

中国南方冬季持续性温湿异常事件的分类和特征分析*

田青¹ 温敏^{1,2} 张人禾^{1,3} 高辉⁴
TIAN Qing¹ WEN Min^{1,2} ZHANG Renhe^{1,3} GAO Hui⁴

1. 中国气象科学研究院,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
 3. 复旦大学大气科学研究所,上海,200433
 4. 国家气候中心,北京,100081
1. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*
2. *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*
3. *Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200433, China*
4. *National Climate Center, Beijing 100081, China*

2016-11-24 收稿,2017-06-02 改回.

田青,温敏,张人禾,高辉. 2017. 中国南方冬季持续性温湿异常的分类和特征分析. 气象学报, 75(5):729-743

Tian Qing, Wen Min, Zhang Renhe, Gao Hui. 2017. Classification of persistent winter temperature-precipitation anomalies in southern China and their large-scale atmospheric conditions. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(5):729-743

Abstract Based on daily temperature and precipitation observations collected at weather stations in China during 1981–2010, persistent anomalous events in southern China are identified and classified into four types, i. e. cold-wet-event, cold-dry-event, warm-wet-event, and warm-dry-event. Features of large-scale atmospheric circulations associated with the four types of events are examined using the National Centers for Environmental Prediction-Department of Energy (NCEP-DOE) reanalysis data. The anomalous "north high-south low" pattern in geopotential height over Eurasia in the middle and high latitudes results in a weaker than normal temperate jet and a stronger than normal subtropical jet, which are favorable for the southward invasion of cold air. On the other hand, the anomalous "west low-east high" pattern over the subtropics indicates that the subtropical western Pacific High is stronger and shifts farther north than normal, while the southern branch trough deepens. The southerlies in front of the trough transport abundant water vapor into southern China and increase precipitation there. Jointly affected by anomalous circulations both in middle and higher latitudes and in the subtropics, southern China often experiences various persistent abnormal events during winter. Among them, the wet-cold event occurs when the above two anomalous patterns appear simultaneously. Therefore, our results suggest that the prediction skill of severe freezing disaster weather over southern China would be improved if taking into account the variations of key circulations associated with cold-wet events.

Key words Cold-wet event, Persistent anomalies, Features of circulation, Winter climate, Southern China

摘要 利用1981—2010年中国测站逐日气温和降水异常序列,将中国南方冬季持续性异常事件分为冷湿、冷干、暖湿和暖

* 资助课题:国家重点研发计划“全球变化及应对”重点专项项目(2016YFA0600602)、国家重点基础研究发展规划“973”项目(2012CB417205)、中国气象科学研究员基本科研业务费项目(2015Z001)。

作者简介:田青,主要从事冬季风异常机理研究。E-mail: tianqingnuist@sina.com

通讯作者:温敏,主要从事东亚季风变异机理研究。E-mail: wenmin@camscma.cn

干4类持续性异常事件,并用NCEP-DOE逐日再分析资料对各类持续性异常事件的环流特征进行了分析。结果表明,欧亚大陆中高纬度上空“北高南低”的异常环流形势使得温带急流减弱、副热带急流增强,有利于冷空气向南爆发;而中纬度地区“东高西低”的异常环流则对应西太平洋副热带高压增强北移和南支西风槽的活跃,有利于偏南风水汽输送达到中国南方地区,中国南方降水偏多。受南北异常环流的共同影响,中国南方冬季经常出现持续性异常天气,冷湿(低温雨雪冰冻)事件正是在上述两种异常环流型影响下发生的。因此,考虑与冷湿事件相联系的关键环流系统可能有助于提高中国南方冬季低温雨雪冰冻事件的预报能力。

关键词 冷湿事件,持续性异常,环流特征,冬季气候,中国南方

中图法分类号 P462.4⁺1

1 引言

各种持续性异常天气中,夏季持续性强降水和冬季持续性低温雨雪冰冻天气是对中国影响最为严重的气象灾害。中国学者高度关注对夏季持续性强降水的研究(Chen, et al, 2014, 2015; Li, et al, 2016; 李明刚等, 2016),而对冬季持续性雨雪冰冻灾害的研究相对较少。

早在20世纪60、70年代,中国就频繁出现冷冬。很多学者从年际和年代际尺度角度对中国全国性和区域性冬季气温异常问题进行了探讨(丁一汇, 1990; 郭其蕴, 1994; 王遵娅等, 2006)。20世纪80年代末以来,在北半球大气环流年代际变化背景下,东亚冬季风呈现显著减弱的趋势(Wang, 2001; 赵平等, 2006; 施晓晖等, 2007; 贺圣平等, 2012; 王会军等, 2013; 丁一汇等, 2014),人们对冷空气活动的关注也相对减弱。直到2008年初,持续性低温雨雪冰冻事件的发生,再次引起相关气象工作者的高度重视(李崇银等, 2008; 高辉等, 2008; 王东海等, 2008; Gao, et al, 2009; Wen, et al, 2009; 谭桂容等, 2010)。

中国低温雨雪冰冻天气分布较广,其中中国南方尤其长江以南一带是高发区(王遵娅, 2011; Wang, et al, 2014),受影响程度比北方地区更为严重。王晓娟等(2012)也指出,区域性极端低温事件的高频中心在20世纪80年代之后主要位于30°N附近。研究表明,中国南方持续性低温雨雪冰冻事件主要受乌拉尔山阻塞高压、欧亚大陆大型斜槽斜脊、北极涛动、南支槽及热带季节内振荡等系统的影响(高辉等, 2008; 李崇银等, 2010; 谭桂容等, 2010; 武炳义等, 2004; Bueh, et al, 2011a, 2011b; Wen, et al, 2009; 马宁等, 2011)。从2008年中国南方持续性低温雨雪冰冻事件着手,李崇银等(2008)给出了低温雨雪冰冻事件对应的大气环流系统的组合性

异常特征。Wen等(2009)从大尺度气候异常的角度讨论了多个大尺度因子对2008年1月出现在中国南方的低温雨雪冰冻事件的影响,指出中东急流和北极涛动的配合比拉尼娜事件的影响更为重要。Wang等(2014)将近55年冰冻事件分为雨淞和雾淞两类,讨论其对应的不同异常环流特征,指出海温异常对两类事件有不同的影响。查书瑶等(2015)根据风场将冬季华南准静止锋分为3类,并就不同类型准静止锋的大尺度环流特征进行了对比,指出其对中国南方冬季降水的重要影响。

由此可见,众多环流和外强迫因子可对中国持续性异常天气产生影响,各影响因子相互配合,造成温度和降水呈现不同的异常特征,其中关系非常复杂。然而,以上研究有的仅给出某一个例天气过程分析,不具有普遍代表性;有的则从月、季平均的角度分析大尺度环流异常特征,可能掩盖异常事件的天气尺度特征。此外,也未对低温雨雪冰冻事件与其他冬季持续性异常事件对应的环流特征的差异做详细分析。本研究将对中国南方冬季各类持续性异常事件的环流特征进行分析,讨论其中的差别。不同于以往研究寒潮天气过程的工作,本研究主要使用各种要素的气候异常值进行分析,兼顾各类事件的天气特征和气候特征,将为下一步利用异常环流信号的持续性开展南方冬季持续性异常事件的次季节预测研究提供依据。

对各类冬季持续性事件环流特征的分析必须基于对持续性事件准确而客观的定义。目前,对极端异常事件的定义方法主要有3类:单站阈值类(Horton, et al, 2001; Yan, et al, 2002),区域平均序列类(Walsh, et al, 2001),单站阈值及阈值范围类(Zhang, et al, 2011)。很多学者从天气学的视角对中国冬季气温、降水特征进行分类讨论,如龚志强等(2009)对近58年中国冬季气温极端事件进行分区研究;Wang等(2014)利用雨淞发生的天数和站

点数对中国冰冻事件进行分类,定义了大范围持续性雨淞事件;Qian等(2014)利用极端气温、降水及其持续时间定义了持续性湿冻事件。持续性异常事件既是天气事件,也是气候异常的表现,但通常的气候研究多使用月至季平均,不能反映月以下尺度的变化特征,而持续1个月以上的异常事件极其罕见。因此,有必要采用逐日气候异常序列去重新定义持续性异常事件。

综上所述,本研究将首先从逐日气候异常的角度,利用气温和降水的双重指标,参考已有研究成果(Wang, et al, 2014; Qian, et al, 2014),综合天气和气候两种特征,对中国南方冬季各类异常事件进行分类。在此基础上,对各类持续性异常事件对应的异常环流特征进行对比分析,以期找到最易致灾的低温雨雪冰冻事件与其他异常事件的区别,为提高南方冬季灾害性天气预报能力、形成无缝隙气象预报体系提供依据。

2 资料和方法

采用1981—2010年中国2474台站观测的日平均气温及08—08时(北京时,下同)24 h累积降水量定义中国南方持续性异常事件,探讨各类持续性异常事件期间中国气温和降水的分布。同时,使用1981—2010年NCEP-DOE(National Centers for Environmental Prediction-Department of Energy)逐日再分析资料描述与持续性天气相联系的大尺度环流特征,包括纬向风(u)、经向风(v)、位势高度等要素。文中冬季指上一年12月至当年2月,如1985年冬季为1984年12月1日至1985年2月28日的90天连续序列。除特殊说明外,气象要素均使用相对于1981—2010年30年气候平均态的距平序列。

