

中国南方冬季两类复合极端低温事件的基本特征及成因分析

陆秋鸣^{1, 2} 陈海山^{1, 2} 嵇立群^{1, 2}

1 南京信息工程大学气候系统预测与变化应对全国重点实验室/气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

摘要: 复合极端低温事件对我国南方地区经济社会和人民生活产生重大影响。本文利用 1982~2022 年中国 CN05.1 逐日最低气温、相对湿度数据资料和 ERA5 再分析资料, 探讨我国南方冬季两类复合极端低温事件分时空分布特征及可能成因。结果表明, 我国冬季冷干事件在南方大部均有分布, 并且高频次中心在东部和江淮地区, 而我国冬季冷湿事件呈南多北少的分布特征, 主要发生在西南和华南以西地区。此外近 41 年来我国南方大部分地区冷干事件呈增加趋势, 冷湿事件则明显减少, 两类事件年际变率明显。且冷干事件多发生于前冬季, 而冷湿事件则多发生于后冬季。进一步分析两类事件成因差异, 揭示了两类事件发生的前冬和后冬对应着不同的环流系统和水汽条件。亚洲中高纬度斜脊和东亚大槽是冷干事件的关键环流特征, 为冷空气南侵提供有利环流条件, 同期我国南方地区水汽显著辐散, 有利于冷干事件发生。冷湿事件发生时期北支波列使得东半球中高纬地区维持两槽一脊的环流形势, 南支波列通过西亚和中东地区传播导致南支槽加深并和西太平洋上空异常反气旋共同为我国南方地区输送暖湿气流, 对应南方地区水汽辐合, 为冷湿事件提供充足水汽。

关键词 中国南方 复合极端低温事件 大气环流异常 水汽条件

文章编号 2025009A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2507.25009

收稿日期 2025-8-20; 网络预出版日期

作者简介 陆秋鸣, 男, 1998 年 10 月出生, 硕士研究生, 主要从事极端天气和陆面过程研究。E-mail: luqiuming_98@foxmail.com

通讯作者 陈海山, E-mail: haishan@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划重点专项 (2022YFF0801603)

Funded by National Key Research and Development Project (2022YFF0801603)

Analysis of the basic characteristics and causes of two types of compound extreme low temperature events in southern China during the winter season

LU Qiuming^{1,2} CHEN Haishan^{1,2} JI Liquan^{1,2}

1 State Key Laboratory of Climate System Prediction and Risk Management (CPRM) /Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME) /Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract Compound extreme low temperature events have a significant impact on the economy, society, and people's lives in southern China. This study utilizes daily minimum temperature, relative humidity data from China's CN05.1 dataset (1982~2022), along with ERA5 reanalysis data, to explore the temporal and spatial distribution characteristics and potential causes of two types of compound extreme low temperature events in southern China during the winter season. The results show that Cold-Dry events are distributed across most of southern China, with high-frequency centers in the eastern and Jianghuai regions, while Cold-Wet events exhibit a south-to-north decreasing trend, mainly occurring in the southwestern and western South China regions. Furthermore, over the past 41 years, Cold-Dry events have shown an increasing trend in most southern regions of China, whereas Cold-Wet events have significantly decreased, with notable interannual variability in both event types. Cold-dry events typically occur in early winter, while Cold-Wet events are more likely to happen in late winter. Further analysis of the different causes of these two types of events reveals that the early and late winter periods are associated with distinct atmospheric circulation systems and moisture conditions. The mid-to-high-latitude oblique ridge over Asia and the East Asian trough are key circulation features for Cold-Dry events, providing favorable conditions for the southward intrusion of cold air. During this period, there is significant moisture divergence in southern China, which promotes the occurrence of Cold-Dry events. On the other hand, during the occurrence of Cold-Wet events, the northern branch of the wave pattern maintains a two-trough, one-ridge circulation over the middle and high latitudes of the Eastern Hemisphere. The southern branch of the wave pattern, propagating through West Asia and the Middle East, deepens the southern trough and interacts with the anomalous anticyclone over the western Pacific, transporting warm and moist air to southern China, leading to moisture convergence in the region and providing abundant moisture for Cold-Wet events.

