitudes occurred frequently, causing a low-temperature anomaly in central China temporarily, and also becoming one of the important factors for the severe convective weather in southern China. The adjustment of atmospheric circulation in late spring is related to the interaction between high and low latitude circulation and the tropical SST evolution. In mid-April, the Arctic Area warmed up and the high ridge over the Ural Mountains strengthened, resulting in the above circulation transition in late spring. Meanwhile, with the rapid warming of the tropical Indian Ocean in May, the low latitude circulation situation in East Asia responding to the La Niña Event in the early stage was also significantly adjusted, thus leading to the significant variation in the distribution of sub-seasonal precipitation.

Key words: spring climatic anomaly, Western Pacific subtropical high (WPSH), La Niña, tropical Indian Ocean warming

引 言

我国是典型的季风气候,气候受季风影响很大。冬季我国大部主要受干冷的冬季风控制,而夏季则受来自热带暖湿的夏季风控制。春季是冬季风和夏季风更替的季节,时而来自北方的冷空气强,时而来自南方的暖湿气流强,两股势力此消彼长,导致春季气候变化较为剧烈,天气多变。当冷空气强时,北方容易出现大风降温甚至沙尘天气。当暖湿气流比较强时,气温则会相对较高,冷暖空气交汇的地方,就容易发生降水,甚至出现雷暴、冰雹、龙卷等强对流天气。此外,华南前汛期、江南春雨(Tian and Yasunari,1998;詹丰兴等,2013)以及南海夏季风的爆发(Tao and Chen,1987)等气候事件都在春季发生,从而造成春季复杂多变的区域气候特征。已有研究表明,我国春季气候具有显著的年际变化(邵懿等,2015;2016;龚志强等,2017;王遵娅等,2018;刘芸芸和陈丽娟,2019),而此时大多数地区正值农作物播种和生长期,因此春季的气候异常将对农业生产和人民生活造成重要的影响,有效地理解春季气候异常并做好预报服务有利于防灾减灾。

中国春季气候异常往往同时受中高纬和低纬大气环流系统的共同影响(Chen et al,2000;杨亚力等,2011;尹姗等,2013;王遵娅等,2018;刘芸芸和陈

丽娟,2019),而大气环流异常又与海洋和陆面等外强迫因子密切相关,如热带海温(Wu et al,2003;Hu et al,2012;袁媛等,2014;刘芸芸和陈丽娟,2019)、欧亚-青藏高原积雪(Wu and Kirtman,2007;左志燕和张人禾,2012;陈红,2017)、北极海冰(Wu et al,2016),等等。海洋由于其面积广且热容量大,尤其受到关注(Lau and Nath,2003;Liu et al,2013;2015;2019;顾薇和陈丽娟,2019)。研究表明,El Niño 盛期,华南春季降水显著偏多(Zhang and Sumi,2002;詹丰兴等,2013),同时也与北太平洋上的环流异常有密切联系(王林等,2011)。El Niño 期间,华北当年和来年春季降水往往偏多(王群英和龚道溢,1999)。另外,前期冬季印度洋海温与中国华北春季降水也有显著关系(顾伟宗等,2006)。

2020年8月开始热带中东太平洋上发生了一次新的 La Niña 事件,并于秋末冬初到达盛期(Zheng et al,2020;韩荣青等,2021)。2021年春季,La Niña 事件逐渐衰减,并于4月结束而转为中性状态。而热带印度洋海温在春季由前期的偏冷迅速转暖。在这样的海温异常配置下,2021年春季我国气温大范围偏高,降水空间差异大,旱涝灾害并重,强对流天气频繁且灾害损失重。本文将全面介绍2021年春季我国的主要气候异常特征,并从大气环流和海温外强迫的角度重点分析造成2021年春季我国气候异常的可能成因。

1 资料与方法

本文所用的资料包括:(1)国家气象信息中心整理的全国 2 400 个站的逐日气温和降水资料(任芝花等,2012);(2)美国国家环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)发布的 1951—2021 年的大气环流再分析资料(Kalnay et al, 1996),要素包括各层的气温、位势高度场、风场、垂直速度、比湿等,空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$; (3)美国 NOAA 提供的最优插值全球海温数据(OISSTv2.1; Reynolds et al, 2002),空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。文中春季指北半球春季(3—5 月平均),所有变量的气候态(常年)均为 1981—2010 年的平均,距平场去除的都是气候态的平均。本文所用的热带海温指数 Niño3.4 为($5^{\circ}S \sim 5^{\circ}N, 120^{\circ} \sim 170^{\circ}W$)区域平均的海表温度距平,热带印度洋海盆一致模(IOBM)指数为($20^{\circ}S \sim 20^{\circ}N, 40^{\circ} \sim 110^{\circ}E$)区域平均的海表温度距平(Chambers et al, 1999)。文中线性相关计算时间范围为 1981—2020 年,根据 t 检验标准,其 0.1、0.05 和 0.01 显著性水平对应的相关系数值分别为 0.26、0.31 和 0.40。

2 2021 年春季中国气候异常特征

2.1 气温

2021 年春季(3—5 月,下同),全国平均气温为 $11.6^{\circ}C$,较常年同期($10.4^{\circ}C$)偏高 $1.2^{\circ}C$,为 1961 年以来历史同期第四高(图 1)。与常年同期相比,全国大部地区气温较常年同期偏高 $0.5^{\circ}C$ 以上,其中东北地区及内蒙古大部、华北中西部、西北北部、江南东部、华南大部、西南地区中南部偏高 $1 \sim 2^{\circ}C$,局地偏高 $2^{\circ}C$ 以上(图 2a)。从春季逐月的气温距平

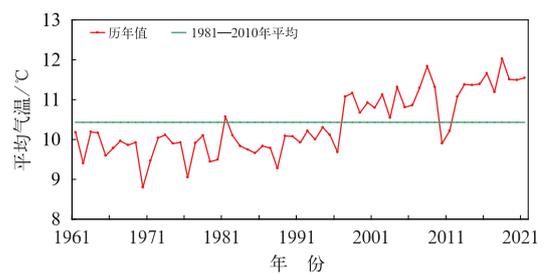


图 1 1961—2021 年春季全国平均气温历年变化
Fig. 1 Time series of air temperature averaged from March to May (MAM mean) in China during 1961—2021

