

伍红雨,吴遥,郭尧,2022. 2020—2021 年广东秋冬春干旱的成因分析[J]. 气象,48(6):783-793. Wu H Y, Wu Y, Guo Y, 2022. Cause analysis of drought in autumn, winter and spring in Guangdong from 2020 to 2021[J]. Meteor Mon, 48(6):783-793 (in Chinese).

## 2020—2021 年广东秋冬春干旱的成因分析\*

伍红雨<sup>1,2</sup> 吴 遥<sup>3</sup> 郭 尧<sup>4</sup>

1 广东省气候中心,广州 510641

2 中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值天气预报重点实验室,广州 510641

3 重庆市气候中心,重庆 401147

4 南方电网数字电网集团有限责任公司,广州 510663

**提 要:** 2020 年 10 月至 2021 年 5 月华南发生了秋冬春干旱,特别是广东发生干旱的持续时间和降水减少程度为近 58 年所罕见。利用广东 86 个国家气象观测站逐日降水、气温资料,NCEP/NCAR 和 NOAA 再分析资料,采用相关、合成分析的方法研究了 2020—2021 年广东秋冬春季大气环流和海温的异常特征,并探讨其与广东秋冬春干旱的关系。结果表明,2020—2021 年广东秋冬春干旱发生在降水偏少的气候背景下,与大气环流和海温的异常密切相关。在 2020—2021 年秋冬春季,北半球高层副热带西风急流减弱,中层东亚大槽南段明显减弱,西太平洋副热带高压脊线明显偏北,低层南支槽偏弱,影响广东的冷空气偏弱,广东处于水汽辐散区,北太平洋高压明显增强。2020 年 8 月至 2021 年 3 月赤道中东太平洋发生中等强度的拉尼娜事件,大气对拉尼娜事件有明显响应,Walker 环流增强,菲律宾附近上升运动明显,广东有下沉运动,导致在对流层低层热带西太平洋、南海、菲律宾附近存在气旋性异常环流,阻挡了孟加拉湾、南海的西南水汽向广东输送,同时气温显著偏高,温高雨少导致广东干旱发生。

**关键词:** 秋冬春干旱,成因,广东,大气环流,海温

**中图分类号:** P426

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.040801

## Cause Analysis of Drought in Autumn, Winter and Spring in Guangdong from 2020 to 2021

WU Hongyu<sup>1,2</sup> WU Yao<sup>3</sup> GUO Yao<sup>4</sup>

1 Guangdong Climate Center, Guangzhou 510641

2 Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA/Guangdong

Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, Guangzhou 510641

3 Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

4 China Southern Power Grid Digital Grid Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510663

**Abstract:** The drought occurred in autumn, winter and spring in South China from October 2020 to May 2021, especially in Guangdong, where the duration of drought and the degree of precipitation reduction were rare in recent 58 years. Using the daily precipitation and temperature data of 86 national meteorological stations in Guangdong, NCEP/NCAR and NOAA reanalysis data, this paper studies the abnormal characteristics of atmospheric circulation and SST in autumn, winter and spring in Guangdong from 2020 to 2021 by using correlation and synthesis analysis methods, and discusses its relationship with the drought

\* 2022 年度省级灾害及应急管理专项资金项目“2022 年应急风险分析与应急能力建设研究”、广东省气象局科技创新团队(GRMCTD202101)、中国气象局决策气象服务专项(JCZX2022007)共同资助

2021 年 7 月 12 日收稿; 2022 年 3 月 29 日收修定稿

第一作者:伍红雨,主要从事气候特征变化和机理研究. E-mail:492019784@qq.com

in autumn, winter and spring in Guangdong. The results show that the drought in autumn, winter and spring in Guangdong from 2020 to 2021 occurred under the climate background of less precipitation, and was closely related to the anomalies of atmospheric circulation and SST. In the autumn, winter and spring of 2020—2021, the high-level subtropical westerly jet in the Northern Hemisphere was weakened, the southern section of the Middle East Asia trough was significantly weakened, the ridge line of the Western Pacific subtropical high was significantly northward, the low level south branch trough was weak, the cold air affecting Guangdong was weak, Guangdong is in the water vapor divergence area, and the North Pacific high pressure was significantly enhanced. A La Niña event with moderate intensity occurred in the equatorial Middle East Pacific from August 2020 to March 2021, the atmosphere responded significantly to the La Niña event, the Walker circulation strengthened, the upward movement near the Philippines was obvious, and there was a downward movement in Guangdong, so that a cyclonic abnormal circulation formed near the tropical Western Pacific, the South China Sea and the Philippines in the lower troposphere. The cyclonic abnormal circulation blocked the transport of southwest water vapor from the Bay of Bengal and the South China Sea to Guangdong. At the same time, the temperature was significantly higher. At last, the high temperature and less rain led to the occurrence of drought in Guangdong.

**Key words:** drought in autumn, winter and spring, cause, Guangdong, atmospheric circulation, SST

## 引 言

广东地处低纬,属于亚热带、热带季风气候区,是我国降水最多的地区之一,但降水时空分布不均,有八成降水集中在汛期(4—9月),干湿季分明,导致广东区域性、阶段性干旱频繁发生,其中主要发生秋冬旱、冬春旱,也会发生秋冬春连旱(简茂球等,2008;林爱兰等,2010;廖要明和张存杰,2017)。广西北部、广东西部是中国南方干旱高风险区域(刘晓云等,2015)。干旱是威胁广东水稻生产的主要气象灾害之一,对早、晚稻产量影响大(王春林等,2014;陈慧华等,2016)。干旱在广东是仅次于台风、暴雨、低温的第四大气象灾害,干旱造成广东农作物受灾面积占总气象灾害造成受灾面积的 26.3%,仅次于台风(45.0%)(史丽等,2021)。干旱导致人民生活用水紧张、农作物受灾、江河湖库水位下降,森林火险等级高等,所以对广东干旱的研究不可忽视。

气象学者对干旱的研究主要是降水较少的北方(魏凤英和曹鸿兴,1998;马柱国,2005;马柱国等,2018;宋桂英等,2006;李新周等,2006;安莉娟等,2014;廖要明和张存杰,2017)和发生干旱频次高的华北、西南地区(晏红明等,2007;宋洁等,2011;黄荣辉等,2012;沈晓琳等,2012;王晓敏等,2012;胡学平等,2014;张顾炜等,2016;金燕等,2018)以及长江中下游等(张强等,2021)。对华南、广东干旱,气象学

