

符仙月, 布和朝鲁. 2013. 中国大范围持续性低温事件与中国南方降水异常 [J]. 大气科学, 37 (6): 1247–1260, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12131.  
Fu Xianyue, Bueh Cholaw. 2013. Wintertime extensive and persistent low-temperature events of China and anomalous precipitation over southern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (6): 1247–1260.

# 中国大范围持续性低温事件与中国南方降水异常

符仙月<sup>1</sup> 布和朝鲁<sup>2,3</sup>

1 浙江省义乌市气象局, 义乌 322000

2 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

3 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

**摘 要** 本文利用 1951~2009 年的数据资料, 探讨了与冬季大范围持续性低温事件对应的中国南方降水多寡的原因以及不同降水类型事件的不同前兆信号。主要结果如下: (1) 欧亚大陆中高纬大型斜脊斜槽是中国大范围持续性低温事件的关键环流特征。降水偏多型和偏少型低温事件的中高纬环流系统存在显著差异: 当大型斜脊的纬向尺度较大且其正高度距平中心偏强时, 斜槽的负距平中心靠近东亚大槽区, 西伯利亚高压大范围加强, 南侵冷空气活动偏强, 使中国南方地区降水偏少。相反, 当大型斜脊的纬向尺度相对小时, 斜槽位置偏西, 西伯利亚高压加强范围偏小, 南侵冷空气活动也偏弱, 有利于中国南方地区降水偏多。(2) 在低温事件中我国南方地区的降水多寡, 也取决于西太副高和孟加拉湾南支槽。当西太副高和孟加拉湾南支槽加强时, 来自西太平洋、南海和孟加拉湾的三支暖湿气流到达我国南方地区, 导致南方降水偏多, 反之亦然。(3) 不同降水类型低温事件的前兆环流信号(之前 1~3 候) 显著不同。降水偏多型低温事件前期, 源自北大西洋地区的波列向东亚地区传播。降水偏少型事件前期, 极涡在欧亚大陆一侧的次极区显著减弱, 同时极涡呈两极型, 一极伸向南欧及地中海地区, 另一极伸向阿留申群岛。在中期一延伸期时间尺度上, 这一结果可为持续性低温事件降水形势的预测提供依据。

**关键词** 持续性低温事件 降水异常 大型斜脊斜槽 西太平洋副热带高压 前兆信号

文章编号 1006-9895(2013)06-1247-14

中图分类号 P434

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12131

## Wintertime Extensive and Persistent Low-Temperature Events of China and Anomalous Precipitation over Southern China

FU Xianyue<sup>1</sup> and BUEH Cholaw<sup>2,3</sup>

1 *Yiwu Meteorological Administration of Zhejiang Province, Yiwu 322000*

2 *International Center for Climate and Environment Sciences (ICCES), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

3 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

**Abstract** The possible causes of anomalous precipitation over southern China during the wintertime extensive and persistent low-temperature events (EPLTEs) are analyzed using long-term (1951–2009) reanalysis and observational data. The precursory circulation signals for the two types of EPLTEs with below-normal and above-normal precipitation levels over southern China are also investigated. The mid-tropospheric tilted ridge and trough with a continental scale was observed to be the key common circulation feature among the EPLTEs. The high and mid-latitude circulation features

收稿日期 2013-03-22, 2013-06-24 收修定稿

资助项目 国家科技支撑计划 2009BAC51B02, 国家国际科技合作专项项目 2011DFG23450

作者简介 符仙月, 女, 1985 年出生, 助理工程师, 主要从事中高纬大气环流研究。E-mail: fxyue888@126.com

associated with the two types of EPLTEs differ significantly. When the large-scale tilted ridge shows a larger zonal extent and its positive height anomaly center attains stronger amplitude, the tilted trough appears to be close to the climatological axis of the East Asian major trough. In this case, the Siberian High is amplified extensively and the southward cold air activity is strengthened, causing below-normal precipitation over southern China. By contrast, when the large-scale tilted ridge shows a smaller zonal extent, the tilted trough is located inland, away from the climatological axis of the East Asian major trough. In this circumstance, the extent of the amplified Siberian High is smaller, the southward cold air activity is moderate, and the EPLTE is accompanied by above-normal precipitation over southern China. Moreover, it was discovered that the precipitation anomalies over southern China during EPLTEs are determined by the roles of the western Pacific subtropical high and the southern branch trough over the Bay of Bangladesh, which when intensified causes warm and wet water vapor to be transported from the western Pacific Ocean, South China Sea, and the Bay of Bangladesh to southern China to create abundant precipitation over southern China and vice versa. Further, with respect to the two types of EPLTEs, the precursory signals of the atmospheric circulation occurring 1–3 pentads before the occurrence of EPLTE, also differ. Prior to the EPLTEs with above-normal precipitation over southern China, Rossby waves originating from the North Atlantic propagated toward East Asia. For the other type of EPLTEs, the polar vortex is considerably weakened over the sub-arctic coast of the Eurasian continent, and its structure shows two poles extending toward the regions of South Europe/Mediterranean and toward the Aleutian Islands. On medium and extended time scales, this result relevant to the EPLTE may provide a useful index to the prediction of precipitation over southern China.

**Keywords** Extensive persistent low-temperature event, Anomalous precipitation, Large-scale tilted ridge and trough, Western Pacific subtropical high, Precursory signal

## 1 引言

冬季大范围持续性低温事件往往引发严重的气象灾害,从而导致国民经济和人民生命财产的巨大损失。早在 1960、1970 年代,我国就频繁出现冷冬,而 2008 年以来的几次持续性低温事件更是给我国造成了严重的灾害。例如 2008 年年初,我国南方地区 20 多个省市在连续 20 多天时间里遭遇了持续性低温雨雪冰冻天气事件,灾害之严重历史罕见,对我国电力供应、交通运输和农业生产产生了非常不利的影 响。目前大范围持续性低温事件及其研究已受到广泛的关注。

以往的研究在年际和年代际时间尺度上对全国性和区域性冬季气温异常问题进行了探讨。龚道溢和王绍武(1999b)对全国平均气温进行了分析,并侧重探讨了近百年我国异常冷冬和暖冬的主要特征。在区域性低温研究方面,胡秀玲和刘宣飞(2005)着重考察了东北冬季气温的年代际变化特征及其与冬季北极涛动的联系。钱维宏和张玮玮(2007)的研究表明,在过去 50 年中,冬季大气活动中心(西伯利亚高压和阿留申低压)强度及其变化与中国北方和东部地区的冬季气温之间存在显著的年际相关。

因其广泛的社会影响,2008 年初的持续性冰冻雨雪灾害事件(简称“0801”事件)引起了国内业

务部门和研究部门的高度重视。研究表明,此次灾害事件前期和同期,在欧亚大陆中高纬地区均存在持续性较强的中高纬环流异常,其中包括北欧、乌拉尔山以及西伯利亚地区的阻塞高压以及大范围加强的西伯利亚高压(陶诗言和卫捷,2008; Wen et al., 2009; Zhou et al., 2009; Bueh et al., 2011a)。研究还指出,南支槽稳定维持以及西太平洋副热带高压的北进为此次事件提供了水汽条件(赵思雄和孙建华,2008; 纪立人等,2008; 施宁等,2008; Zhou et al., 2009)。总之,上述研究表明,“0801”事件是由亚洲中高纬环流异常和中低纬环流系统相互作用引起的一次极端灾害事件。此外,从气候背景的角度丁一汇等(2008)指出,La Niña 事件是“0801”事件发生的前提条件。谭桂容等(2010)则认为,北大西洋涛动与此次低温雨雪事件有密切的联系。

为了考察更多的此类事件,即大范围持续性极端低温事件,必须在低温程度、空间范围及持续时间上给出一个客观的定量标准。Peng and Bueh(2011)利用中国 756 站逐日平均气温资料界定出了 52 个大范围持续性极端低温事件。由于局地阻塞高压活动本身难以解释此类低温事件的大范围和持续性这两个关键特征, Bueh et al. (2011b)进一步考察了我国 1950 年以来 38 次持续 10 d 以上的大范围持续性低温事件及其关键环流系统。他们明确提出,欧亚大陆上空的大型斜脊是引发此类大范

围持续性低温事件的关键环流系统。Peng and Bueh (2012) 的研究进一步证实了这一观点。

众所周知，在 2008 年初的持续性低温事件中，除了低温天气以外，我国南方地区的雨雪和冻雨天气过程是此次重大灾害的一个重要原因。因此，大范围持续性低温事件是否伴有异常降水过程以及两种情况存在什么样的不同特征等方面迫切需要进一步研究。本文延续 Bueh et al. (2011b) 和 Peng and Bueh (2012) 的研究工作，试图解答以下三个问题：(1) 大范围持续性低温事件中我国南方降水异常与中高纬关键环流系统的联系？(2) 大范围持续性低温事件中我国南方降水的多寡如何与南支槽及西太平洋副热带高压（西太副高）活动异常相联系？(3) 与我国南方降水的异常多和少对应，大范围持续性低温事件是否存在不同的前兆环流信号？对这些问题的回答将对此类灾害事件灾害类型的判识及其延伸期预报的提高都具有重要的参考意义。