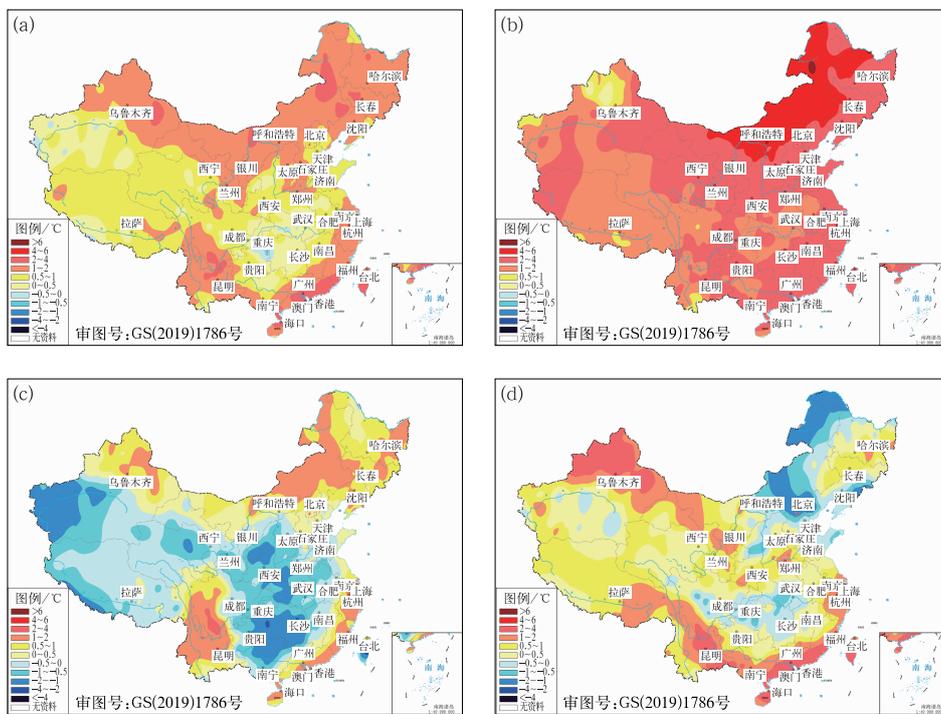


图 2 2021 年(a)春季和(b)3 月、(c)4 月、(d)5 月的全国平均气温距平分布
Fig. 2 Distribution of air temperature anomaly over China in (a) MAM, (b) March, (c) April, and (d) May 2021

分布可以看到,季节内的气温空间分布差异很大(图 2b~2d)。3 月,全国大部地区气温偏高 1~4℃,内蒙古中东部、黑龙江西部、吉林西部等地偏高 4~6℃(图 2b)。4 月我国中部大部地区气温偏低,其中华北西南部、黄淮大部、江淮西北部、江汉、江南西部、华南西部、西南地区东部、西北地区东部和中部、新疆西部、西藏西南部等地气温偏低 0.5~2℃,局部偏低 2~4℃;其余大部地区气温接近常年到偏高(图 2c)。5 月,气温偏低的范围明显缩小,仅在东北地区东南部、内蒙古中东部部分地区偏低 1~2℃,其余大部地区气温接近常年到偏高,其中江南东部、华南大部、云南大部、西藏东部、西北地区北部等地偏高 1~2℃,局部偏高 2℃ 以上(图 2d)。

2.2 降水

2021 年春季,全国平均降水量为 145.3 mm,接近常年同期(143.7 mm)(图 3)。降水空间分布不均,其中东北地区北部、内蒙古东北部和西部、山东半岛、江汉、江南、西南地区东南部、西藏中西部、西北地区大部和新疆中南部等地降水偏多 2 成至 2 倍,局地偏多 2 倍以上;而东北地区中南部、华北大

部、黄淮西部、华南南部、西南地区中南部、新疆西北部等地降水偏少 2~8 成,云南西部偏少 8 成以上(图 4a)。从春季逐月的降水分布来看,南北方旱涝转换明显:3 月,东北地区北部、华北大部、黄淮东部、江汉东部、西南地区东北部、西藏中部、新疆中部和北部等地偏多 5 成至 2 倍,部分地区偏多 2 倍以上;而东北地区西南部、江南南部、华南大部、西南地区南部、西北地区中西部、新疆西部等地偏少 2~8 成,云南大部、四川南部、贵州西部和新疆西部偏少

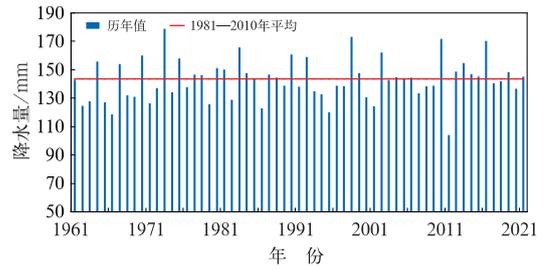


图 3 1961—2021 年春季全国平均降水量历年变化

Fig. 3 Time series of MAM mean precipitation in China during 1961—2021

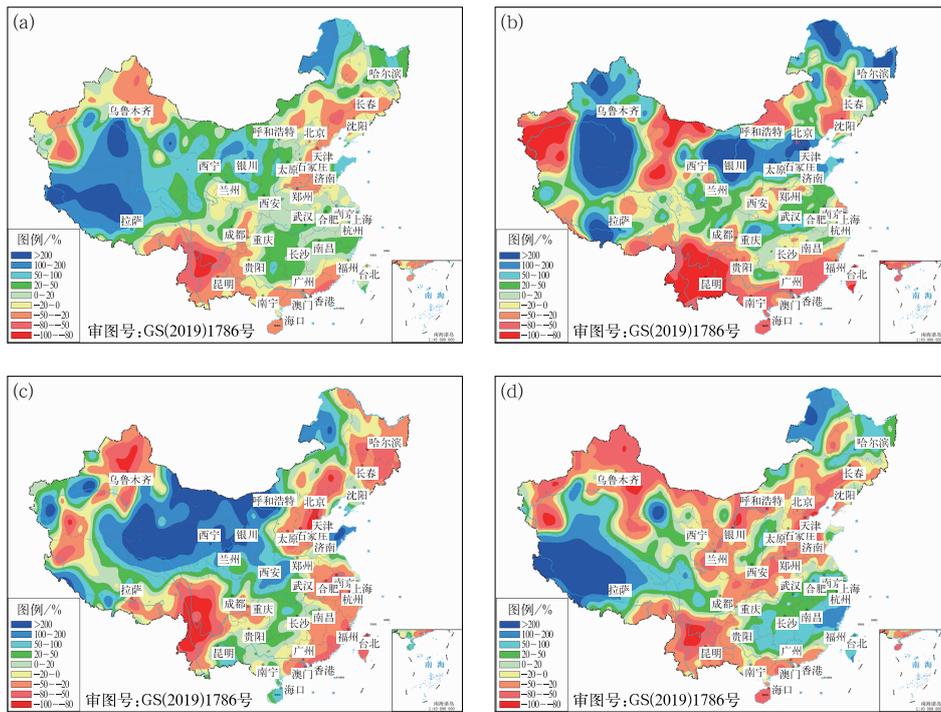


图 4 2021 年(a)春季、(b)3 月、(c)4 月和(d)5 月的全国降水距平百分率分布

Fig. 4 Distribution of rainfall anomaly percentage over China in (a) MAM, (b) March, (c) April, and (d) May 2021

8 成以上(图 4b)。4 月降水偏多的区域仍以北方为主,但偏多的中心较 3 月有所偏西;而我国东北、华北东部、江淮、江南东部、华南中东部、西南中西部和新疆北部降水偏少 2~8 成,云南西北部和四川南部仍偏少 8 成以上(图 4c)。5 月降水异常空间分布出现了明显调整,由前期的“北多南少”转变成“北少南多”分布,江淮南部、江南、华南北部、四川西北部和西藏大部降水偏多 2 成至 2 倍,部分地区偏多 2 倍以上,而北方大部地区降水偏少(图 4d)。

2.3 气象灾害

气温总体偏高和降水空间分布不均导致我国春季旱涝灾害并重。一方面,由于温高雨少,区域性、阶段性气象干旱明显(图 5)。3 月我国云南、江南南部、华南等地气象干旱发展(图 5a),4 月 4 日干旱地区最大中度以上干旱面积达到 104.9 万 km²,4 月 5 日重旱以上干旱面积为 63.3 万 km²(图 5d)。4 月 12 日之后,旱区降水明显增多,江南东南部、华南中东部等地气象干旱得到缓和,但云南、广东等地降水少,气象干旱维持或发展(图 5b)。5 月华北地区、东北地区南部旱情露头并发展,至 5 月 31 日,云南大