者也进行研究并得到一些有意义的结果,但相对北方和西南的干旱研究少很多。华南在一些年份干旱严重,如 1963 年华南大旱,1990—2004 年间广东严重春旱的发生呈增多趋势(纪忠萍等,2007),1998 年秋季至 1999 年春季华南出现严重春旱(陆丹,2001);2004—2005 年华南发生严重干旱(邓玉娇等,2006;曾刚和高琳慧,2017)。华南、广东干旱的发生与大气环流和海温异常密切相关(林爱兰等,2009;2010;熊英和乔云亭,2012;范伶俐等,2013)。周明森等(2013)分析指出华南 4—5 月持续性干旱与东亚大槽南段减弱、华南附近异常气旋环流有关,也与冬春热带中太平洋海温正距平持续存在有关。华南冬春降水的年际变化与水汽输送密切相关(Wu et al,2013)。干旱是一种累积效应,持续性干旱的影响就会较重(晏红明等,2007)。因此跨越三季的华南或广东秋冬春干旱的影响严重,而对于这种跨三个季节的持续性干旱的成因的研究很少,有必要进一步开展研究。

2020 年 10 月到 2021 年 5 月,广东发生秋冬春干旱。粤东、粤北旱情严重,生产生活用水受到影响,各地采取拉管、打井、送水等供水措施,并适时实施人工降雨。广东全省水库蓄水普遍减少,到 2021 年 4 月 12 日,广东大中型水库的总蓄水量为 115.8 亿  $m^3$ ,比常年减少 44.8 亿  $m^3$ 。广东投入抗旱 69.67 万人次,抗旱资金 3.3 亿元。这次干旱持续到 5 月底,随着南海夏季风爆发,降水使得华南大部

地区干旱得到缓解。那么2020—2021年广东秋冬春干旱有何特点?造成这次干旱的主要原因是什么?此干旱与气象学者以往对广东干旱成因的研究存在哪些异同?因此本文拟从大气环流和海温异常的变化来分析这次广东秋冬春干旱的成因,以期为相关的业务和服务提供参考依据。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

所用的资料如下:①1961—2021年广东86个国家气象观测站逐日气温、降水资料;美国国家环境预测中心/美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)月尺度风场、高度场、海平面气压场的大气环流再分析资料(Kalnay et al,1996),CMAP降水资料等,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。美国海洋和大气管理局(NOAA)扩建重建的月尺度海表温度资料(ERSST V5),水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ (Huang et al,2017);大气射出长波辐射资料(OLR),水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。②采用NCEP/NCAR月尺度再分析资料,对2020年10月至2021年5月这8个月广东干旱期间的同期大气环流场,包括高层200 hPa风场、中层500 hPa高度场、低层850 hPa风场、海平面气压场以及整层水汽输送的平均场和距平场进行合成分析。

### 1.2 方法

①采用逐日气象干旱指数(daily dry index,DI)来确定站点干旱的等级。单站逐日气象干旱指数DI定义为:

$$DI(i) = SAPI(i) + \overline{M(i)} \quad (1)$$

式中: $SAPI(i)$ 是第*i*日前期降水指数API的标准化变量, $SAPI$ 标准化计算方法参见《气象干旱等级》国家标准(GB/T 20481—2006)(张强等,2006)。 $M(i)$ 为本站第*i*日常年同期平均相对湿润度指数,变化范围为 $-1 \sim 1$ , $M(i)$ 计算方法详见参考文献(王春林等,2014;陈慧华等,2016)。广东省气候中心根据逐日气象干旱指数(DI)按照表1定义的阈值监测干旱等级。

②根据2020—2021年广东秋冬春干旱的特征,定义秋冬春连旱的标准。若上一年秋季(本文仅指

表1 气象干旱等级标准

Table 1 Meteorological drought grade standard	
干旱类型	逐日干旱等级
无旱	$-0.5 < DI$
轻旱	$-1.0 < DI \leq -0.5$
中旱	$-1.5 < DI \leq -1.0$
重旱	$-2.0 < DI \leq -1.5$
特旱	$DI \leq -2.0$

10—11月,下同)、冬季(前一年12月至当年2月)、春季(当年3—5月),这三季广东全省平均降水量较常年同期均偏少,就定义为一次秋冬春连旱。如1966—1967年的秋冬春连旱就是1966年秋季、1966—1967年冬季和1967年春季的干旱。

## 2 2020—2021年广东秋冬春干旱特征

### 2.1 总体特征

广东在2020年10月至2021年5月发生的秋冬春干旱有以下3个特点:①持续时间长,跨越秋冬春3个季节,历时8个月。②降水显著偏少。干旱期间广东全省平均降水量为449.5 mm,较常年同期(799.9 mm)偏少44%,仅次于1962年10月至1963年5月(309.2 mm),为历史同期第二少。粤东在2020年10月1日至2021年5月30日降水量为137.9 mm,较常年同期偏少80%,为历史同期最少。③平均气温为历史同期最高。干旱期间广东全省平均气温为 $20.3^{\circ}\text{C}$ ,较常年同期( $18.9^{\circ}\text{C}$ )偏高 $1.4^{\circ}\text{C}$ ,为有气象记录以来同期最高。气象干旱阶段性发展,其中2020年11月1日至12月31日全省平均降水量较常年同期偏少85%,根据12月31日广东省气象干旱监测(采用DI指数),广东47个站点重旱、12个站点特旱。2021年4—5月气象干旱最重,据4月7日气象干旱监测显示,广东大部出现中旱—特旱,气象干旱站点占48%,其中29个站点重旱、33个站点特旱;5月23日全省出现中—特重气象干旱的站点占44%,其中10个站点重旱、12个站点特旱。

图1为利用CMAP资料制作的2020年10月至2021年5月我国南方降水距平分布。可见,华南地区2020—2021年的秋冬春降水显著偏少 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$

的区域主要位于广东。从广东国家气象观测站资料统计,2020 年 10 月至 2021 年 5 月,广东平均降水量连续 8 个月较常年同期偏少 14%~93%,其中有 5 个月偏少 50%以上。因此本文把这次广东秋冬春干旱作为一个整体,分析其大气环流和海温异常的特征,探讨降水异常的成因。

## 2.2 广东秋冬春连旱特征

根据 1.2 节秋冬春连旱的定义,统计 1961—2021 年达到标准的广东秋冬春连旱降水情况(表 2)。可见,近 61 年来广东共发生秋冬春连旱共有 10 次,年均发生概率为 16.4%。发生的次数具有显著的年代际变化特征。20 世纪 60 年代出现 3 次,80 年代出现 1 次,21 世纪 00 年代出现 3 次,10 年代以来出现 3 次,而 20 世纪 70 年代、90 年代没有发生。其中在 1966—1970 年这 5 年、2019—2021 年这 3 年广东出现连续的秋冬春连旱。可见,秋冬春连旱在 20 世纪 60 年代、21 世纪 00 年代以来出现的次数多。从秋冬春连旱期间广东降水距平百分