Key words Southern China, Compound extreme low temperature events, Atmospheric circulation anomalies, Water vapor conditions

1. 引言

IPCC 第六次评估报告指出未来极端温度、极端降水、干旱等将会更容易出现。自 1950 年以来，人类影响可能增加了极端事件的可能性 (IPCC, 2021)。有研究表明，在全球变暖的背景下，冬季极端低温事件发生的强度以及变化更加剧烈 (Alexander et al., 2006; Tebaldi et al., 2006; 王迪等, 2015)。如 2008 年初，我国南方大部分地区经历了持续的极端低温天气及雨雪冰冻灾害，造成了极为严重的经济损失，全国受灾人口 1 亿多人，直接经济损失达 1500 多亿元 (丁一汇等, 2008; 高辉等, 2008; 李崇银等, 2008; Cholaw et al., 2011); 2018 年 1 月我国南方地区出现了两次雨雪冰冻事件 (彭京备和孙淑清, 2019); 2020/2021 年冬季我国在短时间内遭遇了 3 次强冷空气过程，并有 2 次过程直接侵入我国南方地区 (Zheng et al., 2022; Yu et al., 2022)。也有研究发现冬季极端低温频数变化呈现减小趋势，且空间差异明显 (刘雅星等, 2010; Orlowsky et al., 2012; 索朗塔杰等, 2020)。极端低温时间的物理机制分析主要结合行星尺度振荡系统，例如 ENSO、AMO、NAO 和 IOD (Cattiaux et al., 2010; Shi et al., 2018; Mallick et al., 2022)。另外也有研究证明极端低温事件的发生与天气尺度瞬变波活动关系密切，瞬变波传播发展可能是极端低温发生的重要条件 (陈海山等, 2012; Park et al., 2024)。

人类活动影响下复合型极端事件的频率趋于增加 (IPCC, 2021)。因此人们越来越关注和了解极端事件之间复杂的相互作用，特别是温度和降水之间的极端气候 (余荣和翟盘茂, 2021; 史军等, 2023)。复合极端事件两个或两个以上发生在同一时间，又或者同时在不同地区发生的极端的天气或气候事件组合，会导致远比单个事件发生还要极端的影响 (Zscheischler et al., 2017; 方建等, 2023)。20 世纪后半叶以来，全球中高纬地区很多国家降水频率开始增加，由此造成的极端温度、降水复合事件频发 (Groisman et al., 2005; Kharin et al., 2013; Zhou et al., 2014; Fischer et al., 2016; Gao et al., 2018; Peng et al., 2023)。全球暖/干和暖/湿极端事件发生率大幅增加 (Hao et al., 2013)。目前针对复合极端事件的研究主要在复合高温和干旱极端事件上 (Sarhadi et al., 2018; Yu et al., 2020; Feng et al., 2020; He et al., 2023)，结果表明亚洲、欧洲、澳大利亚和北美大陆干旱地区等全球多个区域的复合高温干旱复合事件频率、持续时间和严重程度都有所上升。复合低温事件的影响同样不可忽视，很多研究也关注到大范围低温、降水和冰冻灾害性天气的组合，这些组合性灾害事件的致灾性更强 (Bernstein, 2000; Peng and Bueh, 2012; Zong et al., 2014)。复合低温事件在我国农业地区的空间分布存在明显差异，影响面积在中国中部和南部显著增加 (Li et al., 2019)。关于复合低温、降水灾害性事件个例的研究已有很多，各事件发生时间及其成因都存在差异 (王凌等, 2008; Sun et al., 2022; Li et al., 2023)，有学者也提出了组合性灾害事件的客观识别方法及其关键特征，并且揭示了不同组合性灾害事件发生的有利条件 (宗海锋等, 2022; 周晶等, 2024)。极端事件存在复合发生的情况，其