部、四川南部、广东西南部、海南、吉林西南部、辽宁西部、河北南部等地存在中度及以上气象干旱,四川南部、云南北部以及海南东北部重旱,局地特旱(图 5c)。另一方面,南方区域性暴雨过程频繁,多地河流水库水位超警。春季我国南方共出现 8 次区域性暴雨过程,其中有 6 次发生在 5 月。5 月 15—23 日,我国长江以南大部地区遭遇持续性强降水天气,累计降水量普遍超过 100 mm。5 月 30—31 日,华南大部遭遇强降雨天气,广东中东部出现暴雨到大暴雨,惠州、河源、汕尾和揭阳等局地特大暴雨。

春季后期,多个地区遭受强对流天气影响,4 月 30 日江苏沿江及以北地区遭受强对流天气袭击,南通局地风力达 13~15 级,对当地造成较大影响。5 月 14 日,湖北武汉市出现短时强降水、雷暴、大风、冰雹等强对流天气,局地出现龙卷风;江苏苏州市吴江区遭龙卷风袭击,中心最大风力为 17 级,造成人员伤亡,局部电力设施、多处房屋受损。

此外,2021 年春季我国北方还出现了 9 次沙尘天气过程,比 2011—2020 年同期平均(8.3 次)偏多 0.7 次。其中 3 月 13—18 日、3 月 27 日至 4 月 1 日为强沙尘暴天气过程,4 月 14—16 日、5 月 5—8 日

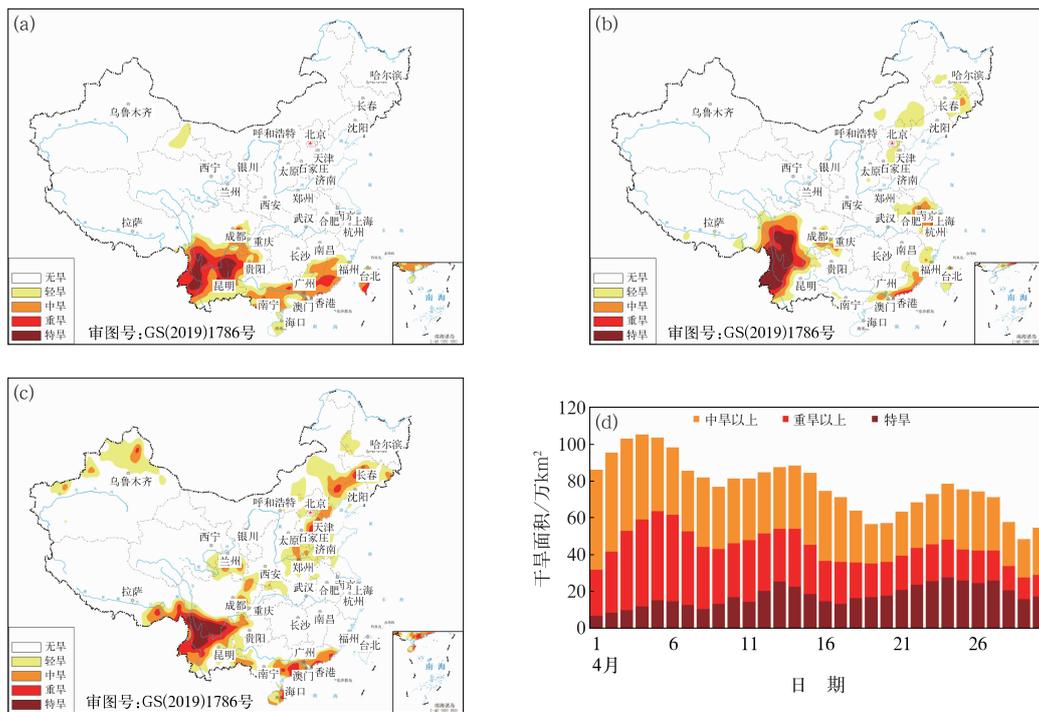


图 5 2021 年(a)3 月 31 日、(b)4 月 30 日和(c)5 月 31 日的全国气象干旱综合监测图及(d)4 月 1—30 日气象干旱面积变化

Fig. 5 Distribution of meteorological drought over China on (a) 31 March, (b) 30 April, and (c) 31 May, (d) variation of meteorological drought areas from 1 to 30 April 2021

为沙尘暴天气过程,其余 5 次为扬沙天气过程。华北以及内蒙古地区沙尘日数为 2003 年以来同期第二多(仅次于 2006 年)。

从上面的分析可以看到,无论是气温还是降水,春季气候季内变化都非常显著,造成灾害发生也具有明显的阶段性特点,这些与春季季内大气环流发生阶段性变化有关。下面将根据 2021 年春季气温和降水的季内异常变化特点,分阶段对大气环流和可能的强迫因子做进一步的成因分析。

3 2021 年春季气候异常的可能成因

3.1 大气环流异常特征

2021 年春季环流呈现显著的阶段性变化,这是春季作为东亚冬季风环流向夏季风环流的转换期所特有的表现。3—4 月,亚洲中纬度地区环流异常空间型基本呈现“东高西低”分布,即贝加尔湖以东至东亚的大部地区位势高度场较常年同期偏高,对应

东亚槽偏弱,而贝加尔湖以西的地区高度场偏低,从而有利于中西路冷空气活动。低纬度地区的西太平洋副热带高压(以下简称副高)较常年偏弱,位置偏东,使得东亚地区自南向北呈现“负—正—负”的异常分布(图 6a)。对应低层风场上,30°N 以南为显著的异常气旋性环流,而 30°N 以北为庞大的异常反气旋性环流(图 6c),这样的环流形势有利于来自西北太平洋的水汽向我国长江以北地区输送,与来自北方的中西路冷空气活动配合,从而导致我国 3—4 月北方大部降水偏多。另一方面,孟加拉湾北部为异常反气旋性环流,而长江以南大部处在异常气旋性环流西侧的偏北风控制下,使得向我国西南、华南地区的水汽输送条件也偏差,造成南方降水较常年同期明显偏少(Ding and Gao, 2020),西南和华南的气象干旱发展,华南前汛期开始时间较常年(4 月 6 日)偏晚 20 d。