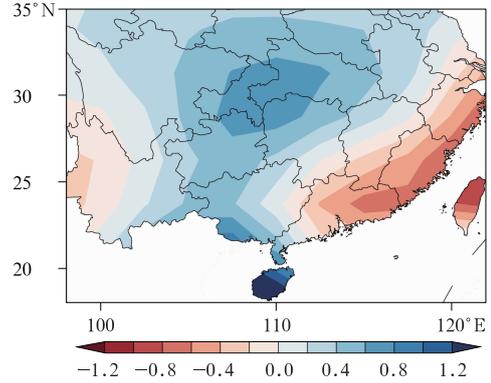


图 1 2020 年 10 月至 2021 年 5 月南方降水距平分布(单位:  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )

Fig. 1 Distribution of precipitation anomaly in Guangdong from October 2020 to May 2021 (unit:  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )

率可见,2020—2021 年最少为 -44%;其次是 2001—2002 年,为 -40%;第三少是 2010—2011 年,为 -37%。可见,2020—2021 年的秋冬春连旱为 1961 年以来秋冬春连旱期间降水最少,且在 2019—2021 年连续 3 年出现秋冬春连旱,导致广东 2020—2021 年秋冬春的旱情严重。

表 2 1961—2021 年广东秋冬春连旱降水统计

Table 2 Statistics of continuous drought precipitation in autumn, winter and spring in Guangdong from 1961 to 2021

秋冬春连旱年份	秋季降水距平百分率/%	冬季降水距平百分率/%	春季降水距平百分率/%	秋冬春季降水距平百分率/%
1966—1967 年	-40	-5	-14	-15
1967—1968 年	-49	-5	-12	-14
1969—1970 年	-18	-54	-2	-12
1985—1986 年	-54	-26	-15	-20
2001—2002 年	-55	-21	-43	-40
2003—2004 年	-66	-27	-15	-22
2007—2008 年	-66	-1	-15	-17
2010—2011 年	-41	-37	-37	-37
2019—2020 年	-55	-1	-8	-11
2020—2021 年	-46	-47	-42	-44

这次广东秋冬春干旱的发生与气候背景关系密切。图 2 为 1961—2021 年广东秋冬春干旱期间(上一年 10 月至当年 5 月)降水距平百分率的历年变化。可见年代际变化明显。1961—1970 年偏少,1971—1990 年偏多,1991—2010 年偏少,21 世纪 10 年代前中期偏多,其后降水以偏少为主。也进一步说明 2020—2021 广东的秋冬春连旱发生在降水偏少的气候背景下。

## 3 广东秋冬春降水与大气环流的关系

### 3.1 广东秋冬春降水与大气环流的相关分析

广东秋冬春降水与同期对流层各层大气环流场的相关系数分布(图 3)可见,高层 200 hPa 相关风场在东亚低纬度与广东秋冬春降水有密切联系,从图 3a 可见青藏高原南侧、中南半岛、南海的南风减

弱(加强),广东上空的西风急流加强(减弱),有利于广东秋冬春降水偏多(少)。低层 850 hPa 相关风场上(图 3b),在菲律宾以东的西太平洋上空存在一个显著相关反气旋环流,而阿拉伯海、孟加拉湾到广东有显著相关的偏西气流,南海为显著相关偏南气流,广东处于显著相关的偏南风、偏北风、偏西风的交汇地,冷空气强,暖湿气流加强,副热带高压偏强,在这种配置下有利于广东秋冬春降水的偏多,反之降水偏少。同时在孟加拉湾北部(18°N、90°E)附近地区存在一显著相关的南支槽,其槽前的西南气流是南方水汽的主要来源之一(何溪澄等,2006),说明南支槽加强,有利于广东秋冬春降水增加,反之降水减少。中层 500 hPa 位势高度相关场上(图 3c),降水与日本以东的北太平洋高度场存在大范围显著负相关区,而热带印度洋到热带西太平洋均为显著正相关,说明在秋冬春季,冷空气强,北太平洋高度场北低南高的异常分布有利于广东秋冬春降水偏多,反之偏少。与海平面气压场的相关系数分布(图 3d)可见,广东秋冬春降水与 40°N 以北的海平面气压存在负相关,显著负相关中心位于贝加尔湖附近,与北半球热带海平面气压存在显著正相关,说明北半

球低纬与高纬度的海平面气压反位相变化,及北低南高的分布,有利于广东秋冬春降水偏多(少)。

广东秋冬春降水异常是高中低层大气环流共同作用的结果,特别是在低层 850 hPa 距平场上广东存在异常强的南风、北风交汇。如在干旱重的 1962—1963 年秋冬春 850 hPa 我国东部为异常南风控制(图略),南海为弱的异常偏北气流,广东不存在异常南北风的交汇,导致降水显著偏少。

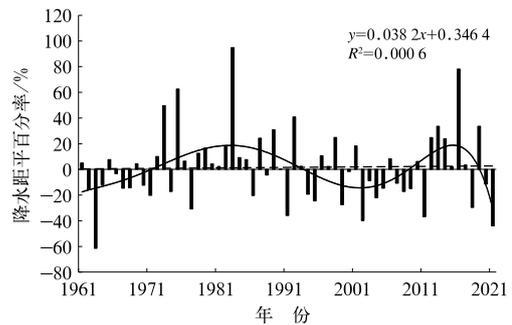


图 2 1961—2021 年广东秋冬春平均降水距平百分率的年际变化

Fig. 2 Interannual variation of the average precipitation anomaly percentage in Guangdong from 1961 to 2021 during the drought period of autumn, winter and spring