过程和背后机制的研究具有现实意义。

本文的关注点在于我国南方复合极端低温事件进行尝试性研究。目前复合低温事件尤其是冷干和冷湿事件的研究并不常见，考虑我国冬季南方易受到复合低温事件的影响，因此本文的关注点在冬季我国南方冷干和冷湿两类复合极端低温事件的时空分布特征和成因，其中成因方面重点关注二者的季节内环流异常以及差异。

2. 资料与方法

2.1 资料

本文使用的数据包括：（1）中国科学院气候变化研究中心提供的 CN05.1 格点化观测数据集（吴佳等，2013），要素包括：最低气温和相对湿度。空间分辨率 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ，时间分辨率为逐日，可从 <https://ccrc.iap.ac.cn/resource> 获取。（2）欧洲中期天气预报中心（ECMWF）第五代再分析资料数据集 ERA5（Hersbach et al., 2020），该数据同化了大量常规观测数据和卫星数据，空间分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，时间分辨率为逐月和逐日。要素包括海平面气压场，垂直方向 200 hPa、500 hPa 和 850 hPa 位势高度场、风场、比湿场等资料，水汽通量及其散度通过风场和比湿场计算得到。可从 <https://www.ecmwf.int> 获取。

本文的研究时间段为 1981/1982~2021/2022 年冬季，冬季定义为前一年 12 月 1 日至当年的 2 月 28 日（不考虑闰年的 29 日）共 90 天。本文的研究区域为中国南方地区（ $20^\circ\text{N} \sim 35^\circ\text{N}$ ， $100^\circ\text{E} \sim 123^\circ\text{E}$ ）。文中应用到百分位法确定极端低温事件的强度阈值和典型事件的面积阈值，合成分析法用于分析典型事件中的大气环流和水汽分布特征。

2.2 方法

2.2.1 复合极端低温事件的定义

复合低温事件的定义较为复杂，可以是两个或者多个同时或相继发生的极端事件（余荣和翟盘茂，2021），本文关注温度和相对湿度时空复合的低温事件。基于百分位阈值法选取极端低温和湿度的强度阈值（He et al., 2023）对复合极端事件发生日进行客观识别。取 1981/1982~2021/2022 年冬季某格点的最低温度升序序列的第 10 百分位（下十分位）值作为低温阈值 δ_T ，相对湿度升序序列的第 10 百分位（下十分位）和第 90 百分位（上十分位）值作为相对湿度阈值 δ_{Qmin} （ δ_{Qmax} ），由此得到冬季 90 天中每日的极端低温、湿度阈值。当某格点某日最低温度 $\leq \delta_T$ 且相对湿度 $\leq \delta_{Qmin}$ 时，判定为冷干事件（CD）日，当某格点某日最低温度 $\leq \delta_T$ 且相对湿度 $\geq \delta_{Qmax}$ 时，判定为冷湿事件（CW）日。

为了筛选具有代表性的典型极端事件，参考界定大范围持续性低温事件的方法（Peng et al., 2021）。将本文研究区域中国南方每天冷干事件（冷湿事件）所占格点数作为该日的影响面积（区域总格点数 6161），为保证典型事件影响范围，本文选取冷干事件（冷湿事件）影响面积升序序列的第 80 百分

位（上五分位）的值作为面积阈值 S_D （ S_W ）。当某日冷干事件格点数 $\geq S_D$ （格点数 658）且持续天数 3 天或以上时就将其定义为一次典型冷干事件（Typical CD），当某日冷湿事件格点数 $\geq S_W$ （格点数 395）且持续天数 3 天或以上时就将其定义为一次典型冷湿事件（Typical CW）。在 1982~2022 年，分别筛选出了典型冷干事件 18 次和典型冷湿事件 19 次（表 1）。

表 1 两类典型复合极端低温事件发生时间段和持续时间

Table1 Starting and ending dates, durations of two typical types of winter compound events