5 月大气环流形势出现明显调整,亚洲中纬度地区环流转变为“东低西高”分布,我国东北、华北上空高度场偏低,有利于冷涡活跃及东路冷空气南下

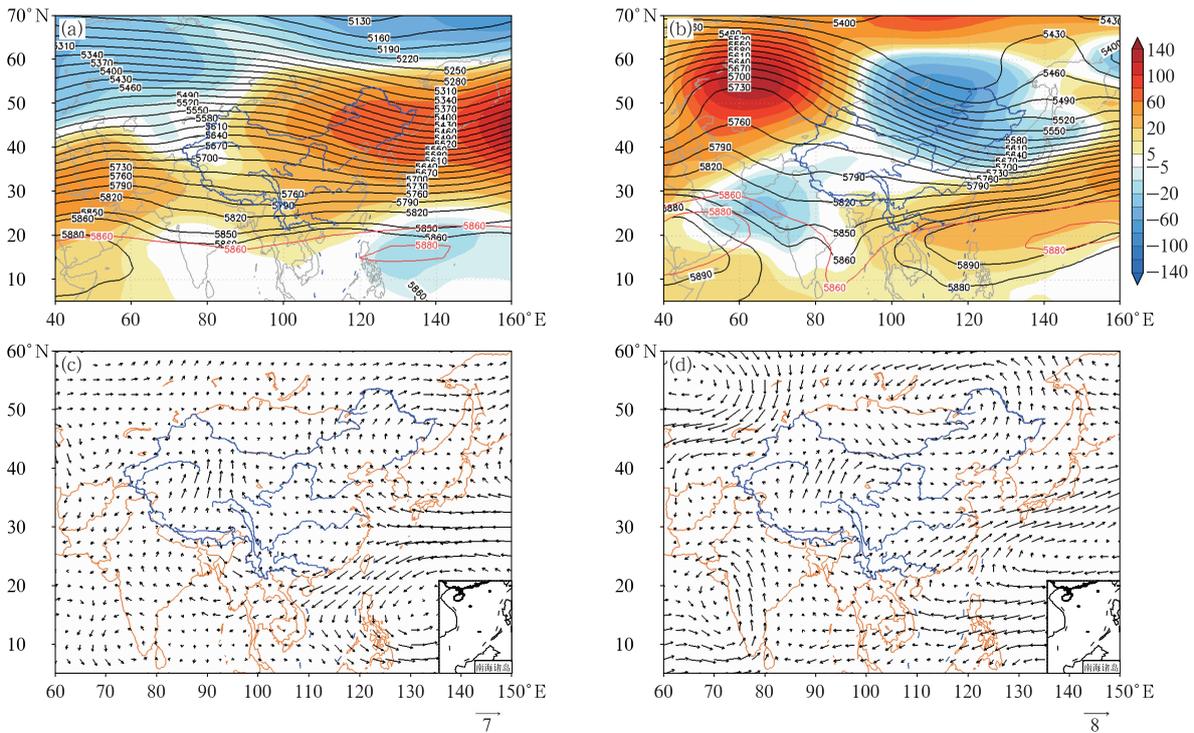


图 6 2021 年(a,c)3—4 月和(b,d)5 月的(a,b)500 hPa 位势高度场分布(等值线为原始场,填色为距平场,单位:gpm)及(c,d)850 hPa 距平风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 (a, b) 500 hPa geopotential height (contour for original fields and colored for anomalies, unit: gpm) and (c, d) 850 hPa horizontal wind anomalies (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) in (a, c) March—April and (b, d) May 2021, respectively

影响我国,同时造成东北和华北北部部分地区的气温偏低和降水偏多;低纬度地区副高较前期明显增强西伸,东亚地区自南向北转变为“正一负一正”的异常分布(图 6b),这也使得南方大部地区气温迅速升高,并较常年同期偏高 1~2℃,其中长江下游偏高 2℃以上。同时副高位置较常年同期偏北,对应低层风场上为明显的反气旋性环流(图 6d),有利于引导南海和西太平洋的暖湿气流到达江淮和江南地区(Ding et al,2020)。江淮和江南大部地区处于高温高湿的环境,在与来自北方的东路冷空气活动的有力配合下,为 5 月该区域强降水和强对流天气的频繁发生创造了有利的气象条件,同时华南北部的

气象干旱也得到缓解。另一方面,孟加拉湾仍然存在异常反气旋性环流,在其南侧为弱的偏东风距平,对应印度西南夏季风偏弱,输送到我国西南南部地区的水汽明显减弱,从而导致云南大部地区春季降水异常偏少,气象干旱持续发展。

图 7 进一步给出了春季南方关键大气环流系统的逐日演变特征,3—4 月副高总体偏弱,5840 gpm 线基本在 25°N 以南,其北侧的垂直上升运动弱,对应低层的西南气流和水汽辐合也不明显(图 7a)。5 月副高显著加强且北扩,5840 gpm 线最北达到 30°N,中心出现闭合的 5900 gpm 线,其北侧的垂直上升运动也明显加强。南方低空西南急流活跃,随

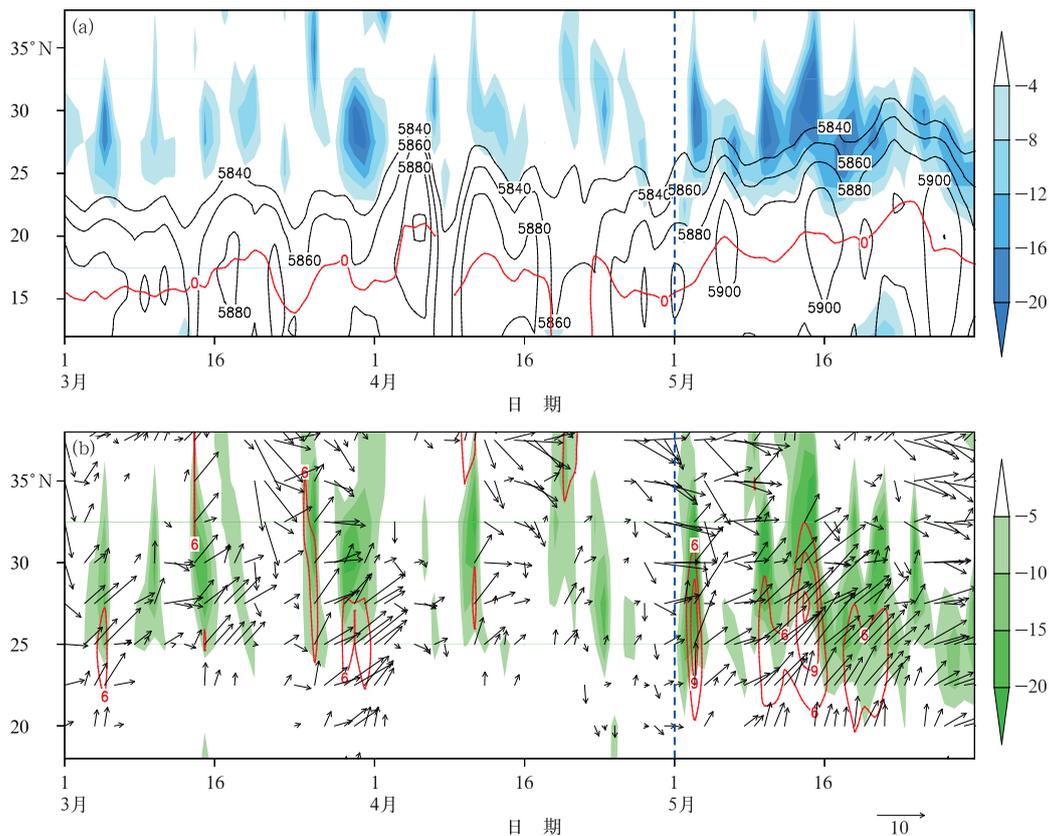


图 7 2021 年春季 110°~122.5°E 平均的逐日(a)500 hPa 位势高度(等值线,仅给出 5840 gpm 以上数值)、纬向风零线(红线,单位: $m \cdot s^{-1}$)与垂直上升运动(填色,单位: $10^{-2} m \cdot s^{-1}$),(b)850 hPa 经向风(等值线, $>6 m \cdot s^{-1}$)和矢量风(箭头,单位: $m \cdot s^{-1}$)及整层水汽通量散度(填色,单位: $10^{-5} kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)的时间-纬度剖面