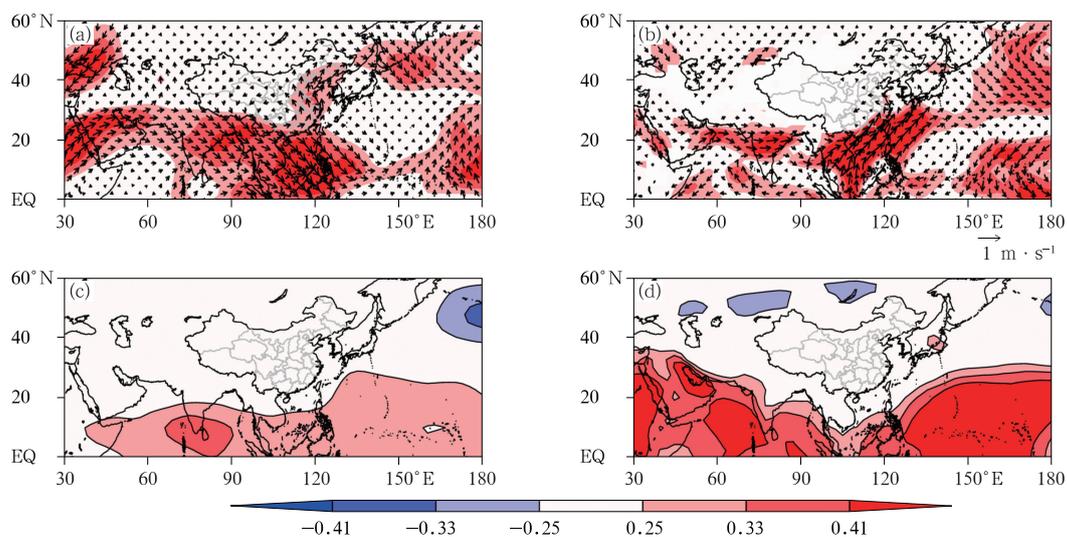


图 3 1961—2021 年在上年 10 月至当年 5 月广东平均降水标准化序列与同期大气环流的相关系数分布 (a)200 hPa 风场, (b)850 hPa 风场, (c)500 hPa 高度场, (d)海平面气压场 (填色区表示通过了 0.05 显著性水平检验)

Fig. 3 Correlation between the standardized series of average precipitation in Guangdong and atmospheric circulation in the same period from October of the previous year to May of the very year in 1961—2021

(a) 200 hPa wind field, (b) 850 hPa wind field, (c) 500 hPa height field, (d) sea level pressure field (Colored area indicates passing the significance level test above 0.05)

### 3.2 2020—2021 年广东秋冬春干旱的大气环流异常特征

为了了解 2020—2021 年广东秋冬春干旱的大气环流的特征,分析广东干旱期间的高中低层大气环流及异常,以及对流层整层积分水汽通量和水汽通量散度距平分布。从 200 hPa 纬向风场及其距平(图 4a)可见,在北半球副热带地区存在西风急流,30°N 以南风速明显减弱,而 30°N 以北明显加强,说明干旱期间副热带西风急流强度明显减弱且位置偏北。从 500 hPa 高度及距平场(图 4b)可见,欧亚中高纬度为一槽一脊的形势,东亚大槽位于鄂霍次克海到日本,高压脊位于乌拉尔山附近。中纬度地区气流较平直。菲律宾以东洋面存在 5880 gpm 等值线闭合中心。在北半球 50°N 以南的中低纬地区位势高度正距平,距平中心位于日本及其以东的北太平洋区域,而在贝加尔湖到鄂霍次克海存在位势高度负距平,中心位于贝加尔湖、鄂霍次克海附近。说明在干旱期间,中层东亚大槽北段加强,南段明显减弱,西太平洋副热带高压强度偏强,脊线位置较常年

明显偏北,同时南支槽明显减弱,亚洲中高纬位势高度场上呈“北低南高”的异常分布,不利于极地冷空气南下,导致影响广东的冷空气偏弱。同时 2020 秋至 2021 年春中低纬度东亚大陆和北太平洋高度场偏高,这与陆丹(2001)分析指出 1998 年秋至 1999 年春广东干旱与 500 hPa 上北太平洋亚洲大陆和北太平洋中低纬度大部高度偏高的结论一致。

从海平面气压及其距平场(图 4c)可见,巴尔喀什湖到贝加尔湖之间存在一高压中心,北太平洋也存在一高压中心,中心位于日本东南部;北半球海平面气压呈北高南低的分布。北半球海平面气压正距平中心有两个,分别位于巴尔喀什湖附近和日本东南部太平洋上,而 30°N 以南的中低纬为负距平。说明干旱期间大陆高压和北太平洋高压都明显加强,海平面气压在东亚中高纬度呈北负南正的分布,中低纬呈西低东高的气压分布,都不利于北方系统和西风系统的南压和东移影响,不利于广东秋冬春降水的发生。

从低层 850 hPa 距平风场上(图 4d)可见,菲律宾以东存在一异常气旋环流中心,南海北部到广东

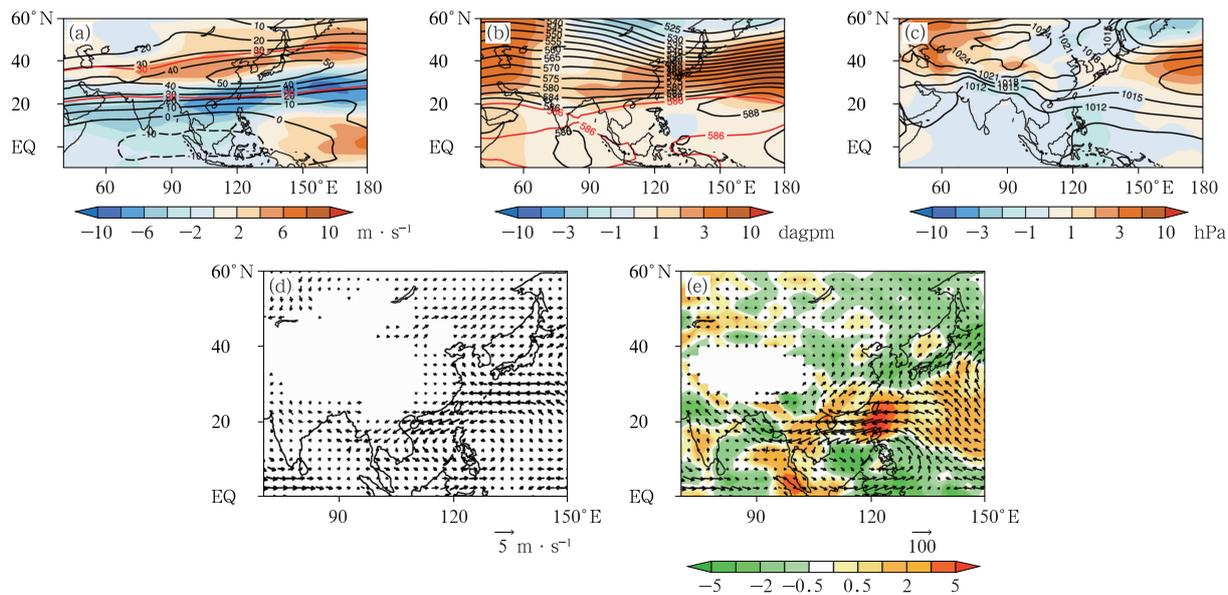


图 4 2020 年 10 月至 2021 年 5 月 (a) 200 hPa 纬向风场(等值线,单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )及距平(填色), (b) 500 hPa 的高度场(等值线,单位: dagpm)及距平(填色), (c) 海平面气压场(等值线,单位: hPa)及距平(填色), (d) 850 hPa 距平风场,以及 (e) 对流层整层积分水汽通量(矢量,单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )和水汽通量散度距平(填色,单位:  $10^{-7} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 4 (a) The 200 hPa zonal wind field (contour, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and anomaly (colored), (b) 500 hPa height field (contour, unit: dagpm) and anomaly (colored), (c) sea level pressure field (contour, unit: hPa) and anomaly (colored), (d) 850 hPa anomaly wind field, as well as (e) tropospheric integrated water vapor flux (vector, unit:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and water vapor flux divergence anomaly (colored, unit:  $10^{-7} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) from October 2020 to May 2021