编号	典型冷干事件		典型冷湿事件	
	日期	持续天数/d	日期	持续天数/d
1	1984 年 1 月 3~5 日	3	1982 年 2 月 5~8 日	4
2	1984 年 2 月 6 日~8 日	3	1982 年 12 月 6~8 日	3
3	1984 年 12 月 22 日~30 日	9	1983 年 1 月 8~11 日	4
4	1987 年 12 月 1~7 日	7	1983 年 2 月 20~22 日	3
5	1990 年 12 月 1~3 日	3	1984 年 1 月 27~30 日	4
6	1997 年 12 月 9~11 日	3	1984 年 2 月 2~5 日	4
7	1999 年 12 月 20~24 日	5	1984 年 12 月 18~21 日	4
8	2000 年 1 月 26~28 日	3	1985 年 2 月 17~21 日	5
9	2005 年 12 月 13~15 日	3	1985 年 2 月 24~27 日	4
10	2008 年 2 月 8~14 日	7	1985 年 12 月 8~11 日	4
11	2011 年 1 月 5~7 日	3	1987 年 2 月 19~21 日	3
12	2011 年 1 月 10~12 日	3	1989 年 2 月 22~25 日	4
13	2011 年 1 月 16 日~18 日	3	1990 年 2 月 2~4 日	3
14	2011 年 12 月 9~11 日	3	2004 年 12 月 28~30 日	3
15	2014 年 2 月 13~15 日	3	2008 年 1 月 25~2 月 2 日	9
16	2016 年 1 月 23~26 日	4	2010 年 2 月 13~15 日	3
17	2020 年 12 月 14~16 日	3	2013 年 1 月 4~6 日	3
18	2021 年 1 月 7~10 日	4	2020 年 12 月 14~16 日	3
19	——	-	2022 年 2 月 20~22 日	3

2.2.2 统计方法

在分析扰动对极端天气的影响时，常用波作用通量来诊断 Rossby 波的传播。由于两类典型低温事件发生时间的季节内差异明显，故使用 T-N 波作用通量来表征，其能够更好地描述纬向非均匀气流中地较大振幅地西风带 Rossby 长波扰动（施春华，2017）。

T-N 波作用通量（Takaya and Nakamura, 2001）的三维计算公式如下：

$$W = \frac{p \cos \varphi}{2|U|} \left(\begin{aligned} &\frac{U}{a^2 \cos^2 \varphi} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda^2} \right] + \frac{V}{a^2 \cos \varphi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \varphi} \right] \\ &\frac{U}{a^2 \cos \varphi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \varphi} \right] + \frac{V}{a^2} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \varphi^2} \right] \\ &\frac{f_0^2}{N^2} \left\{ \frac{U}{a \cos \varphi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial z} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial z} \right] + \frac{V}{a} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} \frac{\partial \psi'}{\partial z} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \varphi \partial z} \right] \right\} \end{aligned} \right) \quad (1)$$

其中 $\psi' = \frac{\Phi'}{f}$ 表示扰动地转流函数， P 表示气压， $|U|$ 表示气候场的风速大小， U 和 V 分别表示纬向风和经向风， λ 和 φ 分别表示经度和纬度， a 表示地球半径， N^2 表示浮力频率的平方。

此外，本文使用了 EOF 方法（Lorenz and Edward, 1956）、North 检验方法（North et al., 1982）和 t 检验方法（Bayley and Hammersley, 1946）。

3. 结果与分析

3.1 两类复合极端低温事件的时空特征

首先，本文探究中国南方冬季两类复合极端低温事件的时空分布特征。我们分析 1982~2022 年两类事件平均频数分布（图 1a 和 b）。两类极端低温事件频数分布差异明显，冷干事件主要发生在东部沿海和江淮地区，冷湿事件主要发生在华南和西南地区。冷干事件频数偏多，大多在 3d 以上；其中，长江中下游地区和东南沿海地区最多，区域内部分格点能达到 6d 以上。冷湿事件频次大多在 2d 以上；大值区位于我国西南地区，部分区域能达到 5d 以上，而我国东南沿海地区发生频次较低。对比两类复合事件频数分布，冷干事件发生多集中于东南地区且持续时间较长，影响范围较大，呈现东多西少的分布型；而冷湿事件多发生于西南地区且持续时间较短，表现为南多北少的空间分布。