各类异常事件的定义均基于区域平均的标准化降水和气温异常序列,其中异常持续时间的阈值采用百分位排序法确定,对达到一定强度的气温或降水异常事件的持续天数由低到高排序,然后将某个百分位对应的天数作为持续性异常事件挑选的时间阈值。分析发现,降水异常偏多持续4 d且峰值超过1个标准差、气温异常偏高(标准化距平大于1)或偏低(标准化距平小于-1)持续6 d的异常事件数均位于约第5—7个百分位处,属于极端异常事件,因此,将以上两个标准作为挑选各类事件的阈

值,干异常事件则因较易持续而对持续时间不做要求。

对各类异常事件对应的气温、降水及环流特征进行合成分析,并使用单要素均值 t 检验进行信度检验(Wilks, 2006)

$$t = \frac{\bar{x}}{[\widehat{Var}(\bar{x})]^{1/2}} \quad (1)$$

式中, \bar{x} 是合成的异常值, $\widehat{Var}(\bar{x})$ 为异常样本的方差估计。

3 中国南方持续性异常事件分类与定义

3.1 中国南方持续性异常事件关键区的选取

为了客观确定中国南方持续性异常事件频发区,对1981—2010年(20°—35°N, 100°—125°E)区域内站点降水与气温异常的逐日标准化序列(长度为90×30 d)进行多变量联合经验正交函数(EOF)分析(Wheeler, et al, 2004; Yang, et al, 2008),得到的前3个模态的方差贡献率依次为31.52%、12.50%和5.77%。经North等(1982)判据法检验,各模态之间可以有效地分离。前两个模态的解释方差占总方差的40%以上,比其后模态要大得多,因此,这里主要分析前两个模态的特征,可以看出,前两个模态降水与气温的协同变化在江南地区有着明显不同的特征(图1)。

第1模态表现为气温异常在整个35°N以南的区域符号一致,并且没有明显的梯度特征,而降水异常则大致以长江为界南北反号;第2模态降水异常全区一致,最强异常区位于长江中下游地区,气温则在华南沿海和西南地区与其他区域反号,且在长江中游有明显的异常强中心。发现第2模态显示的区域特征在湘赣鄂三省交界处通常降水偏多伴随气温偏低,这正是Wang等(2014)给出的中国冻雨高发区。因此,选择(27°—32°N, 110°—116°E)作为研究中国南方持续性异常事件的关键区(图1红框所示,包含144个气象站)。

3.2 区域持续性异常事件的分类及定义

根据区域平均逐日降水和气温标准化异常序列,对关键区中冬季持续性异常事件进行分类定义,共分为4类:冷湿事件、冷干事件、暖湿事件和暖干事件。

冷湿事件,即低温雨雪冰冻事件。通过分析逐日降水和气温异常序列并对比以往研究结果,发现

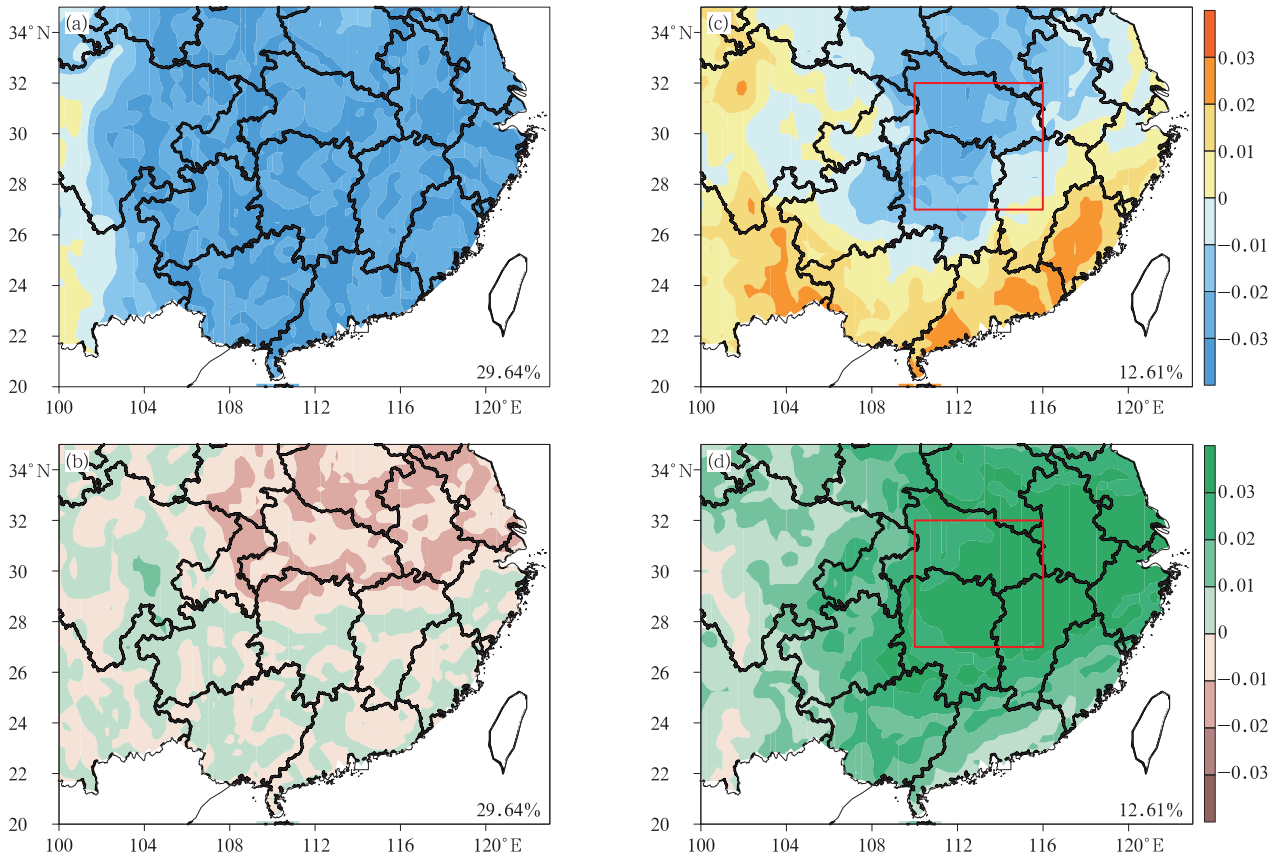


图1 中国南方逐日标准化气温(a,c)与降水(b,d)异常联合经验正交函数分解第1(a,b)及第2(c,d)模态

Fig. 1 Spatial patterns of the first (a, b) and second (c, d) leading modes of combined EOF analysis on standardized anomalies of daily air temperature (a, c) and precipitation (b, d) over southern China

此类事件中降水和气温异常并非完全同时发生,通常是在较长的气温异常持续过程中发生多次降水过程,导致了持续时间较长的冰冻事件,因而影响巨大。因此,对此类事件定义必须满足两个条件:(1)区域平均标准化气温距平小于 -1 并持续6 d以上;(2)低温期间出现一次或多次持续4 d以上的降水偏多时段。整个事件的时间定义为达到上述标准的气温或降水异常出现的第一天到最后一天。以2008年1—2月为例(图2),标准化气温距平于1月13日小于 -1 ,并一直持续至2月14日。低温期间有3次降水偏多持续4 d以上且峰值大于1。因此,2008年1—2月的冷湿事件定义为1月11日至2月14日。根据上述标准,1981—2010年冷湿事件发生7次(表1)。因降水持续偏多时段仅占整个事件的一部分,同时给出了各事件的降水时段,便于合成分析中重点分析降水阶段的温湿状况和环流特

征。

冷干事件指关键区温度持续偏低但降水偏少,定义标准为:标准化后的区域平均气温距平持续小于 -1 的日数超过6 d,期间标准化降水距平小于0。按照上述标准对30年的序列进行挑选,共选出11次冷干事件(表2)。可以看出此类事件在12和1月发生的频率高于2月,可能与南支槽在2月最活跃,中国南方降水随之增多有关(Li, et al, 2012)。

暖湿事件指关键区内降水持续偏多、气温持续偏高,定义标准为:降水偏多持续4 d以上且峰值大于1个标准差,期间标准化气温距平大于1且持续6 d以上。依照此标准,暖湿事件在30年中共发生6次(表3)。

暖干事件指关键区降水偏少,温度持续偏高,需满足条件:气温标准化序列持续大于1的日数超过6 d,期间标准化降水距平全部小于0。30年中,南

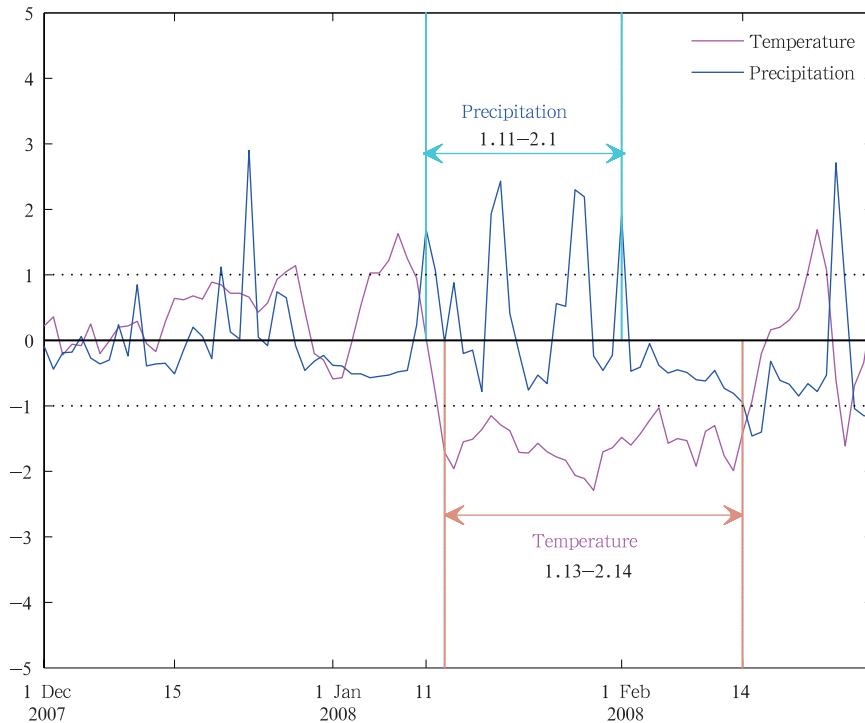


图2 2008年冬季关键区域平均的降水和气温逐日标准化序列

Fig. 2 Time series of regional averages of standardized daily precipitation and air temperature anomalies over the key region in the winter of 2008