## 2 资料和方法

本文所用资料为 NCEP/NCAR 逐日再分析资料 (Kalnay et al., 1996)，共 58 年 (1951~2009 年) 冬季 (11 月至次年 3 月)，气象要素场包括海平面气压场、位势高度场、风场和温度场资料，水平分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  网格。文中的格点资料均进行低通滤波，滤掉 8 d 以下的高频天气扰动。在此基础上，进行 31 d 滑动平均和多年平均，得到逐日气候平均态。利用中国气象局全国 160 站降水资料，选取其南方地区 72 个站点，以此界定大范围持续性低温事件的降水异常特征。

文中采用统计和合成等方法分析环流特征，并用  $t$  检验来验证其显著性。

## 3 大范围持续性低温事件的降水异常特征

由图 1 可见，我国冬季降水主要集中在淮河以南地区，南方多雨湿润，北方少雨干旱，东部降水多，西部降水少。降水大值区发生在江南地区，200 mm 降水量的等值线沿着西南—东北走向分布。这与曾剑等 (2010)、王林和冯娟 (2011) 的研究结果一致。王志伟等 (2005) 认为，受季风气候和地形的影响，在秦岭、汉水、淮河一线形成我国明显的南、北 (湿润、干旱) 气候分界线。冬季南方既

是降水中心区也是降水年际变率较大的区域 (曾剑等, 2010)。本文将冬季降水量大于 100 mm 的区域作为南方区域 (图 1 中黑点所占区域，共 72 个站点)，这与智协飞等 (2011) 选取的南方区域 ( $20^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $102.5^{\circ}\text{E} \sim 122.5^{\circ}\text{E}$ ) 基本相同。

如前所述，本文中主要分析中国 1950 年以来的 38 次持续 10 d 以上的大范围持续性低温事件 (Bueh et al., 2011b)，以后简称低温事件，详细信息见表 1。图 2a 和图 2b 分别给出了 38 次低温事件持续时段的南方区域日平均降水量、对应的气候值及距平，其具体算法如下：(1) 某日降水距平是指该日降水量减去其该日的气候平均值；(2) 上述南方区域的 72 个站点，地理分布较为均匀，通过算术平均得到区域平均降水量；(3) 针对每个低温事件持续时段做时间平均，得到其降水距平。

与多个低温事件对应的中国南方降水形势，其个例差异较大，其中有 20 (18) 个事件的降水多于 (少于) 其气候平均值 (见图 2b)。由于冬季降水较少，选取降水异常事件时，将大于  $+0.8\sigma$  (标准差) 的作为南方降水偏多事件，少于  $-1.5\sigma$  的作为降水偏少事件。在全部 38 个低温事件中，降水偏多事件共 9 个，降水偏少事件共 10 个 (见表 1)。

图 2c 和 2d 分别是降水偏少型和偏多型低温事件持续阶段的日平均降水距平分布。可以清楚地看到降水偏少时，全国范围内日降水距平均小于 1 mm，云贵高原是主要的降水正距平区。降水偏多时，除了东北、西北北部和河北山东半岛外，全国大部分地区都是降水正距平区。南方区域降水偏多，特别显著的是东南地区，最大正距平中心位于湖南—江西—浙江一带，呈东北—西南走向，日降水距平超过 5 mm。

## 4 中高纬环流特征

图 3 给出了与降水偏少和偏多型低温事件所对应的对流层中层环流特征。Bueh et al. (2011b) 指出，欧亚大陆中高纬地区大型斜脊斜槽是中国大范围持续性低温事件 500 hPa 环流的关键特征，其中大型斜脊斜槽基本以贝加尔湖—巴尔卡什湖为界，西北侧为斜脊，东南侧为斜槽。这里大型斜脊 (或斜槽) 指的是相对冬季气候平均脊 (或槽) 而言的。众所周知，在东亚大槽上游气候平均脊 (贝加尔湖附近) 的纬向尺度远小于 60 个经距。表 1 还给出了低温事件开始日和峰值日欧亚大陆中高纬斜脊

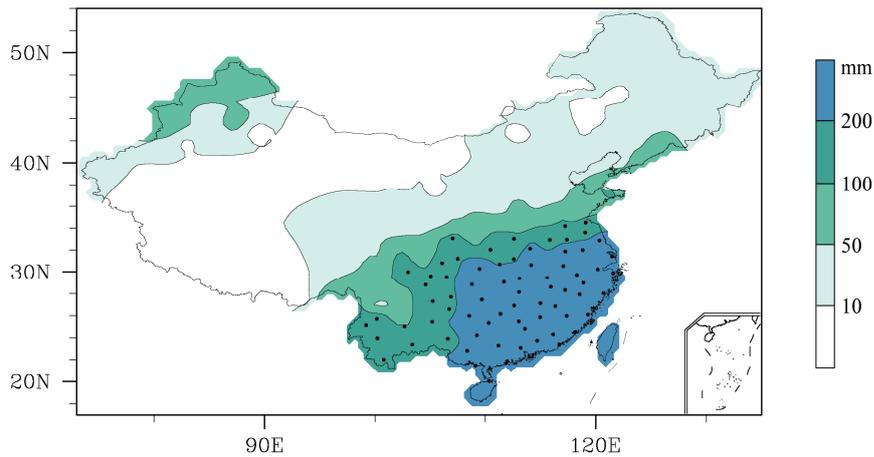


图1 中国冬季平均降水量分布 (1951~2009 年), 黑点表示降水量大于 100 mm 的站点

Fig. 1 Spatial distribution of winter mean precipitation amount over China during 1951–2009, stations where the precipitation amount exceeds 100 mm are marked with black dots

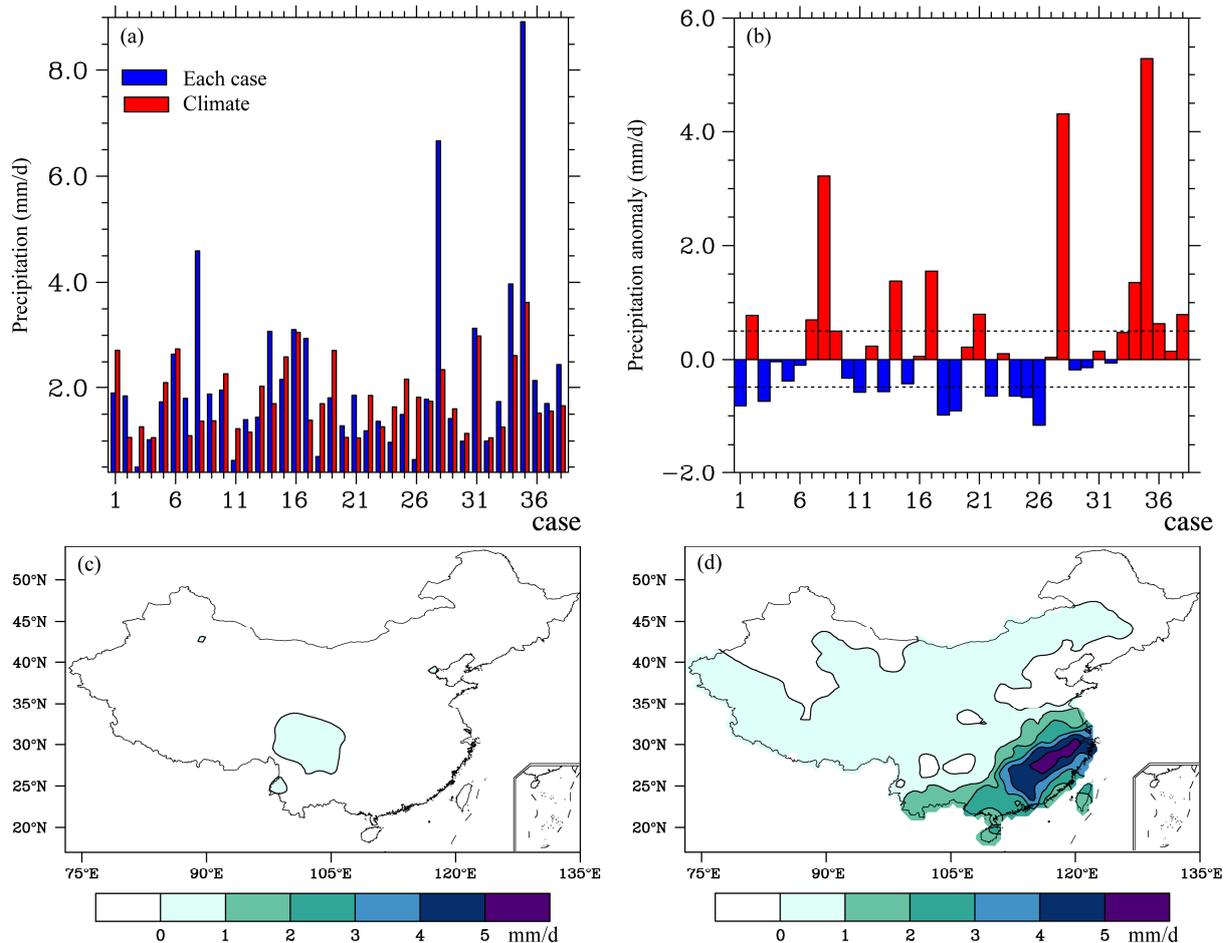


图2 38 次低温事件持续时段的中国南方 (a) 日平均降水量以及对应的气候值和 (b) 降水距平 ( $\text{mm d}^{-1}$ )。其中, 横坐标表示 38 个低温事件的序号, 图 2b 中的虚线表示  $\pm 0.5 \text{ mm d}^{-1}$ 。中国南方降水偏少型 (c) 和偏多型 (d) 低温事件的合成降水异常分布 ( $\text{mm d}^{-1}$ )