由 1982~2022 年两类复合事件频数的趋势分布（图 1c 和 d）可以发现，冷干事件发生频数趋势变化显著的区域主要位于两湖、两广地区，而冷湿事件发生频数趋势变化则与发生频数大值区基本相同。两类复合事件发生频次近 41 年的趋势分布差异明显，主要表现为冷干事件增加，冷湿事件减少。冷干事件在南方大部分地区都为增加趋势且通过了 90% 的置信度检验，大部分格点增加幅度超过 1d/(10a)，在云南、贵州部分地区有减少趋势。冷湿事件频数主要在华南中西部地区显著减弱，在东南沿海地区存在一定的增强趋势但并不显著。

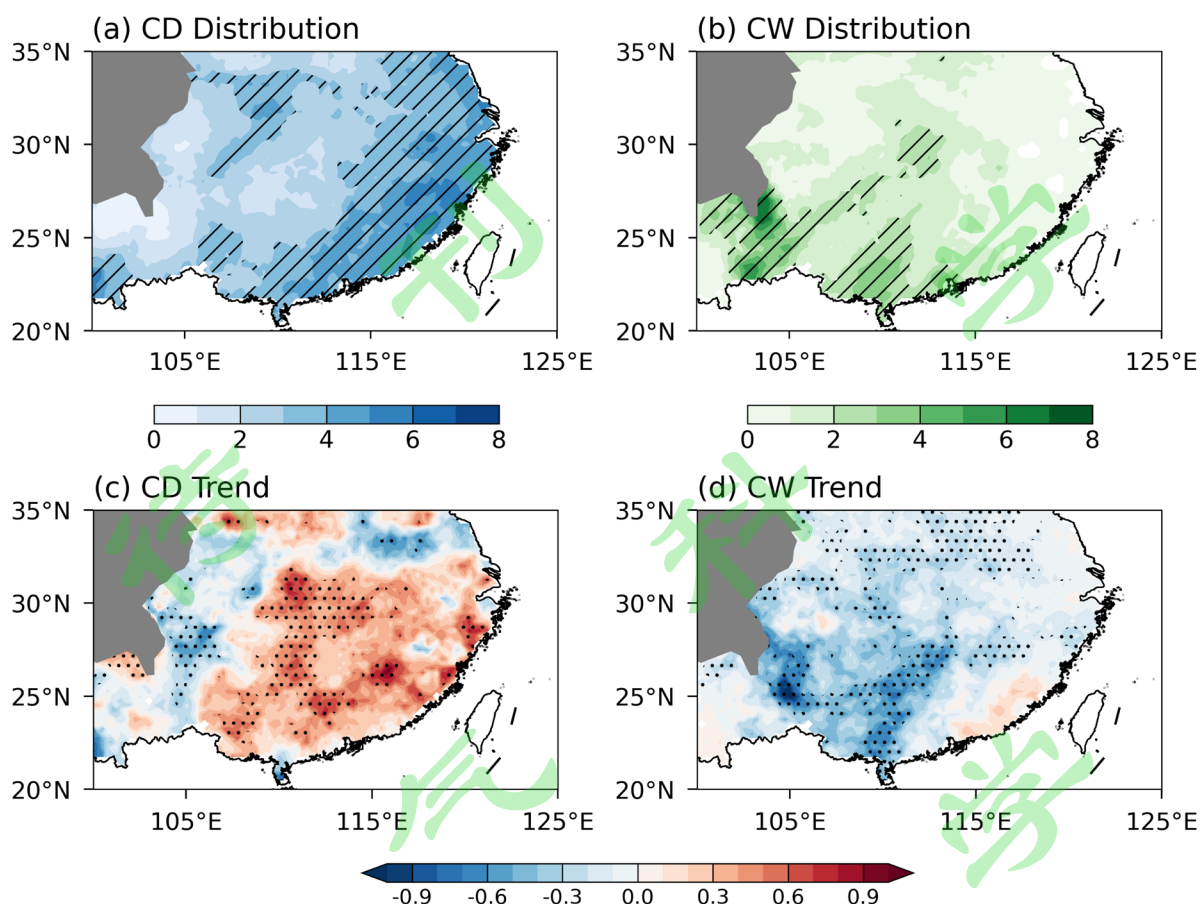


图 1 1982~2022 年我国南方冬季复合冷干事件 (CD, 左列) 和冷湿事件 (CW, 右列) 的 (a,b) 频数分布 (单位: d) 和 (c,d) 趋势分布 (单位: d/10a)。灰色阴影区域为青藏高原地区, 黑色阴影区域表示发生频数大于等于 3 天, 黑色打点区域通过了显著性水平为 0.1 的检验。

Fig.1 The (a, b) frequency (units: d) and (c, d) linear trend (units: d/10a) of winter compound Cold-Dry events (CD, left column) and Cold-Wet events (CW, right column) in southern China from 1982 to 2022. Gray shadings indicate the Tibetan Plateau region. Black shadings indicate regions with the frequency ≥ 3 days, black dotted areas passed the significance test at a 0.1 level.