表1 1981—2010年中国南方冬季冷湿事件

Table 1 List of cold-wet events in southern China during 1981 - 2010

年份	时段	持续时间(d)	降水时段	
			日期	持续时间(d)
1981	1月20—30日	11	1月20—23日	4
1982	2月2—14日	13	2月2—9日	8
1984	1月17日—2月14日	29	1月17—20日	4
1985	12月12—30日	19	12月12—17日	6
1992	12月23日—1月2日	11	12月23—27日	5
2005	12月21日—1月2日	13	12月21—27日	7
2008	1月11日—2月14日	35	1月11日—2月1日	22

表2 1981—2010年中国南方地区冬季冷干事件

Table 2 List of cold-dry events in southern China during 1981 - 2010

年份	日期	持续时间(d)
1984	12月28日—1月5日	9
1985	2月17—28日	12
1986	12月7—12日	6
1988	12月1—7日	7
1988	2月14—19日	6
1993	1月14—21日	8
1998	1月15—20日	6
2000	1月25日—2月4日	12
2003	12月24—29日	6
2003	1月3—8日	6
2010	1月11—16日	6

方地区暖干事件共发生10次(表4)。

3.3 南方持续性温湿异常事件的大范围降水和气温分布特征

以上4类事件中,冷湿事件对日常生活和工农业生产影响最大,因而备受关注,也是本研究的重点。为了清晰显示与其他事件的区别,对4类事件对应的中国范围内的站点降水和气温异常均进行了合成(图3)。需要说明的是,对于冷湿事件,因降水时段只占整个事件的一部分,为了突出降水异常特

表3 1981—2010年中国南方地区冬季暖湿事件

Table 3 List of warm-wet events over southern China during 1981 - 2010

年份	日期	持续时间(d)
1990	2月15—21日	7
1991	1月22—25日	4
1993	2月17—20日	4
2001	1月21—25日	5
2003	12月16—22日	7
2003	2月25—28日	4

表 4 1981—2010 年中国南方地区
冬季暖干事件

Table 4 List of warm-dry events in
southern China during 1981–2010

年份	日期	持续时间(d)
1984	12月5—10日	6
1988	12月22—29日	8
1999	12月14—28日	15
1999	2月23—28日	6
2002	1月5—14日	10
2003	1月12—18日	7
2004	2月12—19日	8
2007	1月29日—2月5日	8
2008	1月5—10日	6
2009	2月9—14日	6

征,图 3a 仅给出降水时段的平均降水异常,其他均为整个事件的合成结果。

基于冷湿事件合成的气温异常分布显示,除青藏高原和西南部分地区外,中国大范围气温偏低,南方最强气温异常超过 -5°C (图 3a)。期间降水时段中国大部分地区降水偏多,大值中心位于江南地区,日降水异常超过 5 mm,只有东北及新疆西北部降水偏少(图 3b)。不难发现,这里给出的降水和气温异常的分布与 2008 年 1 月极为相似(Wen, et al, 2009)。为排除合成结果受 2008 年极端事件影响太大,剔除 2008 年事件后再对气温和降水异常进行合成,结果表明气温和降水异常的分布未发生明显变化,只是异常中心强度略有所减弱(图略)。因此,在后面的环流分析中,依然保留了 2008 年的极端事件。

冷干事件中,中国气温异常的分布与冷湿事件相似,大部分地区温度偏低,尤其是中东部,气温异常超过 -4°C (图 3c)。降水异常分布则与冷湿事件明显不同,中国大部地区降水偏少,关键区为降水负异常中心,只有华南和云贵地区降水偏多(图 3d)。

暖湿事件期间对应中国大部分地区降水偏多、气温偏高,最大值出现在内蒙古中西部及华南沿海,而在新疆西北部、云南西部等地有负异常(图 3e),降水正异常的大值中心就在关键区附近,日降水异常可超过 5 mm(图 3f)。

对 10 次中国南方异常暖干事件期间中国范围

对应的气温、降水异常场的合成(图 3g、h)显示,中国大范围气温偏高,关键区内正异常最大值可超过 4°C ,而在青藏高原及云南的小部分地区出现小范围负异常。同时大部分地区降水偏少,江南尤为明显,只有东北及新疆北部等地区降水稍偏多。同时可以发现,暖干事件气温和降水的异常分布与冷湿事件几乎正好相反,这进一步表明文中对温湿异常事件的定义是合理的。

4 各类持续性异常事件对应的大尺度环流异常

持续性异常事件的发生通常需要持续性的大尺度环流异常条件,同时,第 3 节给出的 4 类事件的气温和降水异常分布也显示出与中国大范围气候异常有密切联系,因此,必然受到大尺度环流异常的影响。本节将给出 4 类事件合成的大尺度环流异常特征,讨论异常环流对持续性异常事件的影响,且将重点分析冷湿事件对应的环流特征,而对其他事件的分析是为了确定哪些环流特征是影响冷湿事件的关键因子。

众所周知,中高纬度异常具有相当正压结构,因此,在不同高度上分布形势基本相似,合成结果也显示出这种特征。本节中主要采用 200 hPa 讨论中高纬度系统的变化及冷空气的活动,而用 850 hPa 环流并结合整层水汽输送讨论低纬度系统和水汽条件的影响。

为讨论环流异常对应的各个系统的活动情况,首先给出各要素 30 年气候平均状况(图 4)。200 hPa 受极地低压(极涡)影响在东亚沿岸向南形成东亚大槽, 120°E 以西的西伯利亚上空为温带急流,槽底为东亚副热带急流。500 hPa 东亚大槽较 200 hPa 略偏东,西伯利亚至青藏高原北部有明显的暖脊。850 hPa 上,中国东部以长江为界,以北基本上为一致的西北气流,以南有偏南气流,关键区正处在一个南北风转换的区域。受青藏高原影响,西风带在青藏高原南侧形成低槽,中国南方整层为西偏南水汽输送,从中南半岛中部至华南有一个明显的水汽辐合区。