为异常气旋环流后部的东北下沉气流控制,阻挡孟加拉湾、南海的西南水汽向广东输送,同时南支槽偏弱,冷空气活动偏弱,均不利于冷暖空气在广东交汇,易出现干旱。

图 4e 为广东干旱期间对流层整层(1000~300 hPa)积分水汽通量和水汽通量散度距平分布。可见广东南部和南海北部处于水汽辐散区。广东、南海北部和台湾海峡为异常东北下沉气流控制,水汽辐散明显加强,特别是广东处于异常水汽辐散的高值区,不利于降水的发生。牛宁和李建平(2007)指出 2004 年长江以南地区严重秋旱的发生对应东南亚上空整层水汽输送出现显著的负异常。2020—2021 年的广东秋冬春干旱期间,广东、南海北部和台湾海峡水汽辐散明显偏强,导致降水显著偏少,可见水汽输送异常是直接引起广东秋冬春降水异常的关键因素。2020 年秋季、2020/2021 年冬季、2021 年春季我国气候异常与大气环流密切相关(杨明珠和陈丽娟,2021;韩荣青等,2021;代潭龙等,2021;刘

芸芸和高辉,2021)。

#### 4 广东秋冬春降水与拉尼娜事件的关系

广东地处低纬,南临南海,海表温度对其降水变化具有重要影响(林爱兰等,2009;简茂球和乔云亭,2012),因为降水对海温的响应具有滞后性。从 1961—2021 年广东秋冬春降水(上年 10 月至当年 5 月)年际变化的标准化距平序列与提前 1 个月的上一年 9 月至当年 4 月 SST 的相关系数分布(图 5a)可见,广东秋冬春降水与热带中东太平洋、海洋性大陆的 SST 显著正相关,与北太平洋中低纬的 SST 显著负相关,热带太平洋从西到东呈“+ - +”SST 距平分布,类似厄尔尼诺事件的海温分布,说明秋冬春赤道中东太平洋发生厄尔尼诺(拉尼娜)事件有利于广东秋冬春降水偏多(少)。从 2020 年 9 月至 2021 年 4 月 SST 距平分布(图 5b)可见,热带太平洋

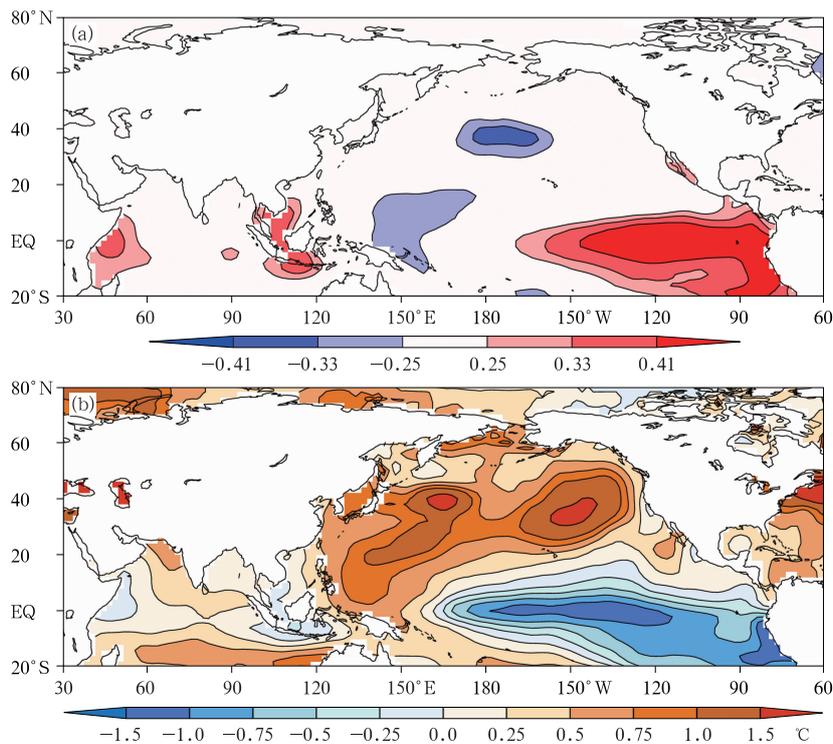


图 5 (a)1961—2021 年在上年 10 月至当年 5 月广东平均降水标准化序列与上年 9 月至当年 4 月 SST 的相关系数分布,(b)2020 年 9 月至 2021 年 4 月 SST 距平分布

Fig. 5 (a) Correlation coefficient distribution between the standardized series of average precipitation in Guangdong from October of the previous year to May of the very year and SST from September of the previous year to April of the very year from 1961 to 2021, (b) SST anomaly distribution from September 2020 to April 2021

SST 从西向东呈“— + —”的距平分布,负距平中心位于赤道中东太平洋,海洋性大陆为 SST 负距平,而北太平洋中低纬地区( $20^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ )均为 SST 正距平,呈现出拉尼娜事件的海温分布,这与国家气候中心监测结果一致(刘芸芸和高辉,2021),这暗示拉尼娜事件有利于广东秋冬春降水偏少。

从 2020 年 10 月至 2021 年 5 月 Walker 环流(图 6a)看,在赤道西太平洋有较强上升运动,高度可达对流层高层 200 hPa,赤道中东太平洋有下沉运动,可见大气对拉尼娜事件有明显响应,Walker 环流增强。在  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$  区域的经度-高度剖面(图 6b)可见在菲律宾附近上升运动明显,高度可达对流层的中层 500 hPa,而广东有下沉运动。这从同期 OLR 距平场(图 7)也可得到印证,阿拉伯海、孟加拉湾以及海洋性大陆地区的对流较常年偏强,其中菲律宾附近地区 OLR 距平异常偏低,对流活动异常活跃。而中低纬度东亚沿岸对流较常年偏弱,广东处于正异常中心,对流活动不活跃,不利于降水的发生。由于菲律宾附近地区对流活动的强度和范围均较常年同期明显加强,导致在对流层中低层热带西太平洋和南海、菲律宾附近存在气旋性异常环流,南海为异常偏东或东北气流影响,下沉气流阻挡了孟加拉湾、南海的西南水汽向广东输送。同时 2020—2021 年的秋冬春冷空气总体偏弱,广东大部,