Fig. 7 Daily time-latitude cross-sections along 110°–122.5°E of (a) the 500 hPa geopotential height (contour, only values higher than 5860 gpm), zonal wind with zero value (red line, unit: $m \cdot s^{-1}$) and vertical upward wind (colored, unit: $10^{-2} m \cdot s^{-1}$), and (b) the 850 hPa meridional wind (contour, $>6 m \cdot s^{-1}$), wind (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$), and divergence of the vertically integrated water vapor transport from surface to 300 hPa (colored, unit: $10^{-5} kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) in MAM 2021

着西南急流的加强,南风大值中心反复建立,并在其北侧形成经向风强梯度带,都为南方的强降水或强对流天气提供了有利的低层动力条件(图 7b)(刘芸芸和丁一汇,2020)。另一方面,低空西南急流也是强水汽输送带,它不仅将来自热带海洋的暖湿气流输送到我国南方,为强降水过程的形成提供必要的水汽条件和不稳定能量,而且西南急流北侧的南风经向强梯度带还促成了源自低纬地区的水汽在此区域的强烈辐合(图 7b),上升运动发展,促使其不稳定能量释放,为强对流的频繁发生提供了有利的气象条件。

相比于低纬地区环流的调整,欧亚中高纬地区的大气环流季内转换似乎要复杂一些。图 8 为春季欧亚中高纬阻塞高压(以下简称阻高)的逐日演变,它是造成中高纬大气环流异常的一个主要环流系统(Tibaldi and Molteni, 1990)。可以看到,3 月欧亚中高纬几乎没有阻塞活动;4 月中旬开始,中高纬阻塞活动开始逐渐频繁,主要以乌拉尔山阻高和鄂霍次克海阻高的形式表现,两者或此消彼长,或“双阻

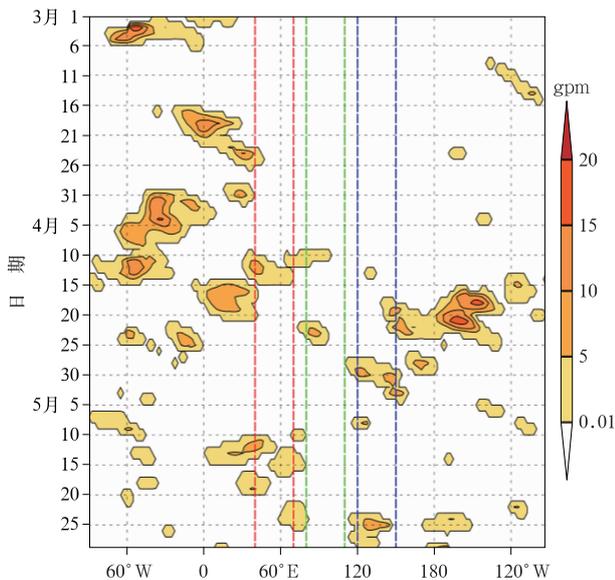


图 8 2021 年春季北半球中高纬度阻塞高压强度的时间-经度剖面(红色、绿色和蓝色虚线分别代表乌拉尔山、贝加尔湖和鄂霍次克海区域)

Fig. 8 Time-longitude cross-section of blocking strength in mid-high latitudes at 500 hPa level in the Northern Hemisphere in MAM 2021 (The red, green and blue dashed lines denote the Ural Mountains, the Lake Baikal and the Okhotsk Sea regions, respectively)

鼎立”(图 8)。当阻塞形势建立,中高纬环流经向度加大,则有利于来自于极区的冷空气自北向南影响我国。其中 4 月出现 4 次冷空气过程,较常年同期(2.9次)偏多,这也是 4 月我国中部大部地区气温偏低的直接原因。冷空气活动也是强降水和强对流天气发生的重要因素之一,它能够促成产生强降水所必须的低层辐合抬升(姚秀萍和于玉斌,2005)。冷空气南下,正好与低层一次次加强的西南暖湿水汽交汇(图 7),造成 5 月我国南方强降水强对流天气的频繁发生。

3.2 外强迫因子分析

大气环流的阶段性变化和异常受大气内部过程和外强迫因子的共同影响,其中来自海洋的外强迫可通过海气相互作用和大气波动的传播等方式引起大气环流及气候异常(Matsuno, 1966; Gill, 1980)。图 9 为 2021 年春季海表温度距平的分布及关键海区海温指数的逐月演变。可以看到,自 2020 年 8 月,赤道中东太平洋经历了一次中等强度的 La Niña 事件,并于 2021 年 4 月结束(图 9b)。5 月赤道中东太平洋仍然维持弱的冷水状态,而整个春季西太平洋暖池则明显偏暖(图 9a),使得该区域对流相对活跃,有利于热带对流辐合带(ITCZ)位置相对偏北(Chan, 2000; Chia and Ropelewski, 2002; Wang and Chan, 2002),因而导致菲律宾异常反气旋异常偏弱(Liu et al, 2021),副高位置也相应偏北(图 6a)。从春季西太副高脊线指数与前期逐月的关键海区海温指数的相关系数演变也验证,春季副高脊线与 3—5 月的 Niño3.4 指数相关关系最为显著,超过 0.05 显著性水平(图 10b)。这也进一步验证了当春季赤道中东太平洋海温偏冷,相对应的西北太平洋暖池偏暖,对流活跃,菲律宾反气旋异常偏弱,副高位置容易偏北,从而易导致我国北方降水偏多,而南方降水偏少。2021 年 3—4 月的大气环流和降水异常分布实况表现出对此次 La Niña 事件的响应。

与此同时,春季热带印度洋海温表现为偏暖的特征(图 9a),IOBM 指数(Chambers et al, 1999)自 2021 年 3 月开始由前期的负距平转为正距平,尤其在 5 月增暖迅速(图 9b)。印度洋暖海温的发展通过 Matsuno-Gill 响应(Matsuno, 1966; Gill, 1980)激