Fig. 2 (a) Daily mean precipitation amounts and their climate mean values and (b) the corresponding precipitation anomalies ( $\text{mm d}^{-1}$ ) in southern China during the persisting periods of the 38 low-temperature events (The abscissa indicates the serial number of 38 low-temperature events, dashed lines in (b) represent  $\pm 0.5 \text{ mm d}^{-1}$ ). Composite precipitation anomalies ( $\text{mm d}^{-1}$ ) for the (c) dry and (d) wet low-temperature events

表 1 38 个低温事件的相关信息以及对应的中国南方降水异常特征

Table 1 The relevant information of the 38 low-temperature events and the corresponding features of precipitation anomalies in southern China

序号	起止时间	标准差( $\sigma$ , mm d <sup>-1</sup> )	降水距平	开始日斜脊横跨经度	峰值日斜脊横跨经度
1	1954 年 3 月 3~14 日	1.25	<b>-1.65<math>\sigma</math></b>	128	115
2	1954 年 12 月 1~16 日	0.96	<b>+0.81<math>\sigma</math></b>	32	91
3	1954 年 12 月 26 日~1955 年 1 月 17 日	0.81	<b>-1.92<math>\sigma</math></b>	45	101
4	1956 年 12 月 7~25 日	0.75	-1.05 $\sigma$	63	64
5	1957 年 2 月 5~19 日	1.20	-1.31 $\sigma$	105	172
6	1957 年 3 月 5~16 日	1.15	-1.09 $\sigma$	163	123
7	1959 年 12 月 17~26 日	1.05	+0.66 $\sigma$	88	77
8	1960 年 11 月 22 日~12 月 1 日	1.33	<b>+2.42<math>\sigma</math></b>	128	116
9	1962 年 11 月 20 日~12 月 3 日	1.15	+0.43 $\sigma$	53	156
10	1964 年 2 月 8~27 日	1.08	-1.30 $\sigma$	90	74
11	1966 年 12 月 20 日~1967 年 1 月 17 日	0.74	<b>-1.80<math>\sigma</math></b>	118	103
12	1967 年 11 月 26 日~12 月 15 日	0.91	+0.26 $\sigma$	95	55
13	1968 年 1 月 30 日~2 月 22 日	0.96	<b>-1.60<math>\sigma</math></b>	98	164
14	1969 年 1 月 27 日~2 月 7 日	1.14	<b>+1.20<math>\sigma</math></b>	61	42
15	1969 年 2 月 13 日~3 月 4 日	1.18	-1.36 $\sigma$	91	104
16	1970 年 2 月 25 日~3 月 25 日	0.82	+0.07 $\sigma$	139	71
17	1970 年 11 月 21~30 日	1.38	<b>+1.12<math>\sigma</math></b>	153	109
18	1971 年 1 月 27 日~2 月 7 日	1.14	<b>-1.86<math>\sigma</math></b>	104	83
19	1971 年 2 月 27 日~3 月 14 日	1.07	<b>-1.85<math>\sigma</math></b>	210	116
20	1974 年 12 月 3~21 日	0.86	+0.25 $\sigma$	71	73
21	1975 年 12 月 7~23 日	0.82	<b>+0.97<math>\sigma</math></b>	135	101
22	1976 年 11 月 10~27 日	1.13	<b>-1.58<math>\sigma</math></b>	141	77
23	1976 年 12 月 25 日~1977 年 1 月 15 日	0.84	+0.12 $\sigma$	145	91
24	1977 年 1 月 26 日~2 月 10 日	0.95	<b>-1.69<math>\sigma</math></b>	63	99
25	1978 年 2 月 9~18 日	1.36	<b>-1.50<math>\sigma</math></b>	152	138
26	1979 年 11 月 10~29 日	1.13	<b>-2.03<math>\sigma</math></b>	66	53
27	1980 年 1 月 29 日~2 月 9 日	1.15	+0.03 $\sigma$	86	88
28	1981 年 11 月 1~10 日	1.83	<b>+2.35<math>\sigma</math></b>	72	57
29	1984 年 1 月 19 日~2 月 10 日	0.72	-1.25 $\sigma$	72	45
30	1984 年 12 月 16~30 日	0.90	-1.16 $\sigma$	73	115
31	1985 年 3 月 4~21 日	1.01	+0.14 $\sigma$	112	77
32	1985 年 12 月 6~17 日	0.96	-1.06 $\sigma$	106	87
33	1987 年 11 月 26 日~12 月 7 日	1.18	+0.40 $\sigma$	99	81
34	1988 年 2 月 27 日~3 月 8 日	1.39	<b>+0.98<math>\sigma</math></b>	64	150
35	1992 年 3 月 16~27 日	1.40	<b>+3.78<math>\sigma</math></b>	78	76
36	1993 年 1 月 14~24 日	1.05	+0.60 $\sigma$	101	89
37	2000 年 1 月 24 日~2 月 2 日	1.15	+0.13 $\sigma$	68	46
38	2008 年 1 月 14 日~2 月 15 日	0.58	<b>+1.37<math>\sigma</math></b>	105	80

注：降水距平一栏中的粗体代表本文所选降水偏少型和偏多型低温事件

的横跨经度。其中，斜脊横跨经度的识别过程如下：若在逐日 500 hPa 位势高度场（低通滤波）上，欧亚大陆范围（40°~65°N，20°~160°E）内存在斜脊，且斜脊对应的正高度距平（相对于逐日气候平均值）至少为 10 个位势米，则其最西和最东的经度差可定义为该斜脊的横跨经度。由表 1 可见，在 38 个事件中，29 个个例的斜脊横跨经度在开始日和峰

值日都超过 60 经距，其余 9 个例中，斜脊横跨经度至少在这两个关键日中的一天超过 60 个经距。此外，我们还对每个低温事件的整个持续时段考察了斜脊横跨经度，并计算了其持续时段平均横跨经度。在降水偏少和偏多事件中，时段平均的斜脊横跨经度分别为 123 个经距和 81 个经距。这无疑表明，大型斜脊（或斜槽）是中国大范围持续性低温

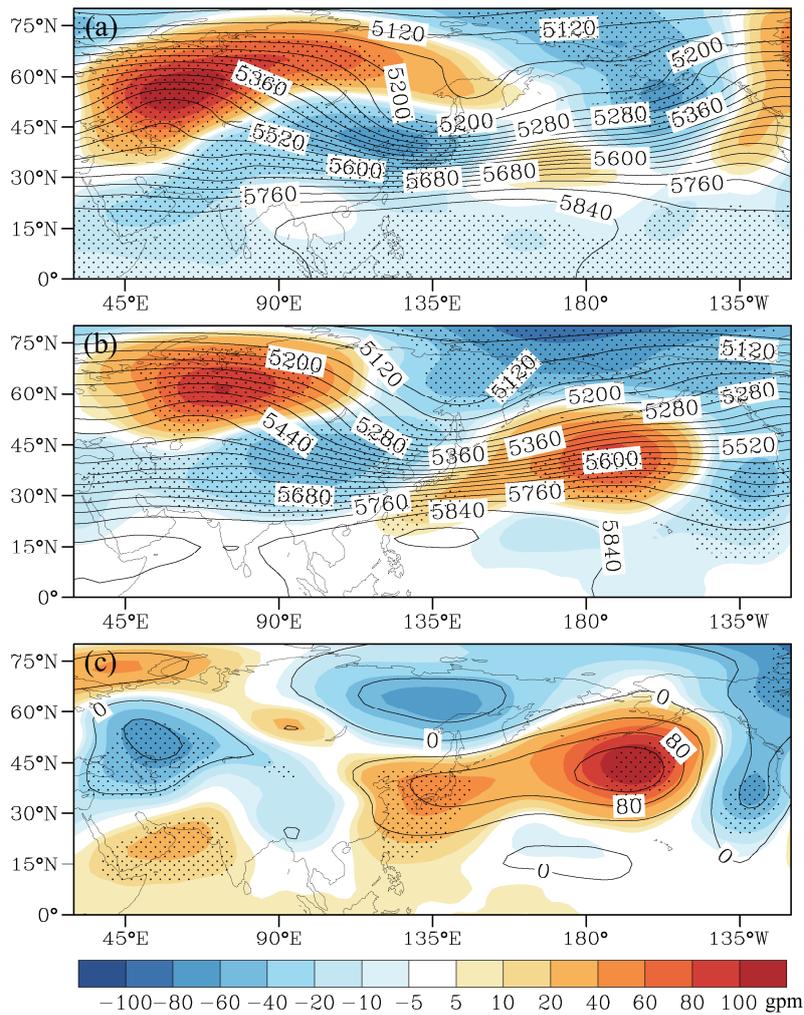


图3 合成 500 hPa 位势高度场(实线, 单位: gpm)及其距平场(阴影): (a) 降水偏少型低温事件; (b) 降水偏多型低温事件; (c) 降水偏多型与偏少型差值场。点区域为通过 90%置信度的区域