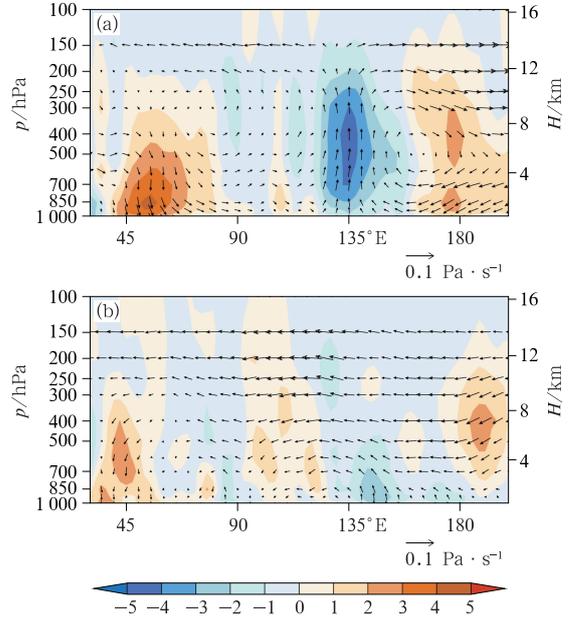


图 6 2020 年 10 月至 2021 年 5 月 (a) Walker 环流和 (b) 在  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$  区域的经度-高度剖面 (矢量:  $\omega$  与  $u$  风场距平合成, 阴影:  $\omega$  距平)

Fig. 6 Cross-sections of (a) Walker circulation and (b) longitude-height profile of  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$  from October 2020 to May 2021 (vector: anomaly composition of  $\omega$  and  $u$  winds; shaded: anomaly of  $\omega$ )

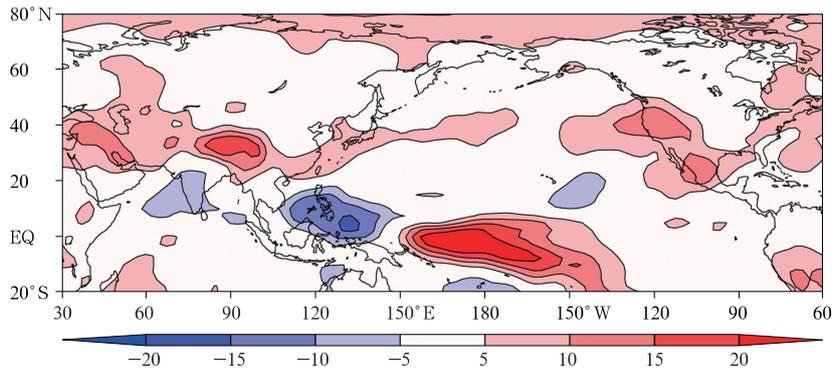


图 7 2020 年 10 月至 2021 年 5 月 OLR 距平场(单位:  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )

Fig. 7 OLR anomaly field (unit:  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) from October 2020 to May 2021

处于水汽气流距平辐散区,不利于降水的发生。显然,大气环流对拉尼娜事件的响应是导致广东 2020—2021 年秋冬春降水偏少的重要因子之一。

## 5 结论与讨论

(1) 利用观测资料和 CMAP 降水资料,首先分析了 2020—2021 年华南发生秋冬春干旱的气候特

征。这次广东秋冬春干旱历时 8 个月,降水偏少的中心位于广东,旱情最重出现在粤东、粤北。1961—2021 年广东共发生秋冬春连早有 10 次,年均发生概率为 16.4%。2020—2021 年的秋冬春连旱为 1961 年以来秋冬春连旱同期降水最少,且广东平均气温为历史同期最高,雨少温高是这次秋冬春干旱的直接原因。

(2) 2020—2021 年广东秋冬春大气环流异常

特征分析表明,在高层 200 hPa 距平风场上,副热带西风急流减弱;中层 500 hPa 位势高度距平场上,东亚大槽南段明显减弱;低层 850 hPa 距平风场上,影响广东的冷空气偏弱,菲律宾以东异常气旋环流的存在导致南海北部为异常东北气流影响,均不利于冷暖空气在广东交汇;地面北太平洋高压明显加强,东亚中高纬度呈北负南正,中低纬西低东高的气压距平分布,不利于北方系统和西风系统的南压和东移影响,且南支槽偏弱,冷空气活动偏弱,这些环流和水汽异常的配置造成广东降水显著偏少,干旱发生。

(3)2020年8月到2021年3月,赤道中东太平洋发生一次中等强度的拉尼娜事件,大气对拉尼娜事件有明显响应,Walker环流增强,菲律宾附近上升运动明显,而广东有下沉运动,导致在对流层低层热带西太平洋、南海、菲律宾附近存在气旋性异常环流,阻挡了孟加拉湾、南海的西南水汽向广东输送,广东处于水汽辐散区,同时气温显著偏高,温高雨少导致干旱发生。

按本文定义的秋冬春连旱的标准,统计得到1961—2021年广东共发生秋冬春连旱有10次,其中有6次发生在拉尼娜事件或弱冷水背景下,3次发生在厄尔尼诺或弱暖水背景下,1次秋冬季弱冷水,春季弱暖水。可见,在拉尼娜事件或弱冷水背景下、广东秋冬春连旱发生的可能性大,但拉尼娜事件与广东秋冬春连旱并非一一对应的关系。干旱的发生主要受东亚气候系统变化影响。对于大气圈,包括东亚季风、副热带高压、中纬度扰动;对于海洋圈,包括热带太平洋的ENSO循环、热带西太平洋暖池和印度洋等以及外强迫北冰洋海冰、欧亚积雪、北极海冰等(王林等,2011;左志燕和张人禾,2012;陈红,2017;张强等,2020),因此是多种因素协同影响的结果。所以广东秋冬春连旱的发生,除了低纬度热带太平洋海温异常的影响外,还与中高纬的大气环流、欧亚大陆积雪、北极海冰等有关,也与台风登陆带来降水有关。当海洋上为弱冷水情况,海温影响不明显,但当中高纬大气环流不利于降水发生时,也会发生秋冬春连旱。

## 参考文献

安莉娟,任福民,李韵婕,等,2014.近50年华北区域性气象干旱事件的特征分析[J].气象,40(9):1097-1105. An L J, Ren F M, Li Y J, et al, 2014. Study on characteristics of regional drought events

over North China during the past 50 years[J]. Meteor Mon, 40(9):1097-1105(in Chinese).