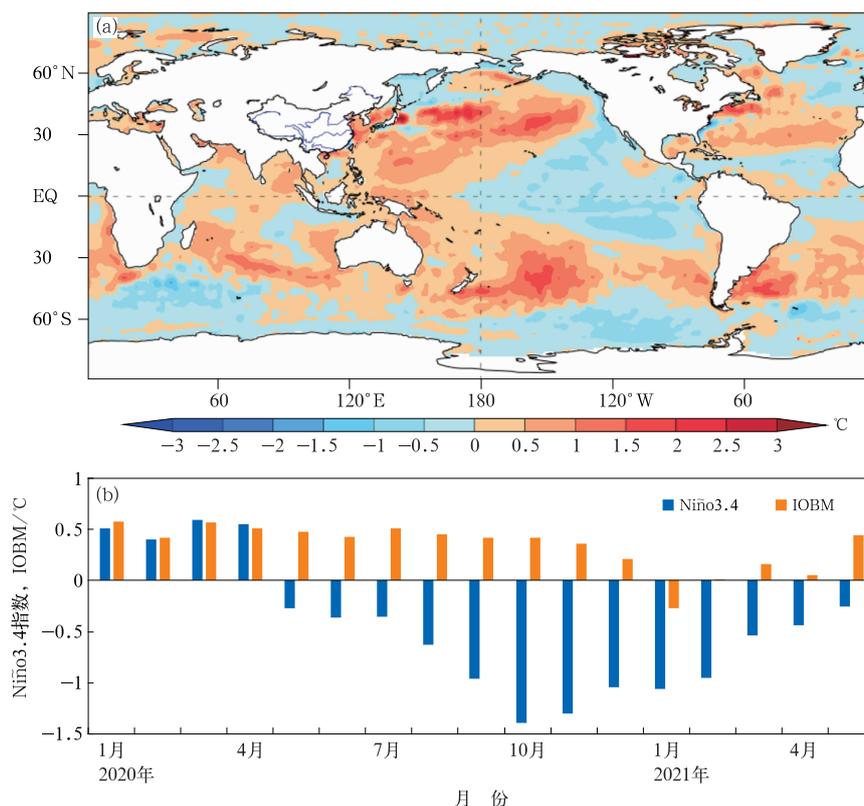


图 9 (a)2021 年春季全球海温距平场分布和(b)2020 年 1 月至 2021 年 5 月 Niño3.4 与 IOBM 海温指数的逐月变化

Fig. 9 (a) Distribution of the global sea surface temperature anomaly in MAM 2021, (b) time series of the monthly Niño3.4 and IOBM indices from January 2020 to May 2021

发 Kelvin 波,在孟加拉湾和南海分别产生异常的反气旋环流,该反气旋环流有利于副高的加强西伸(Yuan et al,2012)。5 月的低纬度大气环流系统就表现出对热带印度洋迅速增暖的响应,孟加拉湾和南海地区均存在较明显的反气旋性异常环流(图 6),有利于副高从 3—4 月的偏弱偏东转变为 5 月偏强偏西的特征。春季副高强度指数与前期逐月热带海温指数的相关也可以看到,随着时间的演变,春季 3—5 月 IOBM 指数与副高强度指数的正相关关系最为显著,超过 0.01 的显著性水平(图 10a)。由于副高强度和西伸脊点本身具有高相关性(刘芸芸等,2012),副高的西伸脊点指数与热带海温指数的相关与前者类似(图略)。即春季热带印度洋海盆整体偏暖时,副高容易偏强偏西。同时也注意到,相比热带印度洋海温异常,赤道中东太平洋的海温异常对西太副高强度的影响在逐渐减弱,这也进一步说明,今年 5 月低纬环流出现明显调整是热带印度洋海温的增暖起了重要作用。这与先前的研究结果也是一致的(Xie et al,2009;Liu et al,2013;袁媛等,2014;He

and Zhou,2015)。

而对于中高纬环流同样在春季季内也发生了明显变化,这似乎更像是大气内部过程相互适应的结果。从对极区的实况监测看到,北极地区 850 hPa 气温在 4 月上旬末开始从偏冷转为偏暖(图 11a),相应地,极区上空的位势高度场也出现调整,由前期的高低层一致的负位势高度场距平而转为中低层的正位势高度场距平(图 11b)。这些环流系统的调整时间节点与欧亚中纬度地区阻塞活动的阶段性活跃有很好的对应关系。但它们是通过怎样的物理机制相互联系,以及是否还有其他先兆信号对其产生影响,还值得进一步的深入分析。

4 结论与讨论

本文利用中国站点降水和气温资料、NCEP/NCAR 大气再分析资料和海温数据,总结了 2021 年春季我国主要气候异常特征,并初步分析了导致春季气候异常的可能成因。主要结论如下:

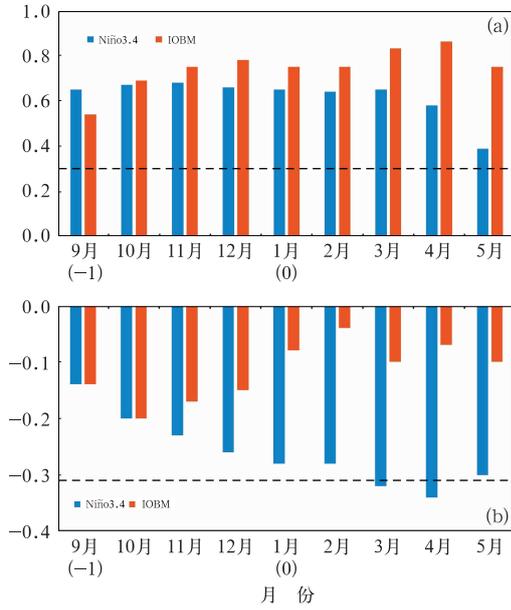


Fig. 10 1981—2020 年春季(a)西太副高强度指数和(b)脊线指数分别与前期海温指数的线性相关 [相关系数 ≥ 0.31 或 ≤ -0.31 表示通过 0.05 显著性水平检验,图中虚线所示;蓝色柱状代表与 Niño3.4 指数的相关,橙色柱状代表与 IOBM 指数的相关;横坐标中的(-1)表示超前一年,(0)表示同一年]

Fig. 10 Linear correlations of the MAM WPSH (a) intensity and (b) ridgeline indices with the tropical monthly SST indices during 1981—2020 [Correlation coefficients ≥ 0.31 or ≤ -0.31 pass the significant level of 0.05; the blue (orange) bars denote the correlation with Niño3.4 (IOBM); (-1) in the x -axis indicates the previous year, and (0) indicates the same year]

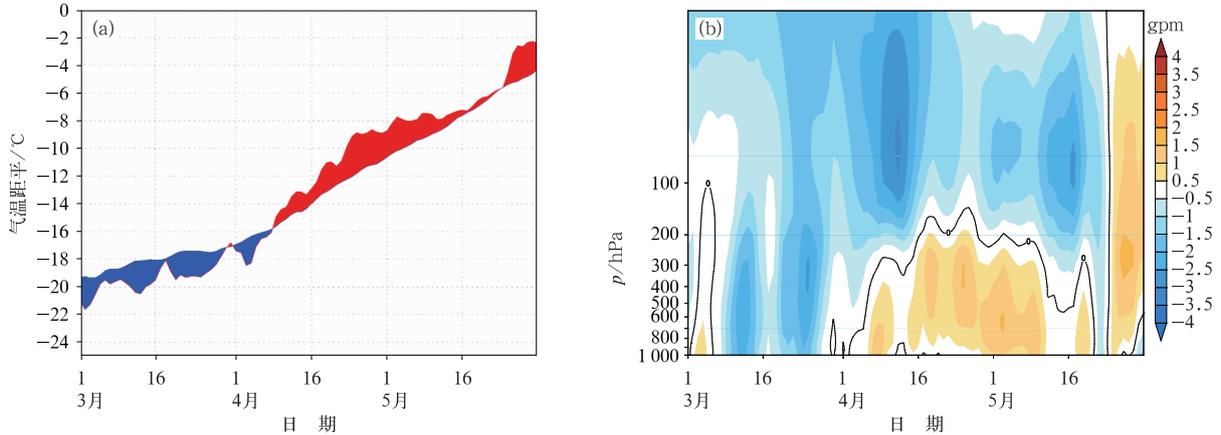


图 11 2021 年春季北极(65°~90°N)(a)850 hPa 气温距平(红色阴影表示正距平,蓝色阴影为负距平)的逐日演变,(b)北极上空位势高度距平的时间-高度剖面