Fig. 3 Composite 500-hPa geopotential height fields (contours, units: gpm) and their anomalies (shadow) for the (a) dry and (b) wet low-temperature events, and (c) the corresponding differences between wet and dry low-temperature events. The areas where the confidence level exceeds 90% are dotted

事件的关键环流特征。

Zeng (1983) 首先提出, 当准地转扰动的曳式螺旋波结构处于急流北侧时, 扰动从基本流中吸取能量, 继而正压发展。如图 3a 和图 3b 所示, 与中国大范围持续性低温事件对应的大型斜脊斜槽及其扰动结构也正是此类曳式螺旋结构, 它通过正压发展可以持续较长时间, 并成为引发低温事件的主导环流系统。与之对应, 西伯利亚高压的大范围扩张和持续维持是中国大范围持续性低温事件的直接原因(见后文)。

由图 3 可见, 尽管降水偏少型和偏多型低温事件的环流特征与所有低温事件的总体特征一致, 但两者存在显著差异。当降水偏少时(图 3a), 正高度距平中心位于乌拉尔山附近(55°N, 60°E), 斜

脊的纬向尺度较大, 从乌拉尔山地区延伸到雅库茨克地区。同时, 斜槽的纬向尺度与斜脊相当, 其负距平中心靠近东亚大槽的气候位置, 强度偏强, 因此东亚环流具有明显的经向型特征。与此相比, 当降水偏多时(图 3b), 与斜脊对应的正异常中心, 其位置偏北偏东(62.5°N, 75°E), 强度偏弱, 与降水偏少型相比(图 3c), 斜脊的纬向尺度偏小, 西太平洋副高相对强。同时, 与降水偏少事件相比, 与斜槽对应的负距平中心位于东亚大槽区西侧, 强度偏弱。

下面给出与不同降水异常型对应的低温事件的高空急流异常特征。图 4 为合成 200 hPa 纬向风异常场。由图 4a 和 4b 可知, 两者存在共同特点:

- (1) 在亚洲高、中、低纬地区上空呈现“+,-”,

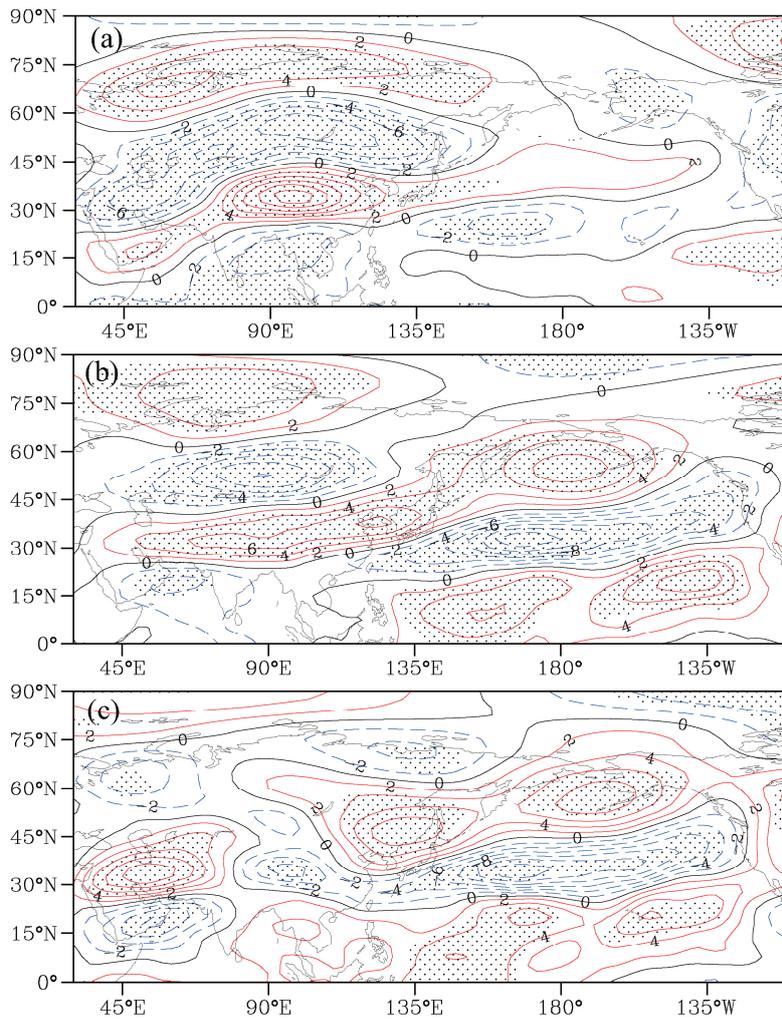


图4 同图3，但为200 hPa 纬向风(单位： $\text{m s}^{-1}$ )  
Fig. 4 Same as Fig. 3, but for 200-hPa zonal wind (units:  $\text{m s}^{-1}$ )

+, -”的距平中心；(2) 青藏高原至渤海湾上空，即东亚急流入口区及北侧，西风气流显著加强，这使得东亚急流区向西扩展。但两者存在显著差异：

(1) 在降水偏少型事件中(图4a)，在东亚急流入口区及北侧，200 hPa 纬向风增强更显著，正距平可达  $12 \text{ m s}^{-1}$ ，其经向波列型异常的纬向尺度更大，与500 hPa 环流特征一致(图3a)；(2) 在降水偏多型低温事件中(图4b)，急流还有一个正异常中心，位于北太平洋，南北方向呈现“+，-，+”距平波列分布。这一波列与La Niña时期的急流异常特征相似。从差值图(图4c)上也可以发现，降水偏少事件中，东亚急流入口区及北侧纬向风显著增强的特征比较突出，而降水偏多事件中，北太平洋上“+，-，+”的距平波列清晰可见。

上述图3和图4的结果表明，在低温事件中不仅亚洲中高纬环流异常的强度、位置以及纬向尺度

对南方降水产生重要影响，同时北太平洋地区的环流异常(如类似于La Niña事件的环流型)也对南方降水异常也产生重要作用。

西伯利亚高压是冬季控制亚洲大陆近地面的重要环流系统(郭其蕴, 1996; 朱乾根等, 1997; 龚道溢和王绍武, 1999a)。图5给出了合成的海平面气压场和2 m 温度距平场。当低温事件发生时，西伯利亚高压面积增大，中心强度增强。这点在降水偏少事件(图5a)中尤为突出，整个亚洲大陆，包括俄罗斯远东地区，均为西伯利亚高压控制，其中心位于贝加尔湖与巴尔喀什湖之间，强度达1044 hPa。西伯利亚高压的南沿1020 hPa特征线可达中国东南沿海地区；由图5a和图5b的1032 hPa特征线可看出，在降水偏多事件的西伯利亚高压强度比降水偏少事件弱，与之对应，中国东部地区的气压梯度及偏北风也相对弱(图略)。由图5c可见，