- 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).
- 陈慧华,王春林,段海来,等,2016.广东省晚稻干旱灾害评估及其特征分析[J].中山大学学报(自然科学版),55(3):15-21. Chen H H, Wang C L, Duan H L, et al, 2016. Drought disaster evaluation model and characteristics of late rice in Guangdong[J]. Acta Sci Nat Univ Sunyatseni, 55(3):15-21(in Chinese).
- 代潭龙,王秋玲,王国复,等,2021.2020年中国气候主要特征及主要天气气候事件[J].气象,47(4):478-487. Dai T L, Wang Q L, Wang G F, et al, 2021. Climatic characteristics and major meteorological events over China in 2020[J]. Meteor Mon, 47(4):478-487(in Chinese).
- 邓玉娇,肖乾广,黄江,等,2006.2004年广东省干旱灾害遥感监测应用研究[J].热带气象学报,22(3):237-240. Deng Y J, Xiao Q G, Huang J, et al, 2006. Application study on drought remote sensing monitoring in Guangdong Province, 2004[J]. J Trop Meteor, 22(3):237-240(in Chinese).
- 范伶俐,张福颖,胡祯祥,等,2013.近50a华南干湿状态的时空特征[J].大气科学学报,36(1):29-36. Fan L L, Zhang F Y, Hu Z X, et al, 2013. Spatial and temporal features of dry and wet states in South China in recent 50 years[J]. Trans Atmos Sci, 36(1):29-36(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).
- 何溪澄,丁一汇,何金海,等,2006.中国南方地区冬季风降水异常的分析[J].气象学报,64(5):594-604. He X C, Ding Y H, He J H, et al, 2006. An analysis on anomalous precipitation in Southern China during winter monsoons[J]. Acta Meteor Sin, 64(5):594-604(in Chinese).
- 胡学平,王式功,许平平,等,2014.2009—2013年中国西南地区连续干旱的成因分析[J].气象,40(10):1216-1229. Hu X P, Wang S G, Xu P P, et al, 2014. Analysis on causes of continuous drought in Southwest China during 2009—2013[J]. Meteor Mon, 40(10):1216-1229(in Chinese).
- 黄荣辉,刘永,王林,等,2012.2009年秋至2010年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J].大气科学,36(3):443-457. Huang R H, Liu Y, Wang L, et al, 2012. Analyses of the causes of severe drought occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010[J]. Chin J Atmos Sci, 36(3):443-457(in Chinese).
- 纪忠萍,谷德军,易爱明,等,2007.近48年来广东春旱的变化[J].自然灾害学报,16(5):59-64. Ji Z P, Gu D J, Yi A M, et al, 2007. Variation of spring drought in Guangdong Province in recent 48

- years[J]. *J Nat Dis*, 16(5): 59-64(in Chinese).
- 简茂球, 乔云亭, 温之平, 2008. 华南季节干旱及连旱特征分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 47(4): 118-121. Jian M Q, Qiao Y T, Wen Z P, 2008. Analysis on characteristics of seasonal and inter-seasonal drought events in South China[J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*, 47(4): 118-121(in Chinese).
- 简茂球, 乔云亭, 2012. 华南秋旱的大气环流异常特征[J]. *大气科学*, 36(1): 204-214. Jian M Q, Qiao Y T, 2012. Characteristics of general circulation anomalies related to the drought events in fall in South China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 36(1): 204-214(in Chinese).
- 金燕, 况雪源, 晏红明, 等, 2018. 近 55 年来云南区域性干旱事件的分布特征和变化趋势研究[J]. *气象*, 44(9): 1169-1178. Jin Y, Kuang X Y, Yan H M, et al, 2018. Studies on distribution characteristics and variation trend of the regional drought events over Yunnan in recent 55 years[J]. *Meteor Mon*, 44(9): 1169-1178(in Chinese).
- 李新周, 马柱国, 刘晓东, 2006. 中国北方干旱化年代际特征与大气环流的关系[J]. *大气科学*, 30(2): 277-284. Li X Z, Ma Z G, Liu X D, 2006. Inter-decadal characteristics of aridification over northern China associated with the variation of atmospheric circulation during the past 50 years[J]. *Chin J Atmos Sci*, 30(2): 277-284(in Chinese).
- 廖要明, 张存杰, 2017. 基于 MCI 的中国干旱时空分布及灾情变化特征[J]. *气象*, 43(11): 1402-1409. Liao Y M, Zhang C J, 2017. Spatio-temporal distribution characteristics and disaster change of drought in China based on meteorological drought composite index[J]. *Meteor Mon*, 43(11): 1402-1409(in Chinese).
- 林爱兰, 李春晖, 谷德军, 等, 2010. 广东省持续性干旱事件的变化及其成因[J]. *热带气象学报*, 26(6): 641-650. Lin A L, Li C H, Gu D J, et al, 2010. Variation and causes of continuous drought events in Guangdong Province[J]. *J Trop Meteor*, 26(6): 641-650(in Chinese).
- 林爱兰, 郑彬, 谷德军, 等, 2009. 与广东持续性干旱事件有关的两类海温异常型[J]. *高原气象*, 28(5): 1189-1201. Lin A L, Zheng B, Gu D J, et al, 2009. Two types of sea surface temperature anomaly related to persistent drought events in Guangdong Province[J]. *Plateau Meteor*, 28(5): 1189-1201(in Chinese).
- 刘晓云, 王劲松, 李耀辉, 等, 2015. 基于 Copula 函数的中国南方干旱风险特征研究[J]. *气象学报*, 73(6): 1080-1091. Liu X Y, Wang J S, Li Y H, et al, 2015. Characteristics of drought risk in southern China based on the Copula function[J]. *Acta Meteor Sin*, 73(6): 1080-1091(in Chinese).
- 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).
- 陆丹, 2001. 1998 年秋到 1999 年春华南特大干旱气候成因[J]. *气象*, 27(1): 48-52. Lu D, 2001. The origin study of South China extraordinary drought from autumn 1998 to spring 1999[J]. *Meteor Mon*, 27(1): 48-52(in Chinese).
- 马柱国, 2005. 我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系[J]. *地球物理学报*, 48(5): 1011-1018. Ma Z G, 2005. Dry/wet variation and its relationship with regional warming in arid-regions of northern China[J]. *Chin J Geophys*, 48(5): 1011-1018(in Chinese).
- 马柱国, 符淙斌, 杨庆, 等, 2018. 关于我国北方干旱化及其转折性变化[J]. *大气科学*, 42(4): 951-961. Ma Z G, Fu C B, Yang Q, et al, 2018. Drying trend in northern China and its shift during 1951-2016[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(4): 951-961(in Chinese).
- 牛宁, 李建平, 2007. 2004 年中国长江以南地区严重秋旱特征及其同期大气环流异常[J]. *大气科学*, 31(2): 254-264. Niu N, Li J P, 2007. The features of the heavy drought occurring to the south of the Yangtze River in China as well as the anomalies of atmospheric circulation in autumn 2004[J]. *Chin J Atmos Sci*, 31(2): 254-264(in Chinese).
- 沈晓琳, 祝从文, 李明, 2012. 2010 年秋、冬季节华北持续性干旱的气候成因分析[J]. *大气科学*, 36(6): 1123-1134. Shen X L, Zhu C W, Li M, 2012. Possible causes of persistent drought event in North China during the cold season of 2010[J]. *Chin J Atmos Sci*, 36(6): 1123-1134(in Chinese).
- 史丽, 张柳红, 伍红雨, 2021. 1994—2018 年广东主要气象灾害特征分析[J]. *广东气象*, 43(2): 54-57. Shi L, Zhang L H, Wu H Y, 2021. Characteristics of major meteorological disasters in Guangdong Province from 1994 to 2018[J]. *Guangdong Meteor*, 43(2): 54-57(in Chinese).
- 宋桂英, 王德民, 孙永刚, 等, 2006. 内蒙古夏季干旱气候特征分析[J]. *气象*, 32(S1): 71-74. Song G Y, Wang D M, Sun Y G, et al, 2006. Analysis of climate characteristics of summer drought in Inner Mongolia[J]. *Meteor Mon*, 32(S1): 71-74(in Chinese).
- 宋洁, 杨辉, 李崇银, 2011. 2009/2010 年冬季云南严重干旱原因的进一步分析[J]. *大气科学*, 35(6): 1009-1019. Song J, Yang H, Li C Y, 2011. A further study of causes of the severe drought in Yunnan Province during the 2009/2010 winter[J]. *Chin J Atmos Sci*, 35(6): 1009-1019(in Chinese).
- 王春林, 段海来, 邹菊香, 等, 2014. 华南早稻干旱灾害评估模型及其时空特征[J]. *中国农学通报*, 30(18): 40-48. Wang C L, Duan H L, Zou J X, et al, 2014. Drought disaster evaluation model and temporal-spatial characteristics of early rice in South China[J]. *Chin Agric Sci Bull*, 30(18): 40-48(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 Soikun, 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).
- 王晓敏, 周顺武, 周兵, 2012. 2009/2010 年西南地区秋冬春持续干旱的成因分析[J]. *气象*, 38(11): 1399-1407. Wang X M, Zhou S W, Zhou B, 2012. Causative analysis of continuous drought in Southwest China from autumn 2009 to spring 2010[J]. *Meteor Mon*, 38(11): 1399-1407(in Chinese).
- 魏凤英, 曹鸿兴, 1998. 华北干旱异常的地域特征[J]. *应用气象学报*,