Fig. 11 (a) Time series of 850 hPa air temperature anomalies (Red shadow indicates positive anomaly and blue shadow indicates negative anomaly) averaged in (65°—90°N), and (b) time-altitude cross section of geopotential height anomalies averaged in (65°—90°N) in North Pole in MAM 2021

2021 年春季(3—5 月,下同),全国平均气温为 11.6 °C,较常年同期偏高 1.2 °C,为 1961 年以来历史同期第四高;其中 4 月我国中部大部地区出现阶段性低温过程。全国平均降水量 145.3 mm,接近常年同期,但季内阶段性变化特征显著。3—4 月我国北方大部降水偏多,而江南南部、华南、西南南部降水明显偏少;5 月降水偏多的区域集中在江南、华南北部,而北方大部转为降水偏少。气温偏高和降水空间分布不均导致春季旱涝灾害并重。西南南部、华南南部气象干旱持续发展,5 月南方强降水强对流天气频发,北方多次出现大风沙尘天气过程。

春季季内环流阶段性特征显著,3—4 月亚洲中纬度环流异常空间型为“东高西低”型,副高较常年偏弱偏东,东亚地区自南向北呈现“负—正—负”的分布,有利于来自西北太平洋的水汽向我国长江以北地区输送,与来自北方的中西路冷空气活动配合,使得北方大部降水偏多。5 月环流形势出现明显调整,亚洲中纬度环流转变为“东低西高”型,副高明显增强西伸且北扩,东亚地区自南向北转变为“正—负—正”的分布,有利于引导南海和西太平洋的暖湿气流到达江淮和江南地区。低层西南暖湿气流增强,在江淮和江南大部地区强烈辐合,上升运动发展,促使其不稳定能量释放,为该区域强降水和强对流天气的频繁发生提供了有利的气象条件。另外,4 月中旬开始,中高纬阻塞活动开始逐渐频繁,有利于冷空气南下影响我国,其中 4 月出现 4 次冷空气过

程,较常年偏多,这也是我国中部大部地区气温阶段性偏低的直接原因。冷空气活动也是强降水和强对流天气发生的重要因素之一,当冷空气南下正好与低层反复加强的西南暖湿水汽交汇,则造成南方强降水的频繁发生。

春季大气环流的调整明显受到热带海温异常变化的影响。赤道中东太平洋的 La Niña 事件于 2021 年 4 月结束。3—4 月的东亚低纬度大气环流形势表现出对 La Niña 的响应。而随着 5 月热带印度洋的快速增暖,大气环流也出现明显调整,包括副高的增强西伸,及东亚的“正—负—正”的经向分布,从而导致春季季内的降水异常分布也发生了明显变化。春季中高纬度环流的调整出现在 4 月中旬,欧亚阻塞形势建立并逐渐活跃,这可能与极区的整体增暖和极区中低层位势高度距平场出现调整有关。

本文仅从大尺度环流和热带海洋外强迫信号分析了这些因子对春季基本气候特征的影响。值得关注的是,2021 年春季我国极端气候事件频频发生,例如我国南方地区持续的干旱、华南前汛期和西南雨季明显偏晚,北方强沙尘暴影响偏重等等,这些具体的极端事件国家气候中心目前已组织开展分析,其中的机理将在后续文章中揭示。

参考文献

- 陈红,2017. 欧亚大陆积雪对我国春季气候可预报性的影响[J]. 大气科学,41(4):727-738. Chen H,2017. Impacts of Eurasian snow condition on spring climate predictability over China by a global climate model[J]. Chin J Atmos Sci,41(4):727-738(in Chinese).
- 龚志强,宋文玲,王东阡,等,2017. 2017 年春季我国主要气候特征及其成因分析[J]. 气象,43(10):1296-1301. Gong Z Q,Song W L,Wang D Q,et al,2017. Features and causes for the climate anomalies in spring 2017[J]. Meteor Mon,43(10):1296-1301(in Chinese).
- 顾薇,陈丽娟,2019. 2018 年夏季海洋大气特征及对我国气候的影响[J]. 气象,45(1):126-134. Gu W,Chen L J,2019. Characteristics of atmospheric and oceanic condition and their influences on summer climate of China in 2018[J]. Meteor Mon,45(1):126-134(in Chinese).
- 顾伟宗,陈海山,孙照渤,2006. 华北春季降水及其与前期印度洋海温的关系[J]. 南京气象学院学报,29(4):484-490. Gu W Z,Chen H S,Sun Z B,2006. Spring precipitation in North China and its relation to SST of Indian Ocean in the preceding winter[J]. J Nanjing Inst Meteor,29(4):484-490(in Chinese).
- 韩荣青,石柳,袁媛,2021. 2020/2021 年冬季中国气候冷暖转折成因分析[J]. 气象,47(7):880-892. Han R Q,Shi L,Yuan Y. 2021. Analysis on the causes of cold and warm transition in China during the winter of 2020/2021[J]. Meteor Mon,47(7):880-892(in Chinese).
- 刘芸芸,陈丽娟,2019. 2019 年春季我国主要气候异常特征及可能成因分析[J]. 气象,45(10):1483-1493. Liu Y Y,Chen L J,2019. Features and possible causes for the spring climate anomalies in 2019[J]. Meteor Mon,45(10):1483-1493(in Chinese).
- 刘芸芸,丁一汇,2020. 2020 年超强梅雨特征及其成因分析[J]. 气象,46(11):1393-1404. Liu Y Y,Ding Y H,2020. Characteristics and possible causes for the extreme Meiyu in 2020[J]. Meteor Mon,46(11):1393-1404(in Chinese).
- 刘芸芸,李维京,艾祝秀,等,2012. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J]. 应用气象学报,23(4):414-423. Liu Y Y,Li W J,Ai W X,et al,2012. Reconstruction and application of the monthly Western Pacific subtropical high indices[J]. J Appl Meteor Sci,23(4):414-423(in Chinese).
- 任芝花,余予,邹凤玲,等,2012. 部分地面要素历史基础气象资料质量检测[J]. 应用气象学报,23(6):739-747. Ren Z H,Yu Y,Zou F L,et al,2012. Quality detection of surface historical basic meteorological data[J]. J Appl Meteor Sci,23(6):739-747(in Chinese).
- 邵颢,柳艳菊,李多,等,2015. 2015 年春季我国主要气候特征及其成因分析[J]. 气象,41(10):1292-1297. Shao X,Liu Y J,Li D,et al,2015. Main characteristics and possible causes for the climate in China in spring 2015[J]. Meteor Mon,41(10):1292-1297(in Chinese).
- 邵颢,柳艳菊,孙丞虎,等,2016. 2016 年春季我国主要气候特征及其成因分析[J]. 气象,42(10):1278-1282. Shao X,Liu Y J,Sun C H,et al,2016. Main characteristics and possible causes for the climate in China during the spring of 2016[J]. Meteor Mon,42(10):1278-1282(in Chinese).
- 王林,陈文,冯瑞权,等,2011. 北太平洋涛动的季节演变及其与我国冬春气候异常的联系[J]. 大气科学,35(3):393-402. Wang L,Chen W,Fong S K,et al,2011. The seasonal march of the North Pacific oscillation and its association with the interannual variations of China's climate in boreal winter and spring[J]. Chin J Atmos Sci,35(3):393-402(in Chinese).
- 王群英,龚道溢,1999. 华北降水资源的变化及其与厄尔尼诺的关系[J]. 自然资源学报,14(2):103-108. Wang Q Y,Gong D Y,1999. Variation of rainfall over North China and its possible connection to El Niño[J]. J Natrual Res,14(2):103-108(in Chinese).
- 王遵娅,柳艳菊,丁婷,等,2018. 2018 年春季气候异常及可能成因分析[J]. 气象,44(10):1360-1369. Wang Z Y,Liu Y J,Ding T,et al,2018. Features and possible causes for the climate anomalies in spring 2018[J]. Meteor Mon,44(10):1360-1369(in Chinese).
- 杨亚力,杜岩,陈海山,等,2011. ENSO 事件对云南及临近地区春末初夏降水的影响[J]. 大气科学,35(4):729-738. Yang Y L,Du Y,Chen H S,et al,2011. Influence of ENSO event on rainfall anomaly over Yunnan Province and its neighboring regions during late spring-early summer[J]. Chin J Atmos Sci,35(4):729-738(in Chinese).
- 姚秀萍,于玉斌,2005. 2003 年梅雨期干冷空气的活动及其对梅雨降水的作用[J]. 大气科学,29(6):973-985. Yao X P,Yu Y B,2005. Activity of dry cold air and its impacts on Meiyu rain during 2003 Meiyu period[J]. Chin J Atmos Sci,29(6):973-985(in Chinese).