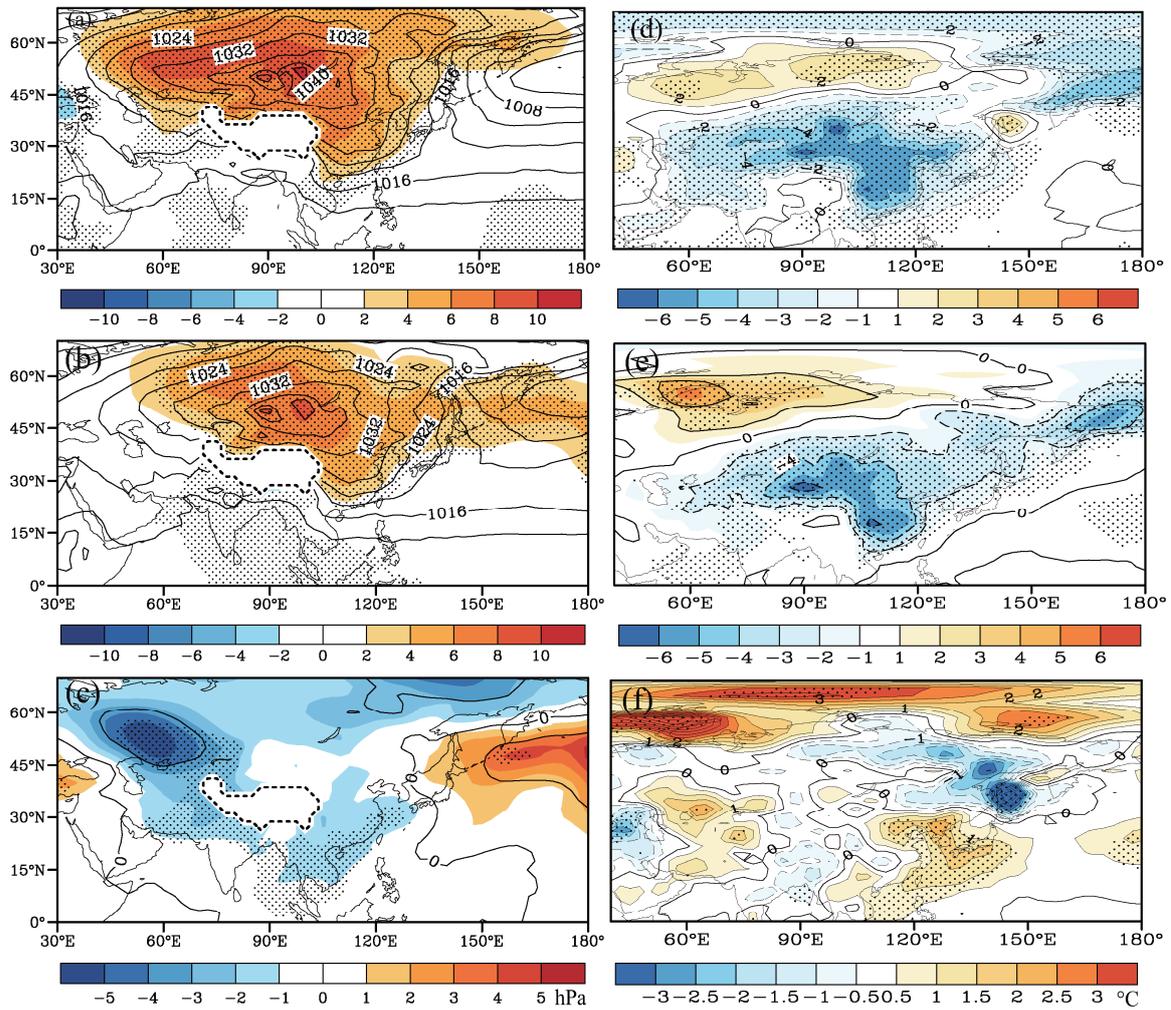


图 5 (a, b, c) 同图 3, 但为海平面气压场 (实线, 单位: hPa) 及其距平场 (阴影); (d, e, f) 同 (a, b, c), 但为 2 m 温度距平场 (单位: °C)  
 Fig. 5 (a, b, c) Same as Fig. 3, but for sea level pressure fields (contours, units: hPa) and their anomalies (shading); (d, e, f) same as (a, b, c), but for temperature anomalies at 2 m (units: °C)

与降水偏少事件相比, 降水偏多事件的西伯利亚高压在中国南方地区、乌拉尔山附近以及俄罗斯远东地区均相对弱。海平面气压场上的这种配置与 500 hPa 高度场大型斜脊形势是一致的。此外, 降水偏少事件的阿留申低压明显比降水偏多事件弱。由此, 在 2 m 温度场上, 降水偏少时冷空气南下入侵程度远比降水偏多时强得多 (图 5d 和图 5e)。由两者的距平差值场 (图 5f) 上可见, 我国东部沿岸从北到南均为正距平。这说明, 当降水偏少时, 南侵的冷空气强度比降水偏多时更强, 尤其是我国华北、东北地区南部以及长江以南地区。另外, 由于西伯利亚高压和阿留申低压的特殊配置, 在降水偏少事件中俄罗斯远东地区、中国东北地区北部以及日本北部的降温程度相对强 (图 5f)。总之, 当出现降水偏多型低温事件时西伯利亚高压的扩张不

太强且阿留申低压要偏弱 (图 3b 和图 5b)。

### 5 副热带环流异常与水汽通量特征

图 6 给出了与不同降水异常特征相联系的持续性低温事件 850 hPa 风场特征。当降水偏少时 (图 6a), 反气旋 (高度场上为大陆冷高压) 东南侧的偏北气流可达我国南海, 于是冷空气南下纬度较低; 当降水偏多时 (图 6b), 反气旋偏弱, 东南侧的偏北气流达我国东海和黄海, 冷空气南下入侵程度不至于太强。距平场上差异更大, 两者在南方地区分别为东北风距平和东南风距平。上述风场特征与海平面气压场和温度场结果相吻合。

冬季中国南方降水与对流层低层环流有着密切的关系 (张自银等, 2008)。下面将考察低温事件中对流层低层副热带环流与南方降水的关系。图

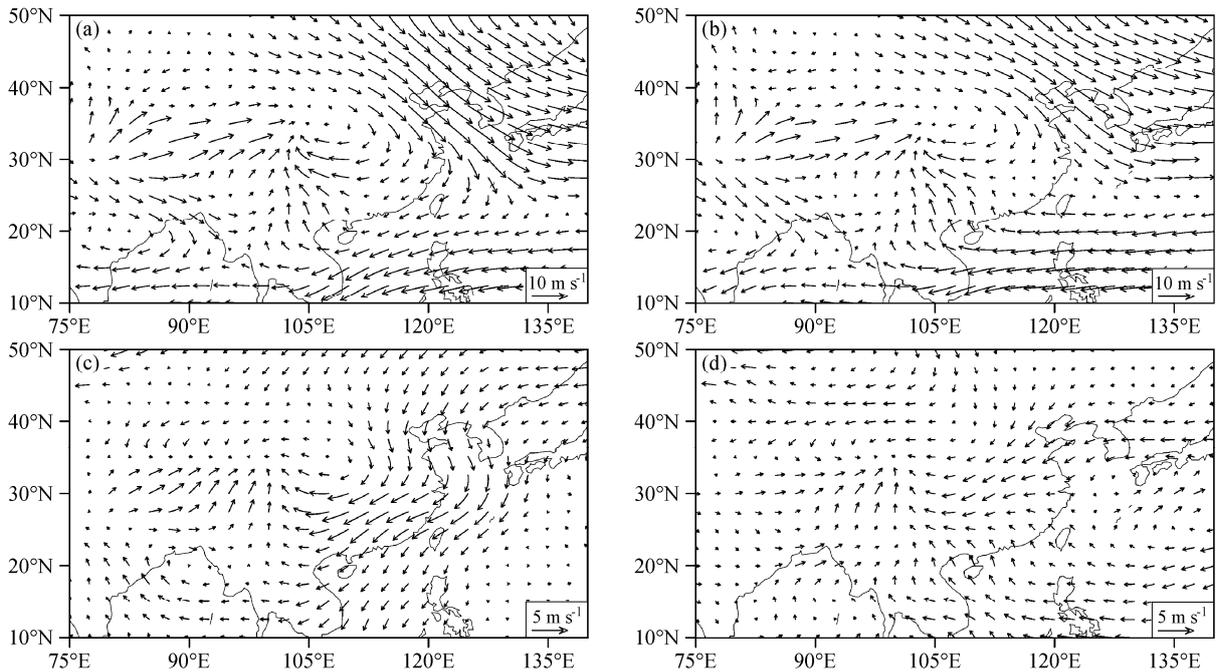


图 6 850 hPa 风场 (a、b) 及其距平场 (c、d) 合成 (单位:  $\text{m s}^{-1}$ ): (a、c) 为降水偏少事件, (b、d) 为降水偏多事件  
Fig. 6 Composite (a, b) wind fields at 850 hPa and (c-d) their anomalies (units:  $\text{m s}^{-1}$ ) for (a, c) dry and (b, d) wet low-temperature events

6 给出了 850 hPa 风场及距平场特征。当降水偏少时,反气旋式环流占据着整个东亚副热带地区,包括中国东海和南海,中国南方为比较一致的东北风,抑制了低纬偏南气流北上(图 6a 和 6c)。当降水偏多时,南海和台湾附近为弱反气旋,对应着西太副高的加强和北进,它使低纬暖湿气流向北输送,干冷空气和暖湿气流汇合于 25°N 附近(图 6b),距平场上南海至江南地区的偏南风距平清晰可见(图 6d)。因此,西太副高的强弱和位置一定程度上决定着低温事件中我国南方地区降水的多寡。另外,孟加拉湾地区的南支槽异常也是影响我国南方降水的重要副热带环流系统。由图 6c 和图 6d 可见,当降水偏多(少)时,南支槽加强(减弱),南方地区为一致的偏南风(偏北风)气流,有利于(不利于)南支槽前的水汽输送到我国南方地区。由于南支槽的水汽输送特征在 850 hPa 上不是特别清楚,而在 700 hPa 上最为清楚(索渺清和丁一汇, 2009),图 7 给出了对应的 700 hPa 风场及距平场的合成结果。与 850 hPa 相比,在降水偏多低温事件中,西太副高和孟加拉湾南支槽明显加强,南方地区偏南气流异常强盛,可为该地区提供更多的水汽输送(图 7b 和 7d)。相反,在降水偏少低温事件中,西太副高和孟加拉湾南支槽明显减弱,南方地区偏北气流主导(图 7a 和 7c)。由此可知,对流层底层

副热带环流在很大程度上决定了输送到南方地区的水汽状况,其中西太副高和孟加拉湾南支槽的作用非常重要。

降水与水汽通量散度的关系更为密切(朱乾根等, 2000),图 8 给出了 850 hPa 水汽通量及其散度场。由图 8a 和 8b 可以发现,我国东部沿海和南海是水汽辐散区(水汽源),两者相差不大,差异较大的是我国南方地区,与降水偏少事件相比,降水偏多事件中我国南方地区的水汽辐合明显加强(水汽汇)。距平场上水汽输送异常更为清晰。当降水偏少时(图 8c),我国东南地区较常年水汽偏少。当降水偏多时(图 8d),西太副高西侧的暖湿气流与南海的水汽汇合,并往北输送至我国南方地区,同时孟加拉湾还有一支水汽由西往东输送到西南地区,使得南方地区的水汽条件较常年偏多。图 9 为对流层整层水汽通量及散度距平场。与图 8 基本一致,在降水偏少事件中(图 9a),南方地区的水汽较常年偏少且往南输送水汽至南海南部区域。而在降水偏多事件中(图 9b),分别来自西太副高西侧、南海和孟加拉湾南支槽的暖湿气流向中国南方地区输送充沛的水汽,有利于降水增强。因此,在低温事件中我国南方地区的降水多寡不仅取决于亚洲中高纬环流的异常状况,也取决于来自西太平洋、南海和孟加拉湾南支槽的三支暖湿气流的异常