4.1 冷湿事件环流特征

在异常冷湿事件中,降水异常偏多时段通常只

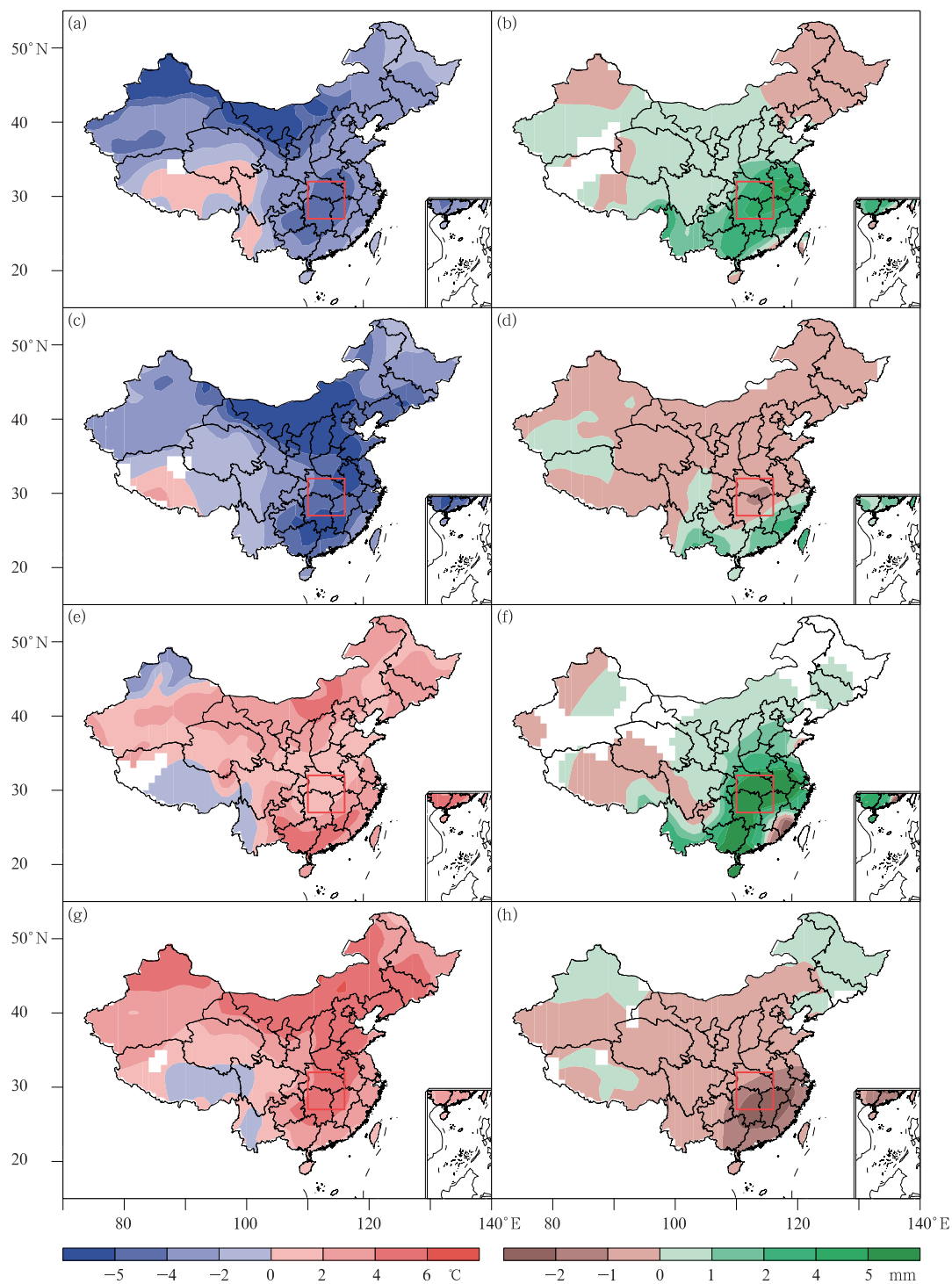


图3 中国南方4类持续性异常事件期间,中国范围的气温(a,c,e,g,单位:°C)

及降水(b,d,f,h,单位:mm)异常合成场

(a,b,冷湿事件,c,d,冷干事件,e,f,暖湿事件,g,h,暖干事件;仅给出通过95%的信度检验部分,

其中冷湿事件的降水场为基于降水时段的合成)

Fig. 3 Composite anomalies of air temperature (a, c, e, g, °C) and precipitation (b, d, f, h, mm)

in China for four types of persistent anomalous events

(a, b, cold-wet event, c, d, cold-dry event, e, f, warm-wet event, g, h, warm-dry event; precipitation

anomalies for cold-wet events are only averaged over rainy periods; shaded areas denote

the values significant at the 95% confidence level)

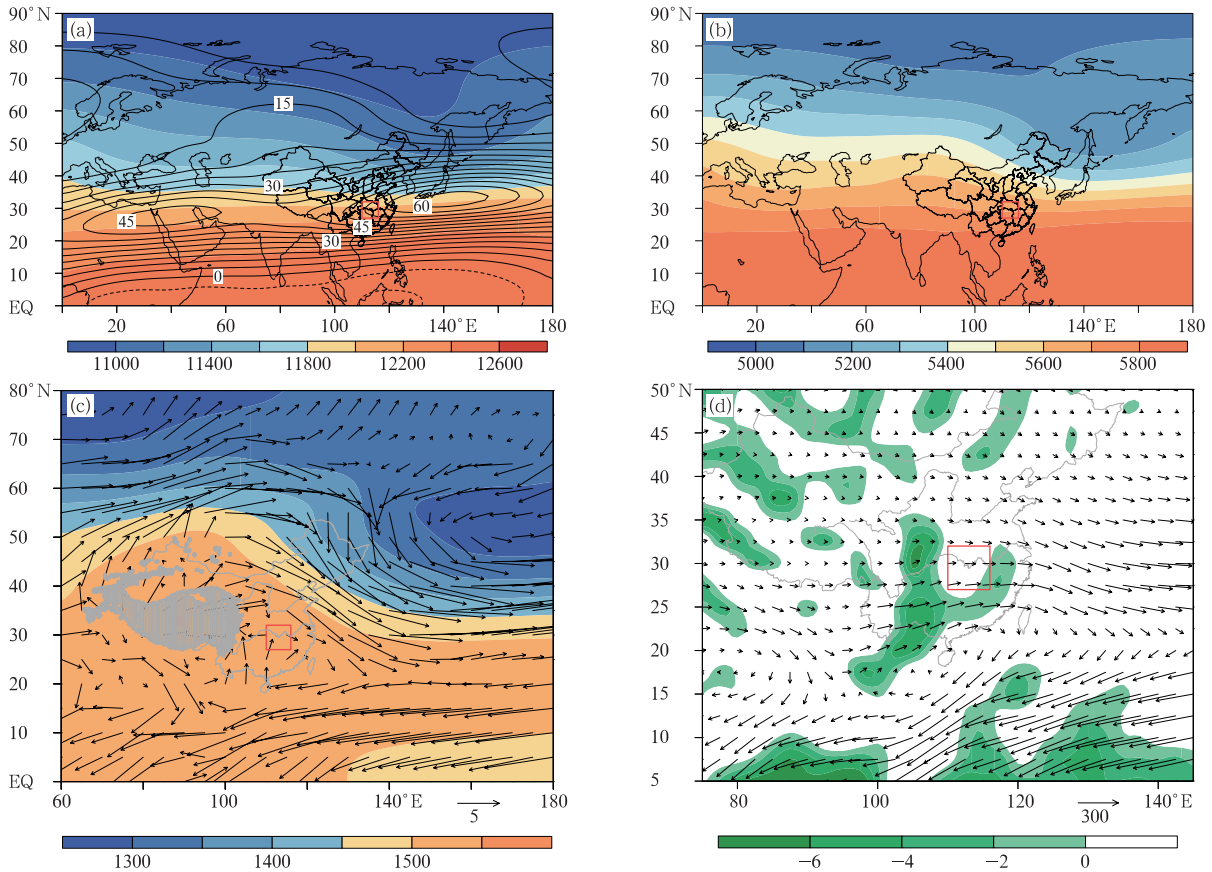


图4 1981—2010中国南方冬季对流层高、低层环流和整层水汽输送气候态分布
(a. 200 hPa 位势高度场(色阶,gpm)及纬向风场(等值线,m/s), b. 500 hPa 位势高度场(色阶,gpm),
c. 850 hPa 位势高度场(色阶,gpm)及风场(矢量,m/s), d. 整层水汽输送(矢量,kg/(m·s))
及其散度(色阶,10⁻⁵ kg/(m²·s))

Fig. 4 Climatological atmospheric circulation and water vapor transport over southern China during winter from 1981 to 2010

(a. 200 hPa geopotential height (shading, gpm) and zonal winds (contours, m/s), b. 500 hPa geopotential height (shading, gpm), c. 850 hPa geopotential height (shading, gpm) and winds (vectors, m/s),
d. water vapor flux (vectors, kg/(m·s)) and water vapor divergence (shading, 10⁻⁵ kg/(m²·s))

是事件中某些阶段。为了突出产生降水异常的环流特征,仅给出基于降水时段合成的异常环流形势。实际上,基于整个事件的合成环流与降水阶段比较相似,主要的不同体现在中纬度地区,与后述的冷干事件更为相似,体现了持续低温的背景条件。

200 hPa 高度场(图 5a)显示亚欧大陆主要为“北高南低”的异常分布,即以贝加尔湖为界,以北的高纬度地区大部分为正异常,以南为负异常,此时对应的是北极涛动负位相。这种高度场异常分布使得东亚地区急流发生变化:50°N 左右正负异常交界处为东风异常,30°N 附近为西风异常,因此,温带急流减弱、副热带西风急流增强。这种异常环流形势有

利于冷空气向南爆发(张春艳等,2013;姚慧茹等,2013)。此外,贝加尔湖以南的负异常中心位于中国西部和中亚地区,中国东部至日本为正异常区,呈东西偶极分布。这种“东高西低”的形势表明西风带低槽活跃、西太平洋副热带高压偏强偏北,有利于水汽输送。

850 hPa 环流场上(图 5b),80°E 附近为明显低槽区,即对应南支槽活跃,使得中国南方大部分地区为偏南风距平,与北侧冷高压南部的偏北风在长江以北汇合。整层水汽输送异常(图 5d)显示,中国南方很强的西南风水汽输送,包括关键区在内的南方地区为强水汽辐合区,有利于降水产生。

海平面气压场上的异常环流形势与 850 hPa 类似(图 5c),但异常高压的范围均较 850 hPa 偏南,偏北风基本控制整个关键区。850 hPa 上的偏南风气流使上层变得暖湿,而地面上一致的偏北气流使地