- 尹姗,冯娟,李建平,2013.前冬北半球环状模对春季中国东部北方地区极端低温的影响[J].气象学报,71(1):96-108. Yin S, Feng J, Li J P, 2013. Influences of the preceding winter Northern Hemisphere annular mode on the spring extreme low temperature events in the north of eastern China[J]. Acta Meteor Sin, 71(1):96-108(in Chinese).
- 袁媛,柳艳菊,王艳姣,等,2014.2014年春季我国主要气候特征及成因简析[J].气象,40(10):1279-1285. Yuan Y, Liu Y J, Wang Y J, et al, 2014. Main characteristics and possible causes for the climate in China during the spring of 2014[J]. Meteor Mon, 40(10):1279-1285(in Chinese).
- 詹丰兴,刘芸芸,何金海,2013.江南春季降水的准2a振荡及其与热带海温异常的关系[J].地理科学,33(8):1006-1013. Zhan F X, Liu Y Y, He J H, 2013. Tropospheric biennial oscillation of the precipitation over Jiangnan area of China in MAM and its relationship with the tropical SST anomaly[J]. Sci Geogr Sin, 33(8):1006-1013(in Chinese).
- 左志燕,张人禾,2012.中国春季降水异常及其与热带太平洋海面温度和欧亚大陆积雪的联系[J].大气科学,36(1):185-194. Zuo Z Y, Zhang R H, 2012. The anomalies of spring rainfall in China and its relation with tropical Pacific SST and Eurasian snow[J]. Chin J Atmos Sci, 36(1):185-194(in Chinese).
- Chambers D P, Tapley B D, Stewart R H, 1999. Anomalous warming in the Indian Ocean coincident with El Niño[J]. J Geophys Res: Oceans, 104(C2):3035-3047.
- Chan J C L, 2000. Tropical cyclone activity over the Western North Pacific associated with El Niño and La Niña events[J]. J Climate, 13(16):2960-2972.
- Chen W, Graf H F, Huang R H, 2000. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon[J]. Adv Atmos Sci, 17(1):48-60.
- Chia H H, Ropelewski C F, 2002. The interannual variability in the genesis location of tropical cyclones in the Northwest Pacific[J]. J Climate, 15(20):2934-2944.
- Ding T and Gao H, 2020. The record-breaking extreme drought in Yunnan Province during spring and early summer of 2019 and possible causes[J]. J Meteor Res, 34(5):1-16.
- Ding Y H, Liu Y Y, Hu Z-Z, 2021. The record-breaking Meiyu in 2020 and associated atmospheric circulation and tropical SST anomalies[J/OL]. Adv Atmos Sci, [2021-04-06]. <https://doi.org/10.1007/s00376-021-0361-2>.
- Gill A E, 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 106(449):447-462.
- He C, Zhou T J, 2015. Decadal change of the connection between summer western North Pacific subtropical high and tropical SST in the early 1990s[J]. Atmos Sci Lett, 16(3):253-259.
- Hu Z Z, Kumar A, Jha B, et al, 2012. An analysis of warm pool and cold tongue El Niños: Air-sea coupling processes, global influences, and recent trends[J]. Climate Dyn, 38(9):2017-2035.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Amer Meteor Soc, 77(3):437-472.
- Lau N C, Nath M J, 2003. Atmosphere-ocean variations in the Indo-Pacific sector during ENSO episodes[J]. J Climate, 16(1):3-20.
- Liu Y Y, Ding Y H, Gao H, et al, 2013. Tropospheric biennial oscillation of the western Pacific subtropical high and its relationships with the tropical SST and atmospheric circulation anomalies[J]. Chin Sci Bull, 58(30):3664-3672.
- Liu Y Y, Hu Z Z, Kumar A, et al, 2015. Tropospheric biennial oscillation of summer monsoon rainfall over East Asia and its association with ENSO[J]. Climate Dyn, 45(7-8):1747-1759.
- Liu Y Y, Liang P, Sun Y, 2019. The Asian Summer Monsoon: Characteristics, Variability, Teleconnections and Projection[M]. Amsterdam: Elsevier:237.
- Liu Y Y, Wu R G, Ding Y H, 2021. Distinct East Asian precipitation variability and predictability in coupled and uncoupled El Niño events[J/OL]. Enviro Res Lett, [2021-08-18]. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac19de>.
- Matsuno T, 1966. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area[J]. J Meteor Soc Japan, 44(1):25-43.
- 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.
- Tao S Y, Chen L X, 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China[M]//Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. London: Oxford University Press.
- 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.
- Tibaldi S, Molteni F, 1990. On the operational predictability of blocking[J]. Tellus A: Dyn Meteor Oceanogr, 42(3):343-365.
- Wang B, Chan J C L, 2002. How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific[J]. J Climate, 15(13):1643-1658.
- Wu R G, Hu Z Z, Kirtman B P, 2003. Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in East Asia[J]. J Climate, 16(22):3742-3758.
- Wu R G, Kirtman B P, 2007. Observed relationship of spring and summer East Asian rainfall with winter and spring Eurasian snow[J]. J Climate, 20(7):1285-1304.
- Wu Z W, Li X X, Li Y J, et al, 2016. Potential Influence of Arctic Sea Ice to the interannual variations of East Asian spring precipitation[J]. J Climate, 29(8):2797-2813.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al, 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño[J]. J Climate, 22(3):730-747.
- Yuan Y, Yang S, Zhang Z Q, 2012. Different evolutions of the Philippine Sea anticyclone between the Eastern and Central Pacific El Niño: possible effects of Indian Ocean SST[J]. J Climate, 25(22):7867-7883.
- Zhang R H, Sumi A, 2002. Moisture circulation over East Asia during El Niño episode in northern winter, spring and autumn[J]. J Meteor Soc Japan, 80(2):213-227.
- Zheng F, Yuan Y, Ding Y H, et al, 2021. The 2020/21 extremely cold winter in China influenced by the synergistic effect of La Niña and warm Arctic[J/OL]. Adv Atmos Sci, [2021-02-12]. <https://doi.org/10.1007/s00376-021-1033-y>.