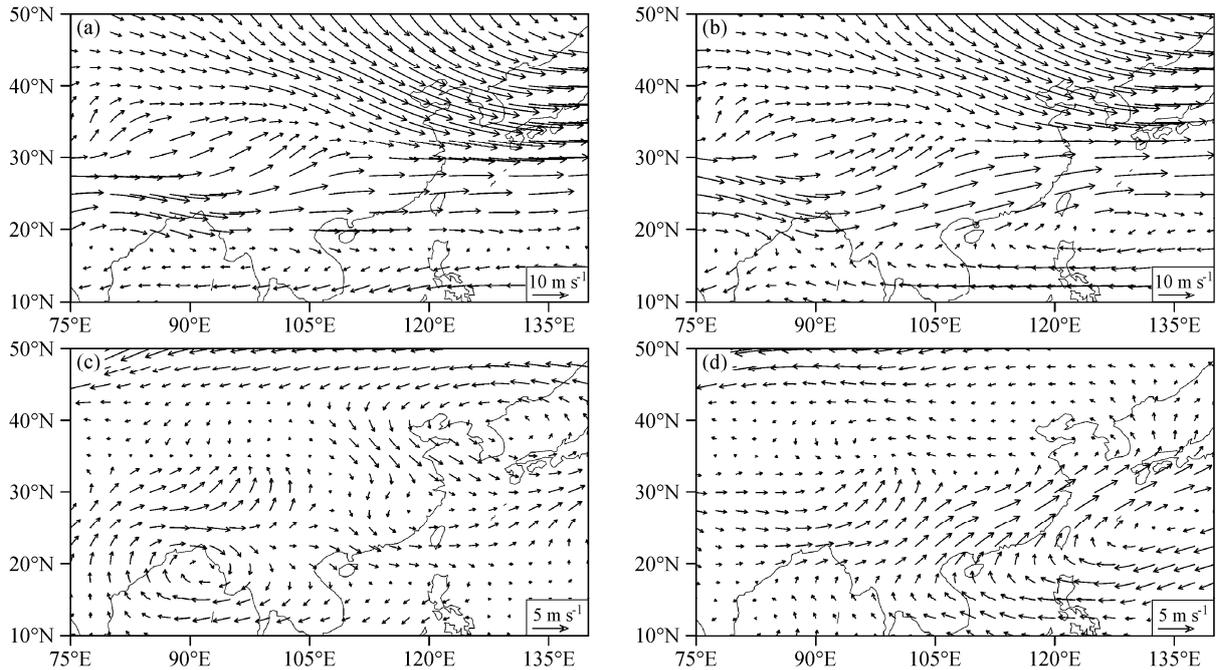


图7 同图6, 但为 700 hPa  
Fig. 7 As in Fig. 6, except for 700 hPa

水汽输送特征。

由第 4 节和本节的分析可知, 与降水偏多型和偏少型低温事件相关的中高纬和副热带环流系统存在显著差异: 当大型斜脊的纬向尺度较大且对应的正高度距平中心偏强时, 斜槽的负距平中心较强且靠近东亚大槽区, 西伯利亚高压大范围加强, 南侵中国南方的冷空气活动强, 西太平洋副热带高压和孟加拉湾南支槽弱, 使中国南方地区降水偏少; 相反, 当大型斜脊的纬向尺度相对小且对应的正距平中心偏弱时, 斜槽位置偏西, 西伯利亚高压的加强范围相对小, 阿留申低压偏弱, 南侵中国南方的冷空气活动相对弱, 西太平洋副热带高压和孟加拉湾南支槽加强, 有利于中国南方降水偏多。

### 6 前期环流信号

中国大范围持续性低温事件属于延伸期 (10~30 d) 大气过程的范畴, 可视为连接天气过程与短期气候的重要纽带。因此, 除了与低温天气过程本身外, 有必要进一步关注与外强迫和大气内动力过程相联系的低频遥相关波列的传播以及北半球极涡活动的缓慢变化过程。例如, Peng and Bueh (2012) 对一类大范围持续性低温事件 (全国类) 的前期环流进行了分析, 发现北半球极涡以及北大西洋/欧洲区域环流均存在前兆性环流信号。如果从

低温事件的前期异常环流中若能够识别出有益的前兆信号, 可为低温事件及其降水特征的预测提供有利的依据。基于这样的考虑, 下面从两种降水类型低温事件出发, 考察其对流层上层环流的前兆信号及两者的差异。

图 10 为 300 hPa 位势高度距平场及其演变过程。低温事件发生前 3 候 (图 10a 和图 10e), 极涡在欧亚大陆一侧的次极区显著减弱, 这与 Peng and Bueh (2012) 的结果一致。但是, 两种降水类型低温事件的前兆信号存在明显差异: (1) 在降水偏少事件中, 极涡在欧亚大陆次极区的减弱在空间尺度上更广, 振幅上更强 (图 10a); 欧亚大陆次极区的正高度距平中心及其南侧的负高度距平中心共同形成了一个南北向的偶极子 (图 10b)。同时, 冰岛至地中海存在一个西北—东南向伸展的负距平区。随着时间的推移, 与这一负距平区南端的发展演变对应, 欧亚大陆次极区的正高度距平区向西南延伸, 形成一个大型的斜脊, 同时其南侧的斜槽也发展壮大 (图 10a-d)。(2) 而降水偏多事件的情况则很不一样, 极涡在欧亚大陆次极区的减弱在空间尺度上更小, 振幅上更弱, 北大西洋地区存在北大西洋涛动 (NAO) 特征 (图 10e)。随着时间的推移, 它的两个异常中心顺时针旋转, 与亚洲大陆次极区正距平中心及其南侧的负距平中心一起形成

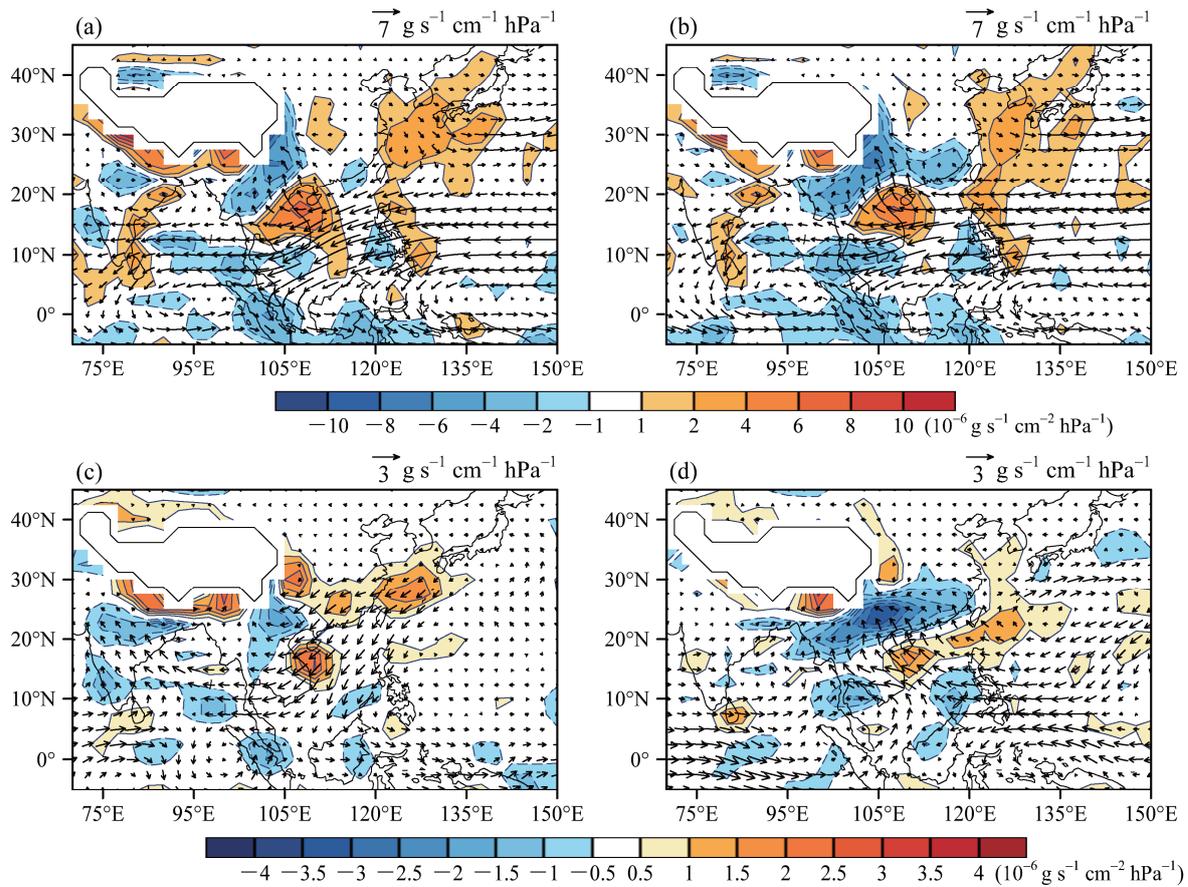


图 8 850 hPa 的水汽通量 (箭头, 单位:  $\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{hPa}^{-1}$ ) 和水汽通量散度 (阴影, 单位:  $10^{-6} \text{g s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{hPa}^{-1}$ ) (a, b) 及相应的距平场 (c, d) 合成: (a, c) 和 (b, d) 分别表示降水偏少和偏多低温事件