面附近变得干冷,这种垂直逆温结构也符合冰冻雨雪事件形成的条件(陶祖钰等,2008;杨贵名等,2009)。

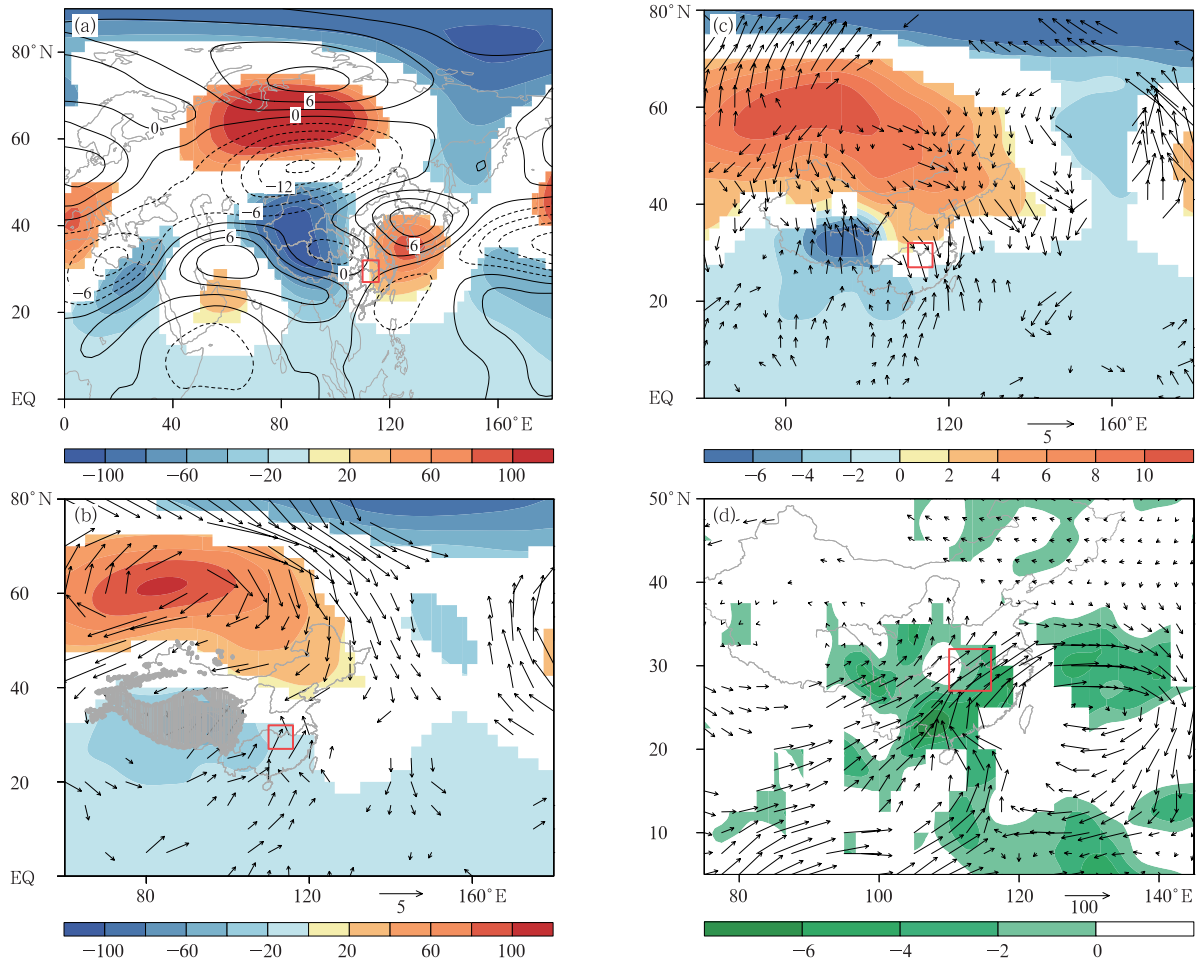


图 5 1981—2010 中国南方冬季冷湿事件期间对流层高、低层环流异常和整层水汽输送异常分布

(a. 200 hPa 位势高度异常(色阶,gpm)及纬向风异常(等值线,m/s), b. 850 hPa 位势高度异常(色阶,gpm)及风场异常(箭头,m/s), c. 海平面气压异常(色阶,hPa)及近地面 10 m 风(m/s), d. 为整层水汽输送(矢量,kg/(m·s))及其散度(色阶, 10^{-5} kg/(m²·s));仅给出通过 95% 的信度检验部分)

Fig. 5 Composite patterns of atmospheric circulation anomalies and water vapor transport for cold-wet events over southern China during 1981 – 2010

(a. 200 hPa geopotential height anomaly (shading, gpm) and zonal wind anomaly (contours, m/s), b. 850 hPa geopotential height anomaly (shading, gpm) and wind anomaly (vectors, m/s), c. sea level pressure anomaly (shading, hPa) and 10 m wind anomaly (m/s), d. water vapor flux anomaly (vectors, kg/(m·s)) and water vapor divergence anomaly (shading, 10^{-5} kg/(m²·s)); shaded and vectors areas denote the values significant at the 95% confidence level)

4.2 冷干事件环流特征

中国南方冬季冷干事件期间,中高纬度位势高度异常呈现出类似斯堪的纳维亚(SCAND)遥相关正位相的环流特征(刘毓赞等,2012;Liu, et al,

2014)。喀拉海至西伯利亚上空为正异常,欧洲和贝加尔湖以南地区为负异常,该负异常向东一直延伸到日本附近(图 6a)。与此对应,高纬度温带急流区东风异常,使急流偏弱,而西伯利亚上空冷高压发

展,东亚大槽加深,有利于高纬度冷空气大范围向南爆发。需要指出的是,60°E 以东的欧亚大陆上空异常环流分布同样为“北高南低”的偶极型,与上述给出的冷湿事件极为相似,由此进一步说明了这种异常形势对冷空气向南爆发的重要性。两者的主要区别在于偶极型异常东侧副热带地区的正异常中心偏东,西太平洋副热带高压偏东,可能影响下层的水汽输送。

850 hPa 异常环流显示冷高压异常强大(图 6b),控制了我国以北的中高纬度地区,冷高压前锋可达到较南纬度(图 6c),我国范围上均为一致的偏北气流,此时对应我国全国性的寒潮事件。同时,西太平洋副热带高压位置偏东,其西侧的偏南风位于我国以东的洋面上,与 200 hPa 高度场异常一致,不利于水汽在我国南方地区汇集(图 6d),因此降水偏少。由于冷空气势力较强,可以到达中国大陆南端,

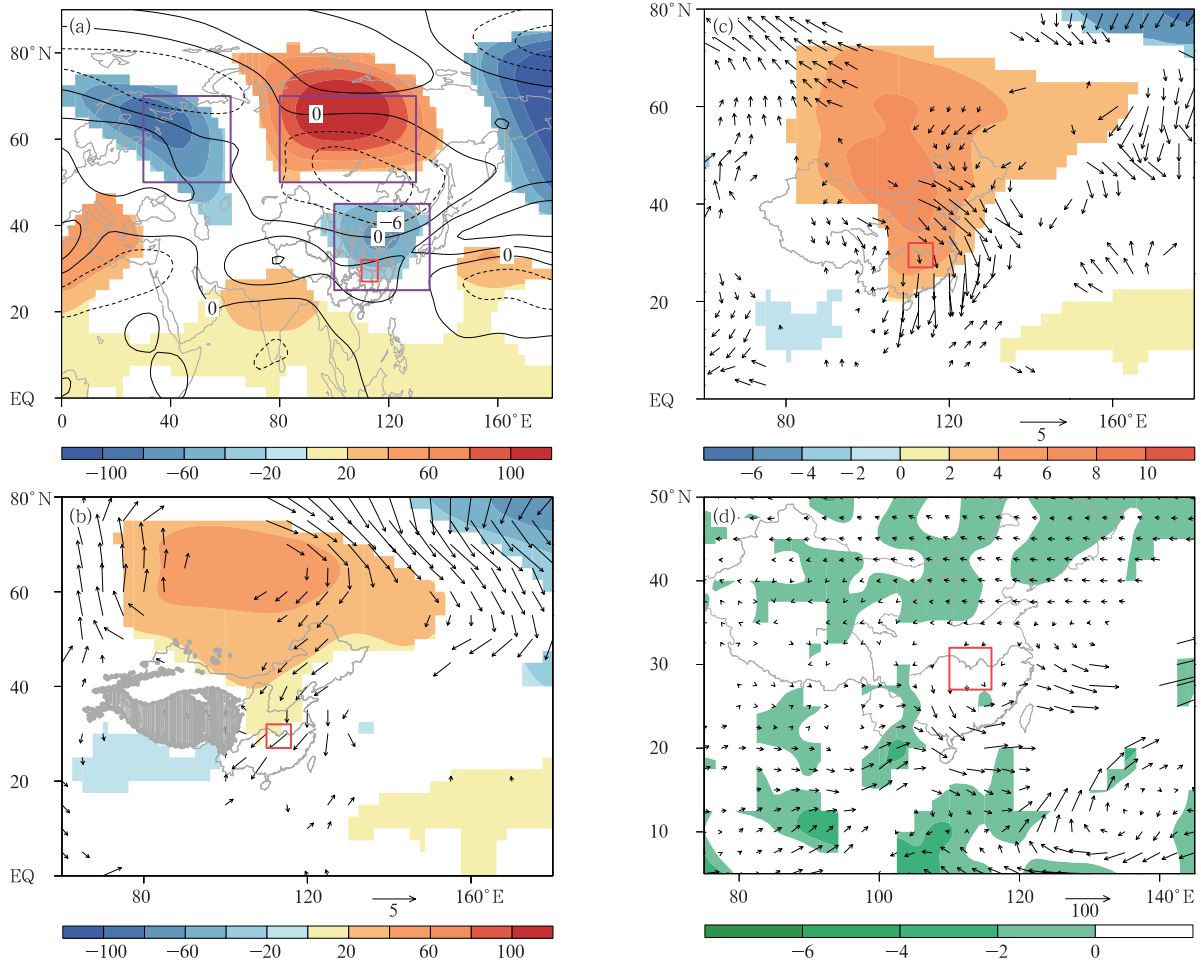


图 6 1981—2010 中国南方冬季冷干事件期间异常环流场和整层水汽输送异常分布

(a. 200 hPa 位势高度异常(色阶, gpm)及纬向风异常(等值线, m/s), b. 850 hPa 位势高度异常(色阶, gpm)及风场异常(矢量, m/s), c. 海平面气压异常(色阶, hPa)及近地面 10 m 风(m/s), d. 整层水汽输送(矢量, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)及其散度(色阶, $10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); 仅给出通过 95% 的信度检验部分)