- 9(2):205-212. Wei F Y, Cao H X, 1998. Regional characteristics of drought anomalies in North China[J]. *J Appl Meteor Sci*, 9(2):205-212(in Chinese).
- 熊英, 乔云亭, 2012. 华南冬春季连续性降水异常的成因分析[J]. *广东气象*, 34(6):9-13. Xiong Y, Qiao Y T, 2012. Analysis of the causation for anomalies of persistent precipitation in the winter and spring of South China[J]. *Guangdong Meteor*, 34(6):9-13(in Chinese).
- 晏红明, 段旭, 程建刚, 2007. 2005年春季云南异常干旱的成因分析. *热带气象学报*, 23(3):300-306. Yan H M, Duan X, Cheng J G, 2007. Study on a severe drought event over Yunnan in spring 2005[J]. *J Trop Meteor*, 23(3):300-306(in Chinese).
- 杨明珠, 陈丽娟, 2021. 2020年秋季我国气候异常特征及成因分析[J]. *气象*, 47(4):499-509. Yang M Z, Chen L J, 2021. Features and possible causes of abnormal climate over China in autumn 2020[J]. *Meteor Mon*, 47(4):499-509(in Chinese).
- 曾刚, 高琳慧, 2017. 华南秋季干旱的年代际转折及其与热带印度洋热含量的关系[J]. *大气科学学报*, 40(5):596-608. Zeng G, Gao L H, 2017. Decadal shift of autumn drought in South China and its relationship with heat content in tropical Indian Ocean[J]. *Trans Atmos Sci*, 40(5):596-608(in Chinese).
- 张颀炜, 曾刚, 倪东鸿, 等, 2016. 西南地区秋季干旱的年代际转折及其可能原因分析[J]. *大气科学*, 40(2):311-323. Zhang G W, Zeng G, Ni D H, et al, 2016. Decadal shift of autumn drought in Southwest China and its possible causes[J]. *Chin J Atmos Sci*, 40(2):311-323(in Chinese).
- 张强, 谢五三, 陈鲜艳, 等, 2021. 1961—2019年长江中下游区域性干旱过程及其变化[J]. *气象学报*, 79(4):570-581. Zhang Q, Xie W S, Chen X Y, et al, 2021. Regional drought process and its variation characteristics in the middle-lower reaches of the Yangtze River from 1961 to 2019[J]. *Acta Meteor Sin*, 79(4):570-581(in Chinese).
- 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等, 2020. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J]. *气象学报*, 78(3):500-521. Zhang Q, Yao Y B, Li Y H, et al, 2020. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(3):500-521(in Chinese).
- 张强, 邹旭恺, 肖风劲, 等, 2006. 气象干旱等级 GB/T20481—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社. Zhang Q, Zou X K, Xiao F J, et al, 2006. The Grade of Meteorological Drought GB/T 20481—2006 [S]. Beijing: China Standard Press(in Chinese).
- 周明森, 简茂球, 乔云亭, 2013. 华南4—5月持续性干旱及其环流背景[J]. *气象学报*, 71(1):76-85. Zhou M S, Jian M Q, Qiao Y T, 2013. April—May persistent drought events in South China and the related general circulation background[J]. *Acta Meteor Sin*, 71(1):76-85(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).
- Huang B Y, Thorne P W, Banzon V F, et al, 2017. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons[J]. *J Climate*, 30(20):8179-8205.
- 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.
- Wu W, Wen Z P, Chen Y G, et al, 2013. Interannual variability of winter and spring precipitation in South China and its relation to moisture transport[J]. *J Trop Meteor*, 19(4):322-330.

(本文责编:王蕾)