Fig. 8 Composite (a, b) water vapor fluxes (arrow, units:  $\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{hPa}^{-1}$ ) and vapor flux divergences (shadow, units:  $10^{-6} \text{g s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{hPa}^{-1}$ ) at 850 hPa, and (c, d) the corresponding anomalies for (a, c) dry and for (b, d) wet low-temperature events

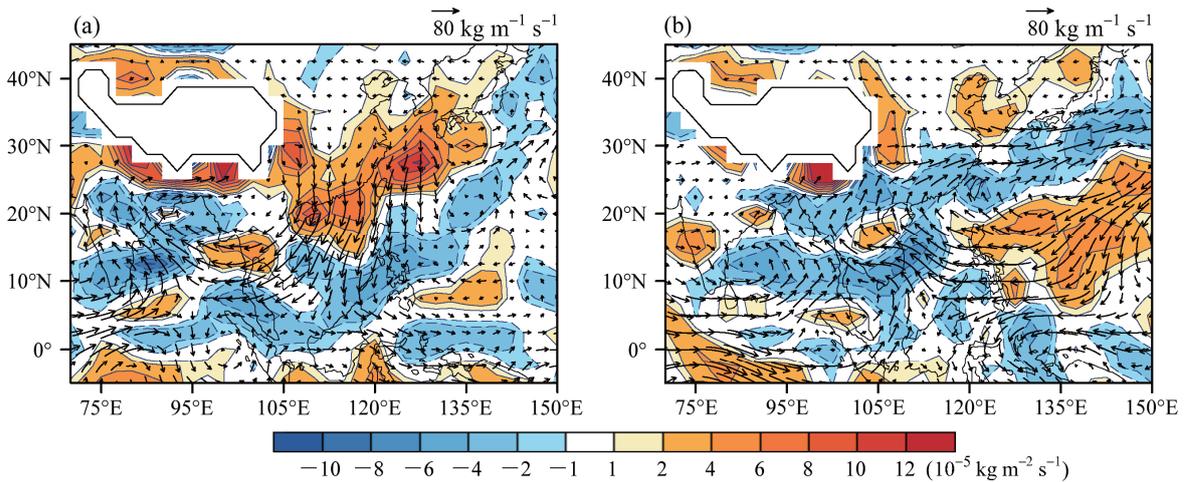


图 9 整层积分的水汽通量距平 (箭头, 单位:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) 和水汽通量散度距平 (阴影, 单位:  $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 合成, (a) 和 (b) 分别表示降水偏少和偏多低温事件

Fig. 9 Composites of the vertically integrated water vapor flux anomalies (arrow, units:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) and vapor flux divergence anomalies (shadow, units:  $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) for (a) dry and (b) wet low-temperature events

了一个“-, +, -, +”的波列, 其能量频散特征十分明显 (图 10f-h)。由于 Rossby 波能量的向下

游频散, 在低温事件发生时 (图 10h), 北太平洋地区形成一个正高度距平区, 它对应着阿留申低

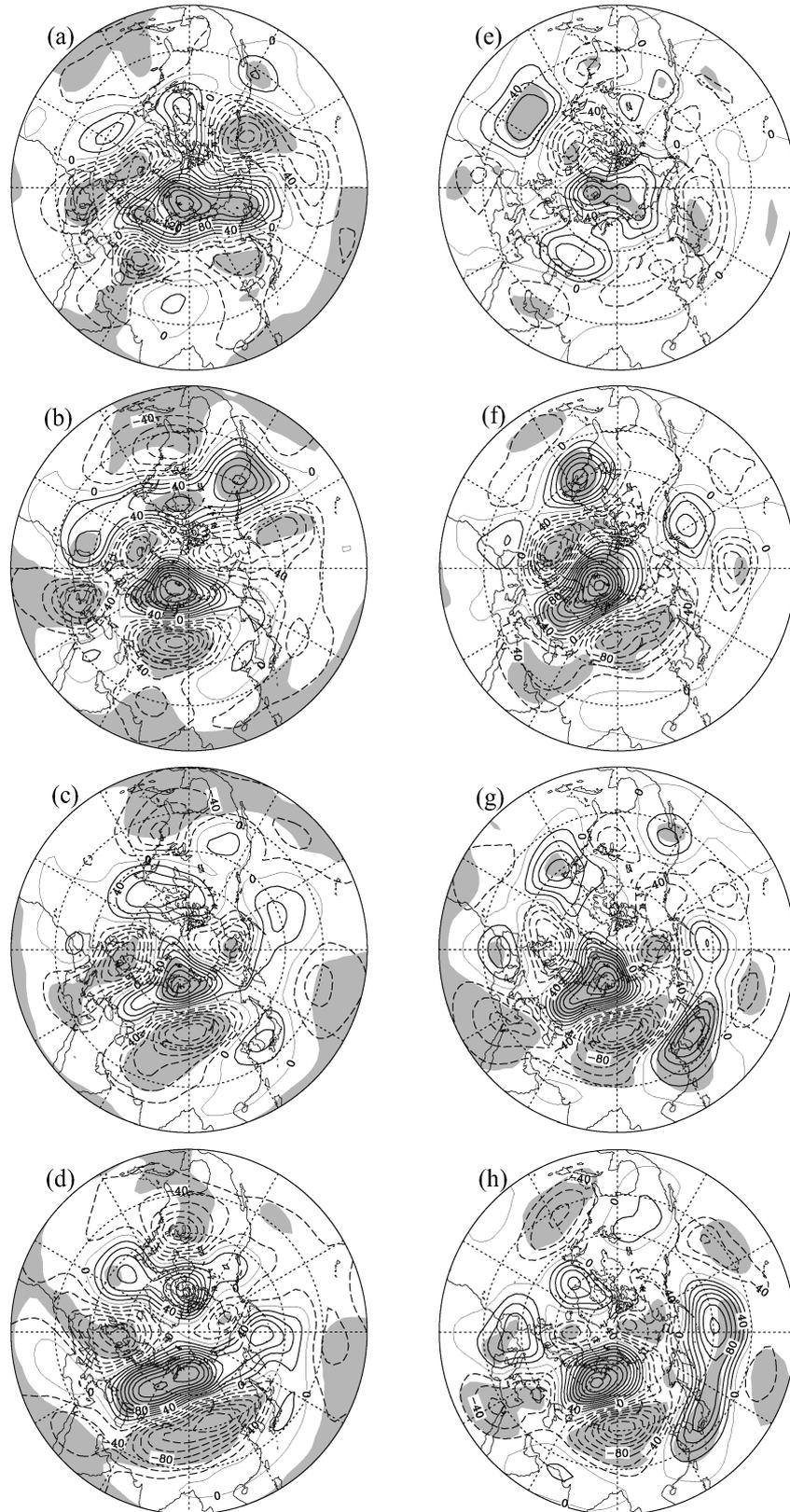


图 10 300 hPa 位势高度距平合成场 (单位: gpm), 其中 (a-d) 和 (e-h) 分别表示降水偏少型和偏多型低温事件: (a, e) 为-15~-11 d; (b, f) 为-10~-6 d; (c, g) 为-5~-1 d; (d, h) 为 0~5 d, 阴影为通过 90% 置信度的区域

Fig. 10 Composite 300-hPa geopotential height anomalies (units: gpm) for dry (a-d) and wet (e-h) low-temperature events: (a, e) -15- -11 d; (b, f) -10- -6 d; (c, g) -5- -1 d; (d, h) 0-5 d. The areas where the confidence level exceeds 90% are shaded

压的减弱（图 3b 和图 5b）。平流层低层（150 hPa）的前兆信号与对流层上层的情况基本一致：在降水偏多事件中，极涡的两极特征更加明显，一极伸向南欧和地中海，另一极伸向阿留申群岛，而在欧亚大陆次极区一侧和格陵兰以北则显著减弱；在降水偏少型事件中，源于北大西洋地区的波列特征更加明显（图略）。

上述结果表明，与不同降水类型对应，在低温事件发生前的 1~3 候，前兆环流信号是显著不同的。因此，在中期—延伸期时间尺度上，上述结果对持续性低温事件的降水多寡提供了一个必要的预测依据。

## 7 结论和讨论

本文基于 1951~2009 年 NCEP/NCAR 再分析资料和中国 160 站降水资料，探讨了中国大范围持续性低温事件的关键环流特征，其降水多寡的原因以及不同降水类型低温事件的不同前兆信号。主要结果如下：

(1) 欧亚大陆中高纬地区上空的大型斜脊斜槽是中国大范围持续性低温事件的关键环流特征。当大型斜脊的纬向尺度较大且正高度异常中心偏强时，斜槽纬向尺度较大且靠近东亚沿岸，西伯利亚高压大范围加强，南侵冷空气活动加强，使中国南方地区降水偏少。相反，当大型斜脊的纬向尺度相对小时，斜槽位置偏西，南侵冷空气活动相对弱，有利于中国南方地区降水偏多。