Fig. 6 Composite patterns of atmospheric circulation anomalies for cold-dry events over southern China during 1981–2010

(a. 200 hPa geopotential height anomaly (shading, gpm) and zonal wind anomaly (contours, m/s), b. 850 hPa geopotential height anomaly (shading, gpm) and wind anomaly (vectors, m/s), c. sea level pressure anomaly (shading, hPa) and 10 m wind anomaly (m/s), d. water vapor flux anomaly (vectors, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) and water vapor divergence anomaly (shading, $10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); shaded and vectors areas denote the values significant at the 95% confidence level)

在华南沿海地区形成一个异常的气旋性环流,正处于冷暖空气交汇地区,在中国西南地区有水汽辐合并且向下游输送,造成华南和云贵地区降水偏多,这与之前中国范围的降水和气温特征也是一致的。

4.3 暖湿事件环流特征

暖湿事件时期,200 hPa 位势高度在高纬度地区异常为负异常(图 7a),表明冷空气不活跃。与冷湿事件相似的是,中纬度地区欧亚大陆上为“东高西

低”,在亚洲东海岸有明显的位势高度正异常中心,以西为位势高度负异常。这种异常环流形势不利于北方高压脊(塞阻高压)生成和维持,会使东亚大槽减弱,因此没有明显冷空气向南入侵,而中纬度地区“东高西低”的异常环流表明副热带高压偏西、西侧热带系统活跃,有利于中低层水汽输送到达中国南方地区。同时,副热带西风急流入口区减弱、出口区加强,即中国南方高空辐散加强,有利于垂直上升运

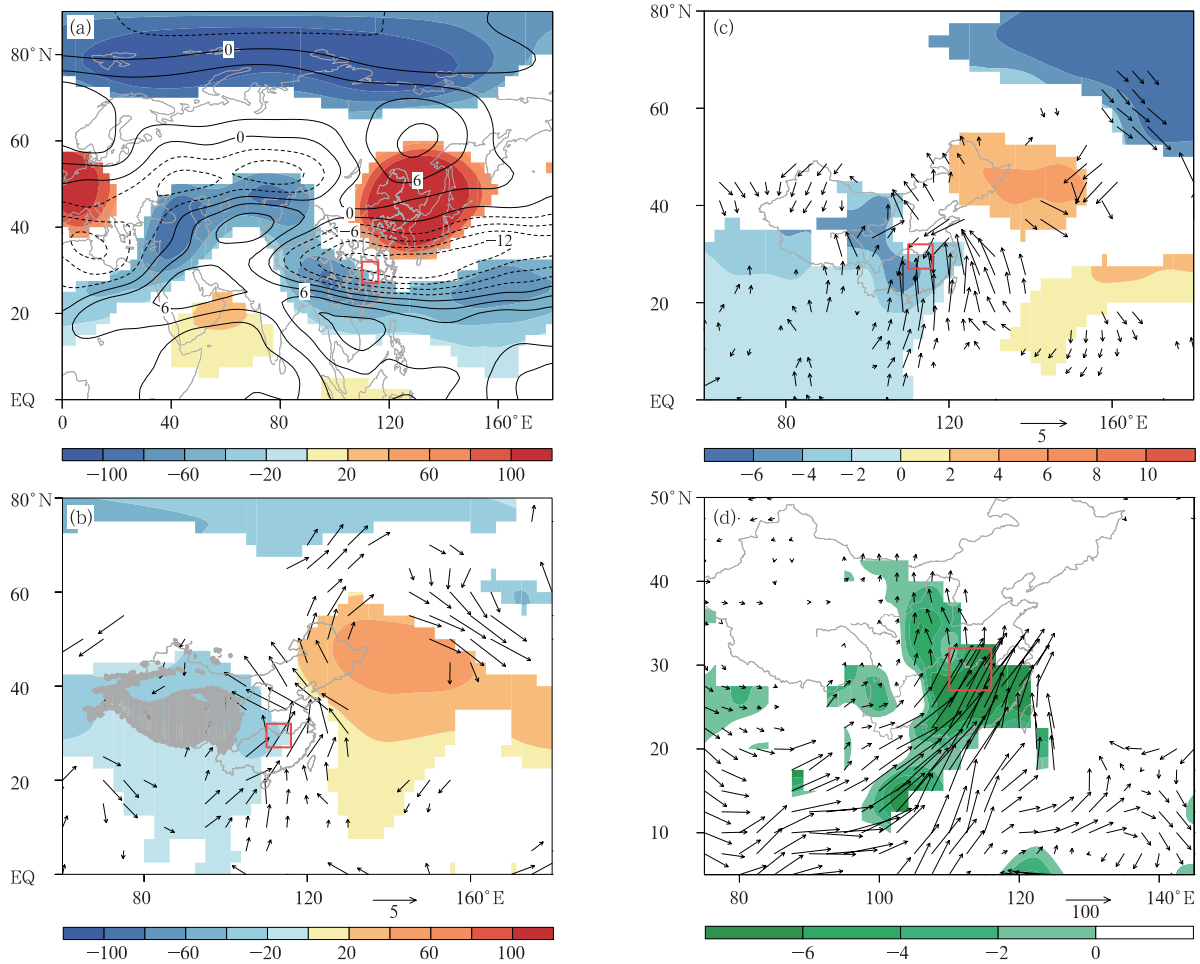


图 7 1981—2010 中国南方冬季暖湿事件期间异常环流场和整层水汽输送异常分布
 (a. 200 hPa 位势高度异常(色阶,gpm)及纬向风异常(等值线,m/s), b. 850 hPa 位势高度异常(色阶,gpm)及风场异常(矢线,m/s), c. 海平面气压异常(色阶,hPa)及近地面 10 m 风(m/s), d. 整层水汽输送(矢线, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)及其散度(色阶, $10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$);仅给出通过 95% 的信度检验部分)

Fig. 7 Composite patterns of atmospheric circulation anomalies for warm-wet events over southern China during 1981 – 2010

(a. 200 hPa geopotential height anomaly (shading, gpm) and zonal wind anomaly (contours, m/s),
 b. 850 hPa geopotential height anomaly (shading, gpm) and wind anomaly (vectors, m/s),
 c. sea level pressure anomaly (shading, hPa) and 10 m wind anomaly (m/s), d. water vapor flux anomaly (vectors, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) and water vapor divergence anomaly (shading, $10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); shaded and vectors areas denote the values significant at the 95% confidence level)

动及降水的产生。

对流层低层 850 hPa 和海平面气压场上(图 7b,c),在中国大陆东岸存在一个十分明显的反气旋性环流异常,其西南侧的偏南风异常气流使关键区空气温暖潮湿,在江南与弱冷空气汇合从而产生降水,与高层位势高度负异常一致。从整层水汽输送上来看(图 7d),关键区存在很强的偏南风水汽输送和水汽辐合,水汽条件充足,也有利于降水偏多。

4.4 暖干事件环流特征

暖干事件期间,200 hPa 位势高度异常场上(图 8a),欧亚大陆上空异常中心成带状分布,且“北低南高”,正好与冷湿事件相反。以贝加尔湖为界,以南基本上为位势高度正异常区,以北为位势高度负异常,表明北方冷空气活动明显减弱,而副热带高压异常偏强偏北。这种高度场异常配置在东亚副热带西风急流区产生东风异常,使急流减弱;而副极地低压