为进一步研究我国南方冬季复合极端低温事件的时空变化特征, 对 1982~2022 年共 41 年两类复合极端事件发生频次进行经验正交函数分解 (EOF)。图 2 为 EOF 分解所得到的两类复合极端低温事件的第一模态空间分布及其对应的时间序列。冷干 (冷湿) 事件发生频次的第一模态方差贡献率为 37.57% (42.31%), 且通过了 North 检验 (North et al., 1982), 说明各模态存在显著差别且相互独立, 由于两类事件第一模态方差贡献明显偏大, 因此第一模态能较好反映南方冬季南方冷干、冷湿事件发生频次的空间分布特征。冷干事件第一主导模态空间分布呈全区一致模态 (图 2a), 在福建和广东地区存在显著的正中心, 表明该区域冷干事件发生频次年际变化较大。对应的 PC1 时间序列 (图 2b) 有一定的阶段性特征, 说明冷干事件有增加趋势, 但其年代际转折并不明显, 主要表现为年际变化, 1984、2000、2006、2008、2011、2014、2016、2018、2021 年时间序列正值较大, 说明这些

年冷干事件在我国南方地区发生频次较多。冷湿事件第一模态空间结构呈现马鞍型分布特征(图 2c), 四川盆地西部有显著的负中心, 而云南、贵州和广西大部分地区发生频次显著正异常。冷湿事件第一模态的时间序列 PC1 存在年际和年代际兼有的变化特征(图 2d), 1982~1995 年期间 PC1 主要表现为正值, 说明冷湿事件频发, 而 1995 年后冷湿事件发生频次减少, 但也存在极端偏多年份。其中 1982、1983、1984、1985、1989、2008、2011 年时间序列正异常显著, 意味着这些年冷湿事件多发生在我国华南地区。