(2) 在低温事件中我国南方地区的降水多寡，不仅受亚洲中高纬环流异常的影响，在很大程度上也取决于副热带大气环流的影响，其中西太副高和孟加拉湾南支槽的作用非常重要。在低温事件中，西太副高的加强和北进与孟加拉湾南支槽的加强，使得来自西太平洋、南海和孟加拉湾的三支暖湿气流到达我国南方地区，导致南方降水偏多，反之亦然。

(3) 与不同降水类型对应，在低温事件发生前的 1~3 候，大气环流的前兆信号显著不同：源自北大西洋地区的波列及其向下游的能量频散过程是降水偏多型低温事件的一个重要前兆信号。降水偏少型低温事件的前兆信号为，极涡在欧亚大陆一侧的次极区显著减弱，其整体结构呈两极型，其中一极伸向南欧和地中海，另一极伸向阿留申群岛。在中期—延伸期时间尺度上，这一结果可为持续性

低温事件降水多寡的预测提供有益的依据。

值得注意的是，降水偏多时（图 3a 和图 3b），西太副高脊线位置较常年偏北，强度偏强，同时高空急流表现出 La Niña 时期的急流异常特征，说明 ENSO 事件在低温事件南方降水中起到一定的作用，这仍值得以后进一步研究。

中国大范围持续性低温事件的类型是多样的（Peng and Bueh, 2011）。其中大家特别关注的是，低温事件是否伴有较强的降水过程，是否出现类似于“0801”事件那样的重大灾害。本文的着眼点及启示意义也正在于此。本文的一个重要结果是，与中国南方降水多寡对应的持续性低温事件，其中高纬环流的配置明显不同，同时它们的前期信号及演变过程也明显不同。但是，本文尚未涉及到相关动力学过程，需要进一步深入研究。同时，在降水偏多低温事件中，副热带环流异常，特别是西太副高和南支槽的加强，究竟如何与欧亚大陆中高纬环流异常以及北太平洋环流异常（如阿留申低压的减弱）联系在一起？这些问题需要进一步澄清，有待从动力学分析和数值模拟等方面继续深入研究。

如前所述，亚洲大陆大型斜脊斜槽的位置及空间尺度与持续性低温事件的降水类型存在密切关系。因此，从业务应用的角度看，迫切需要建立一个表征大型斜脊/斜槽的位置及空间尺度的定量化指标。这对大范围持续性低温事件及其降水形势的监测和预测具有重要意义，有待进一步关注和深入探讨。

**致谢** 特别感谢谢作威博士在资料处理及计算方面的帮助。在本文的完成过程中有幸得到薛峰研究员、孙淑清研究员、纪立人研究员和彭京备博士的指导和帮助，在此一并感谢。

## 参考文献 (References)

- Bueh C, Shi N, Xie Z W. 2011a. Large-scale circulation anomalies associated with persistent low temperature over southern China in January 2008 [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 12 (3): 273–280, doi:10.1002/asl.333.
- Bueh C, Fu X Y, Xie Z W. 2011b. Large-scale circulation features typical of wintertime extensive and persistent low temperature events in China [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 4 (4): 235–241.
- 丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 等. 2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系 [J]. *气象学报*, 66 (5): 808–825.
- Ding Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66 (5): 808–825.
- 龚道溢, 王绍武. 1999a. 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响

- 的研究 [J]. 地理学报, 54 (2): 125–133. Gong D Y, Wang S W. 1999a. Variability of the Siberian high and the possible connection to global warming [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 54 (2): 125–133.
- 龚道溢, 王绍武. 1999b. 近百年全球温度变化中的 ENSO 分量 [J]. 地球科学进展, 14 (5): 518–523. Gong D Y, Wang S W. 1999b. The influence of ENSO on global temperature during the last 100 years [J]. *Advance in Earth Science* (in Chinese), 14 (5): 518–523.
- 郭其蕴. 1996. 中国气候变化与东亚季风 [M]// 张丕远. 中国历史气候变化. 济南: 山东科学技术出版社, 468–483. Guo Q Y. 1996. Climate change in China and East Asian monsoon [M]// Zhang P Y. *Historical Climate Change in China* (in Chinese). Jinan: Shandong Science and Technology Press, 468–483.
- 胡秀玲, 刘宣飞. 2005. 东北地区冬季气温与北极涛动年代际关系研究 [J]. 南京气象学院学报, 28 (5): 640–648. Hu X L, Liu X F. 2005. Decadal relationship between winter air temperature in Northeast China and Arctic oscillations [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 28 (5): 640–648.
- 纪立人, 布和朝鲁, 施宁, 等. 2008. 2008 年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析 III: 青藏高原—孟加拉湾气压槽 [J]. 气候与环境研究, 13 (4): 446–458. Ji L R, Bueh C, Shi N, et al. 2008. On the medium-range process of the rainy, snowy and cold weather of South China in early 2008. Part III: Pressure trough over the Tibetan Plateau/Bay of Bengal [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13 (4): 446–458.
- 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.
- Peng J B, Bueh C. 2011. The definition and classification of extensive and persistent extreme cold events in China [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 4 (5): 281–286.
- Peng J B, Bueh C. 2012. Precursory signals of extensive and persistent extreme cold events in China [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 5: 252–257.
- 钱维宏, 张玮玮. 2007. 我国近 46 年来的寒潮时空变化与冬季增暖 [J]. 大气科学, 31 (6): 1267–1278. Qian W H, Zhang W W. 2007. Changes in cold wave events and warm winter in China during the last 46 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (6): 1267–1278.
- 施宁, 布和朝鲁, 纪立人, 等. 2008. 2008 年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析 II: 西太平洋副热带高压的特征 [J]. 气候与环境研究, 13 (4): 434–445. Shi N, Bueh C, Ji L R, et al. 2008. On the medium-range process of the rainy, snowy and cold weather of south China in early 2008. Part II: Characteristics of the western Pacific subtropical high [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13 (4): 434–445.
- 索渺清, 丁一汇. 2009. 冬半年副热带南支西风槽结构和演变特征研究 [J]. 大气科学, 33 (3): 425–442. Suo M Q, Ding Y H. 2009. The structures and evolutions of the wintertime southern branch trough in the subtropical westerlies [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (3): 425–442.
- 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 [J]. 大气科学, 34 (1): 175–183. Tan Guirong, Chen Haishan, Sun Zhaobo, et al. 2010. Linkage of the cold event in January 2008 over China to the North Atlantic Oscillation and stratospheric circulation anomalies [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34(1): 175–183.
- 陶诗言, 卫捷. 2008. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析 [J]. 气候与环境研究, 13 (4): 337–350. Tao Shiyan, Wei Jie. 2008. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the southern China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13 (4): 337–350.
- 王林, 冯娟. 2011. 我国冬季降水年际变化的主模态分析 [J]. 大气科学, 35 (6): 1105–1116. Wang L, Feng J. 2011. Two major modes of the wintertime precipitation over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35 (6): 1105–1116.
- 王志伟, 翟盘茂, 唐红玉, 等. 2005. 中国南方近半个世纪的雨涝变化特征 [J]. 自然灾害学报, 14 (3): 56–60. Wang Z W, Zhai P M, Tang H Y, et al. 2005. Variation of characteristics of waterlogging by rain over southern China in the last half century [J]. *Journal of Natural Disasters* (in Chinese), 14 (3): 56–60.
- 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 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137: 1111–1131.
- 曾剑, 张强, 王同美. 2010. 东亚冬季风与中国南方冬季降水的关系分析 [J]. 高原气象, 29 (4): 975–981. Zeng J, Zhang Q, Wang T M. 2010. Analysis on relationship of East-Asian winter monsoon intensity and winter precipitation in southern China [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 29 (4): 975–981.
- 张自银, 龚道溢, 郭栋, 等. 2008. 我国南方冬季异常低温和异常降水事件分析 [J]. 地理学报, 63 (9): 899–912. Zhang Z Y, Gong D Y, Guo D, et al. 2008. Anomalous winter temperature and precipitation events in southern China [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 63 (9): 899–912.
- Zeng Q C. 1983. The evolution of a Rossby-wave packet in a three-dimensional baroclinic atmosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 40: 73–84.
- 赵思雄, 孙建华. 2008. 2008 年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征 [J]. 气候与环境研究, 13 (3): 351–367. Zhao S X, Sun J H. 2008. Multi-scale systems and conceptual model on freezing rain and snow storm over southern China during January–February 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13 (4): 351–367.
- 智协飞, 张玲, 潘嘉露. 2011. 我国南方冬季气候变暖前后极端降水事件分析 [J]. 热带气象学报, 27 (2): 166–172. Zhi X F, Zhang L, Pan J L. 2011. An analysis of the winter extreme precipitation events on the background of southern China climate warming [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 27 (2): 166–172.
- Zhou W, Chan J C L, Chen W, et al. 2009. Synoptic-scale controls of persistent low temperature and icy weather over southern China in January 2008 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137: 3978–3991.
- 朱乾根, 施能, 吴朝晖, 等. 1997. 近百年北半球冬季大气活动中心的长期变化及其与中国气候变化的关系 [J]. 气象学报, 55 (6): 750–757. Zhu Q G, Shi N, Wu Z H, et al. 1997. The long term change of atmospheric active centers in northern winter and its correlation with China climate in recent 100 year [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 55 (6): 750–757.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2000. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 637–643. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. 2000. *Principal in Synoptic Meteorology* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 637–643.