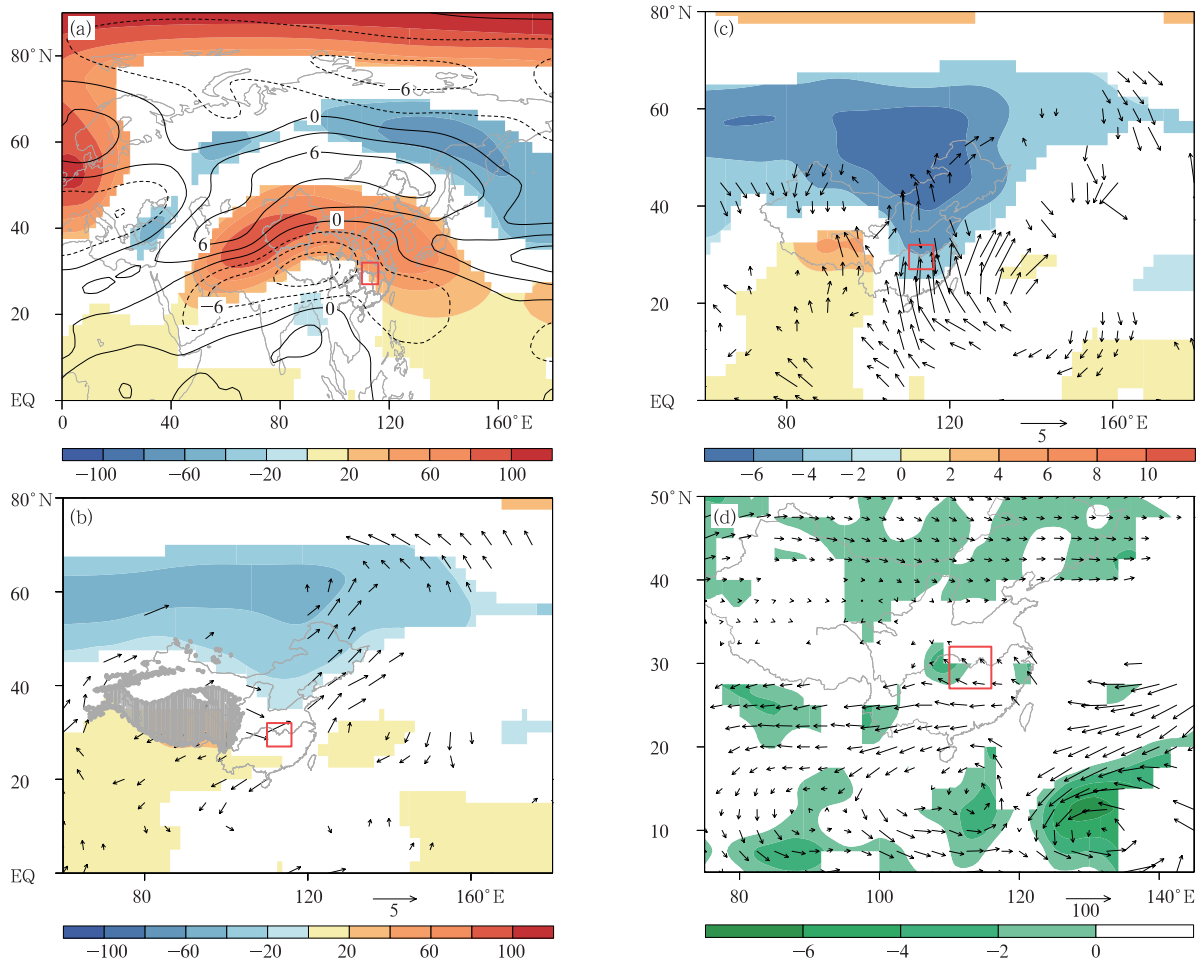


图 8 1981—2010 中国南方冬季暖干事件期间异常环流场和整层水汽输送异常分布

(a. 200 hPa 位势高度异常(色阶,gpm)及纬向风异常(等值线,m/s), b. 850 hPa 位势高度异常(色阶,gpm)及风场异常(矢量,m/s), c. 海平面气压异常(色阶,hPa)及近地面 10 m 风(m/s), d. 整层水汽输送(矢量, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)及其散度(色阶, $10^{-5} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); 仅给出通过 95% 的信度检验部分)

Fig. 8 Composite patterns of atmospheric circulation anomalies for warm-dry events over southern China during 1981–2010

(a. 200 hPa geopotential height anomaly (shading, gpm) and zonal wind anomaly (contours, m/s), b. 850 hPa geopotential height anomaly (shading, gpm) and wind anomaly (vectors, m/s), c. sea level pressure anomaly (shading, hPa) and 10 m wind anomaly (m/s), d. water vapor flux anomaly (vectors, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) and water vapor divergence anomaly (shading, $10^{-5} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); shaded and vectors areas denote the values significant at the 95% confidence level)

带异常加强,在中高纬度地区产生西风异常,使温带急流加强,盛行纬向环流,东亚大槽填塞,西侧高压脊减弱,不利于极地冷空气向低纬度输送,东亚寒潮活动较弱。同时,热带系统不活跃。

850 hPa 和海平面气压场上(图 8b、c),中高纬度为大范围负的位势高度异常,低纬度为正位势高度异常,对应着东亚冬季风环流偏弱,偏南气流可以到达比较北的位置,造成全中国范围内温度偏高。但应注意,异常偏南气流主要来自大陆低压绕青藏高原后形成的西南风,没有明显源自海洋上空的水汽输送。整层水汽输送异常也显示关键区盛行偏东风水汽输送(图 8d),水汽辐合较弱,同时缺少冷空气的配合。因此,不具备产生降水的条件,中国南方地区气温偏高降水偏少。

4.5 小结

通过对中国南方 4 类持续性温湿异常事件对应的环流特征的分析,发现冷湿事件对应的异常环流显示出在欧亚大陆上空中高纬度地区“北高南低”和中纬度地区“东高西低”的异常环流型的组合特征,而冷干事件和暖湿事件中分别只出现其中一种异常环流型,暖干事件的异常环流则几乎与冷湿事件相反。由此可见,上述“北高南低”和“东高西低”的异常环流型是冷湿事件的关键环流系统,其共同影响使得中国南方地区冬季出现持续性低温雨雪冰冻天气。

5 结论与讨论

冬季中国南方地区长时间的低温雨雪冰冻天气是一种影响严重的极端事件,通常由多次雨雪过程组成。对于这类事件,往往可以准确预测出每次过程,但对多次过程的持续影响把握不足,不能及时采取有效措施防范灾害的发生。因此,有必要对中国南方冬季持续性异常事件的特征及规律进行研究。

基于持续性事件具有天气和气候双重特点,利用逐日气温和降水异常序列,对中国南方冬季持续性异常事件进行了分类,并对各类事件的大尺度异常环流特征进行了分析,总结了产生持续性气温异常和持续性降水异常的条件。根据降水异常和气温异常的特征,将中国南方冬季持续性异常事件分为了 4 类,分别是冷湿事件、冷干事件、暖湿事件和暖干事件,其中冷湿事件对应持续性低温雨雪冰冻事件。

虽然仅以中国南方局部地区作为参考划分持续性异常事件,但异常气温和降水分布表明它们也对应了中国大范围天气、气候异常,是在一定的大尺度环流异常条件下发生的。首先,欧亚大陆上位势高度异常的“北高南低”形势使得中高纬度环流经向度加大,有利于冷空气在西伯利亚地区聚集向东南入侵和大范围降温。反之,则冷空气活动减弱,且不易南下影响中国南方地区。其次,欧亚中纬度地区“东高西低”型的异常环流表明,中低纬度地区有低槽频繁东移,西太平洋副热带高压偏强偏北,为南方地区提供持续的水汽条件,因此降水偏多。如低纬度地区的异常成带状分布、波动不明显,则不利于水汽向北输送、降水偏少。冷湿事件的异常环流同时具备了“北高南低”和“东高西低”两种环流异常特征,因此出现持续性低温雨雪天气。

通过本研究,发现了有利于降水和降温的不同异常环流型,未来将根据以上环流型定义指数,寻找可能提前预示持续性异常事件的信号,尤其是针对低温雨雪冰冻(冷湿)事件,为提高中国南方冬季持续性异常天气的预报技巧提供依据。

参考文献

- 丁一汇. 1990. 东亚冬季风的统计研究. 热带气象学报, 6(2): 119-128. Ding Y H. 1990. A statistical study of winter monsoons in East Asia. J Trop Meteor, 6(2): 119-128 (in Chinese)
- 丁一汇, 柳艳菊, 梁苏洁等. 2014. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系. 气象学报, 72(5): 835-852. Ding Y H, Liu Y J, Liang S J, et al. 2014. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change. Acta Meteor Sinica, 72(5): 835-852 (in Chinese)
- 高辉, 陈丽娟, 贾小龙等. 2008. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 II: 成因分析. 气象, 34(4): 101-106. Gao H, Chen L J, Jia X L, et al. 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in South China during January 2008: II. Possible climatic causes. Meteor Mon, 34(4): 101-106 (in Chinese)
- 龚志强, 王晓娟, 支蓉等. 2009. 中国近 58 年温度极端事件的区域特征及其与气候突变的联系. 物理学报, 58(6): 4342-4353. Gong Z Q, Wang X J, Zhi R, et al. 2009. Regional characteristics of temperature changes in China during the past 58 years and its probable correlation with abrupt temperature change. Acta Phys Sinica, 58(6): 4342-4353 (in Chinese)
- 郭其蕴. 1994. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系. 应用气象学报, 5(2): 218-225. Guo Q Y. 1994. Relationship between the variations of East Asian winter monsoon and temperature a-

- nomalies in China. *Quart J Appl Meteor*, 5(2): 218-225 (in Chinese)
- 贺圣平, 王会军. 2012. 东亚冬季风综合指数及其表达的东亚冬季风年际变化特征. *大气科学*, 36(3): 523-538. He S P, Wang H J. 2012. An integrated East Asian winter monsoon index and its interannual variability. *Chinese J Atmos Sci*, 36(3): 523-538 (in Chinese)
- 李崇银, 杨辉, 顾薇. 2008. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析. *气候与环境研究*, 13(2): 113-122. Li C Y, Yang H, Gu W. 2008. Cause of severe weather with cold air, freezing rain and snow over South China in January 2008. *Climatic Environ Res*, 13(2): 113-122 (in Chinese)
- 李崇银, 顾薇. 2010. 2008年1月乌拉尔阻塞高压异常活动的分析研究. *大气科学*, 34(5): 865-874. Li C Y, Gu W. 2010. An analyzing study of the anomalous activity of blocking high over the Ural Mountains in January 2008. *Chinese J Atmos Sci*, 34(5): 865-874 (in Chinese)
- 李明刚, 管兆勇, 梅士龙. 2016. 夏季长江中下游地区降水持续性年(代)际变异及其与环流和 Rossby 波活动的联系. *大气科学*, 40(6): 1199-1214. Li M G, Guan Z Y, Mei S L. 2016. Interannual and Interdecadal variations of summer rainfall duration over the middle and lower reaches of the Yangtze River in association with anomalous circulation and Rossby wave activities. *Chinese J Atmos Sci*, 40(6): 1199-1214 (in Chinese)
- 刘毓赞, 陈文. 2012. 北半球冬季欧亚遥相关型的变化特征及其对我国气候的影响. *大气科学*, 36(2): 423-432. Liu Y Y, Chen W. 2012. Variability of the Eurasian teleconnection pattern in the northern hemisphere winter and its influences on the climate in China. *Chinese J Atmos Sci*, 36(2): 423-432 (in Chinese)
- 马宁, 李跃凤, 琚建华. 2011. 2008年初中国南方低温雨雪冰冻天气的季节内振荡特征. *高原气象*, 30(2): 318-327. Ma N, Li Y F, Ju J H. 2011. Intraseasonal oscillation characteristics of extreme cold, snowy and freezing rainy weather in southern China in early 2008. *Plateau Meteor*, 30(2): 318-327 (in Chinese)
- 施晓晖, 徐祥德, 谢立安. 2007. 近40年来东亚冬季风的年代际时空变化趋势. *大气科学*, 31(4): 747-756. Shi X H, Xu X D, Xie L A. 2007. Interdecadal spatial-temporal change trend of East Asian winter monsoon in the last 40 years. *Chinese J Atmos Sci*, 31(4): 747-756 (in Chinese)
- 谭桂容, 陈海山, 孙照渤等. 2010. 2008年1月中国低温与北大西洋涛动和平流层异常活动的联系. *大气科学*, 34(1): 175-183. Tan G R, Chen H S, Sun Z B, et al. 2010. Linkage of the cold event in January 2008 over China to the North Atlantic Oscillation and stratospheric circulation anomalies. *Chinese J Atmos Sci*, 34(1): 175-183 (in Chinese)
- 陶祖钰, 郑永光, 张小玲. 2008. 2008年初冰雪灾害和华南准静止锋. *气象学报*, 66(5): 850-854. Tao Z Y, Zheng Y G, Zhang X L. 2008. Southern China quasi-stationary front during ice-snow disaster of January 2008. *Acta Meteor Sinica*, 66(5): 850-854 (in Chinese)
- 王东海, 柳崇健, 刘英等. 2008. 2008年1月中国南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因的初步分析. *气象学报*, 66(3): 405-422. Wang D H, Liu C J, Liu Y, et al. 2008. A preliminary analysis of features and causes of the snow storm event over the Southern China in January 2008. *Acta Meteor Sinica*, 66(3): 405-422 (in Chinese)
- 王会军, 范可. 2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征. *大气科学*, 37(2): 313-318. Wang H J, Fan K. 2013. Recent changes in the East Asian monsoon. *Chinese J Atmos Sci*, 37(2): 313-318 (in Chinese)
- 王晓娟, 龚志强, 任福民等. 2012. 1960—2009年中国冬季区域性极端低温事件的时空特征. *气候变化研究进展*, 8(1): 8-15. Wang X J, Gong Z Q, Ren F M, et al. 2012. Spatial/temporal characteristics of China regional extreme low temperature events in winter during 1960 - 2009. *Progr Inquisit Mutat Climatis*, 8(1): 8-15 (in Chinese)
- 王遵娅. 2011. 中国冰冻日数的气候及变化特征分析. *大气科学*, 35(3): 411-421. Wang Z Y. 2011. Climatic characters and changes of ice-freezing days in China. *Chinese J Atmos Sci*, 35(3): 411-421 (in Chinese)
- 王遵娅, 丁一汇. 2006. 近53年中国寒潮的变化特征及其可能原因. *大气科学*, 30(6): 1068-1076. Wang Z Y, Ding Y H. 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons. *Chinese J Atmos Sci*, 30(6): 1068-1076 (in Chinese)
- 武炳义, 卞林根, 张人禾. 2004. 冬季北极涛动和北极海冰变化对东亚气候变化的影响. *极地研究*, 16(3): 211-220. Wu B Y, Bian L G, Zhang R H. 2004. Effects of the winter AO and the Arctic sea ice variations on climate variation over East Asia. *Chin J Polar Res*, 16(3): 211-220 (in Chinese)
- 杨贵名, 毛冬艳, 孔期. 2009. “低温雨雪冰冻”天气过程锋区特征分析. *气象学报*, 67(4): 652-665. Yang G M, Mao D Y, Kong Q. 2009. Analysis of the frontal characteristics of the cryogenic freezing rain and snow weather. *Acta Meteor Sinica*, 67(4): 652-665 (in Chinese)
- 姚慧茹, 李栋梁. 2013. 亚洲急流与冬季风的关系及其对中国气候的影响. *气象学报*, 71(3): 429-439. Yao H R, Li D L. 2013. The relationship between Asian jets and the winter monsoon and their impact on climate in China. *Acta Meteor Sinica*, 71(3): 429-439 (in Chinese)
- 张春艳, 张耀存. 2013. 2008年初持续性低温雨雪冰冻事件的东亚高空急流特征. *热带气象学报*, 29(2): 306-314. Zhang C Y, Zhang Y C. 2013. The characteristics of East Asian jet stream in severe snow storm and freezing rain processes over southern China in early 2008. *J Trop Meteor*, 29(2): 306-314 (in Chinese)
- 赵平, 张人禾. 2006. 东亚-北太平洋偶极型气压场及其与东亚季风年际变化的关系. *大气科学*, 30(2): 307-316. Zhao P, Zhang R H. 2006. Relationship of interannual variation between an Eastern Asia-Pacific dipole pressure pattern and East Asian

- monsoon. *Chinese J Atmos Sci*, 30(2): 307-316 (in Chinese)
- 查书瑶, 伊兰, 赵平. 2015. 冬季华南准静止锋的结构和类型特征研究. *大气科学*, 39(3): 513-525. Zha S Y, Yi L, Zhao P. 2015. Structure and type characteristics of the winter quasi-stationary front in South China. *Chinese J Atmos Sci*, 39(3): 513-525 (in Chinese)
- Bueh C, Fu X Y, Xie Z W. 2011a. Large-scale circulation features typical of wintertime extensive and persistent low temperature events in China. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 4(4): 235-241
- Bueh C, Shi N, Xie Z W. 2011b. Large-scale circulation anomalies associated with persistent low temperature over southern China in January 2008. *Atmos Sci Lett*, 12(3): 273-280
- Chen Y, Zhai P M. 2014. Precursor circulation features for persistent extreme precipitation in central-Eastern China. *Wea Forecasting*, 29(2): 226-240
- Chen Y, Zhai P M. 2015. Synoptic-scale precursors of the East/Asia Pacific teleconnection pattern responsible for persistent extreme precipitation in the Yangtze River Valley. *Quart J Roy Meteor Soc*, 141(689): 1389-1403
- Gao H, Yang S. 2009. A severe drought event in northern China in winter 2008 - 2009 and the possible influences of La Nina and Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 114:D24104
- Horton E B, Folland C K, Parker D E. 2001. The changing incidence of extremes in worldwide and central England temperatures to the end of the twentieth century. *Climatic Change*, 50(3): 267-295
- Li M G, Guan Z Y, Jin D C, et al. 2016. Anomalous circulation patterns in association with two types of daily precipitation extremes over southeastern China during boreal summer. *J Meteor Res*, 30(2): 183-202
- Li Q, Zhang R H. 2012. Seasonal variation of climatological bypassing flows around the Tibetan Plateau. *Adv Atmos Sci*, 29(5): 1100-1110
- Liu Y Y, Wang L, Zhou W, et al. 2014. Three Eurasian teleconnection patterns; Spatial structures, temporal variability, and associated winter climate anomalies. *Climate Dyn*, 42(11-12): 2817-2839
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Mon Wea Rev*, 110(7): 699-706
- Qian X, Miao Q L, Zhai P M, et al. 2014. Cold-wet spells in mainland China during 1951 - 2011. *Nat Hazards*, 74(2): 931-946
- Walsh J E, Phillips A S, Portis D H, et al. 2001. Extreme cold outbreaks in the United States and Europe, 1948 - 99. *J Climate*, 14(12): 2642-2658
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's. *Adv Atmos Sci*, 18(3): 376-386
- Wang Z Y, Yang S, Ke Z J, et al. 2014. Large-scale atmospheric and oceanic conditions for extensive and persistent icing events in China. *J Appl Meteor Climatol*, 53(12): 2698-2709
- Wen M, Yang S, Kumar A, et al. 2009. An analysis of the large-scale climate anomalies associated with the snowstorms affecting China in January 2008. *Mon Wea Rev*, 137(3): 1111-1131
- Wheeler C, Hendon H H. 2004. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon Wea Rev*, 132(8): 1917-1932
- Wilks D S. 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 630pp
- Yan Z W, Jones P D, Davies T D, et al. 2002. Trends of extreme temperatures in Europe and China based on daily observations. *Climatic Change*, 53(1-3): 355-392
- Yang S, Wen M, Higgins R W. 2008. Subseasonal features of the Asian summer monsoon in the NCEP climate forecast system. *Acta Oceanol Sinica*, 27(3): 88-103
- Zhang Z J, Qian W H. 2011. Identifying regional prolonged low temperature events in China. *Adv Atmos Sci*, 28(2): 338-351