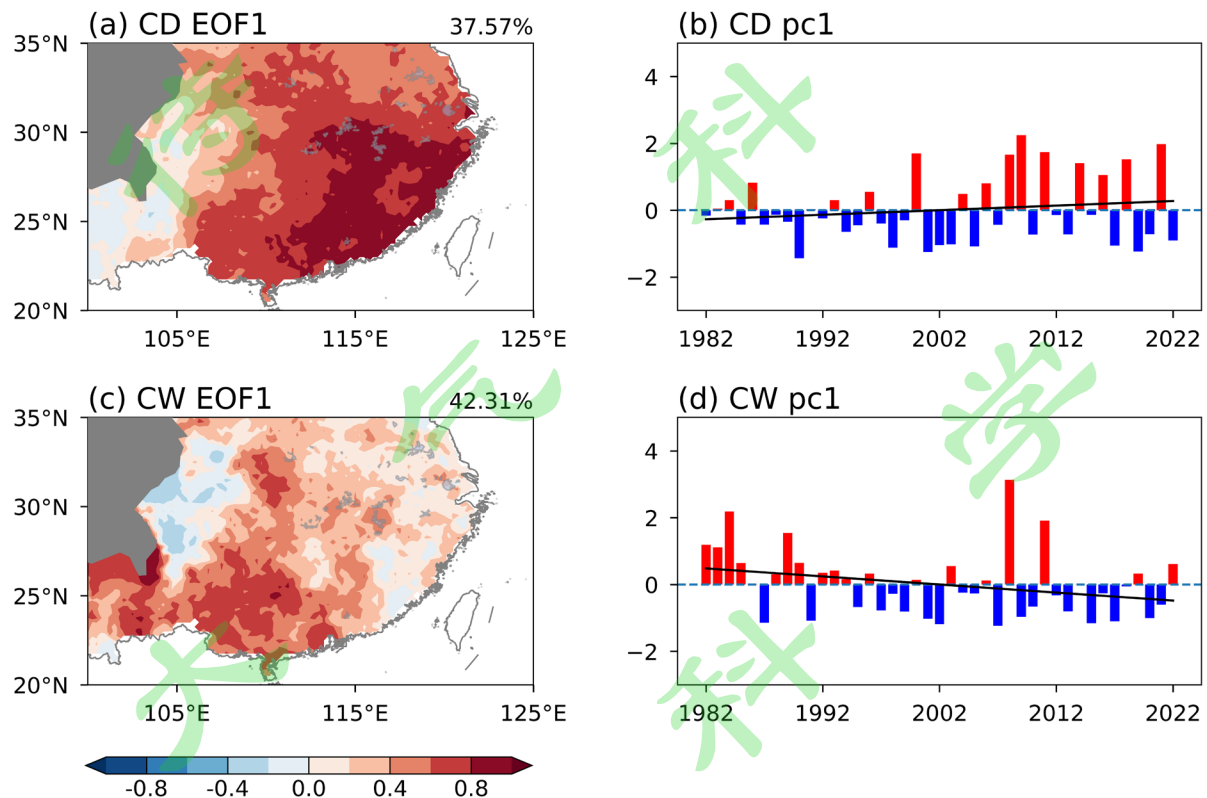


图 2 1982~2022 年我国冬季南方冷干事件（第一行）和冷湿事件（第二行）发生频数 EOF 分解第一模态的 (a,b) 空间分布（单位: d）和 (c,d) 时间序列。灰色阴影区域为青藏高原地区, 黑色实线为时间序列的趋势线。

Fig.2 The (a, b) spatial patterns (units: d) and (c, d) time coefficient of the first mode of EOF decomposition of the frequency of winter compound Cold-Dry events (top line) and Cold-Wet events (second line) in southern China from 1982 to 2022. Gray shadings indicate the Tibetan Plateau region. Black solid line is the long-term trend for the time coefficient.

两类极端事件的年际变率十分明显, 为进一步探究其时间变化特征, 本文通过面积阈值和持续时间筛选出两类典型事件(表 1)。从两类典型复合极端低温事件的发生时段和影响面积(图 3a), 可以发现两类典型事件年代际变化也与前文所述结果较为一致, 典型冷干事件有一定增加趋势, 每次典型冷干事件影响面积均较大; 典型冷湿事件在 1992 年前频发, 1992 年后减少趋势明显, 但也存在 2008、2011 等极端年份, 典型冷湿事件影响面积较典型冷干事件小。两类典型事件的发生时段并

无明显的重叠，也能印证全区基本一致的年际变化特征，说明筛选的典型事件具有合理性。例如 2008 年 1 月发生的严重低温雨雪冰冻灾害事件，期间发生的几次灾害性天气过程（布和朝鲁等，2008；施宁等，2008；纪立人等，2008），本文鉴别的典型事件发生时段与大范围持续性雨雪天气过程的时间基本吻合，说明其有一定的代表性。两类典型事件的发生还存在明显的季节内差异（图 3b 和 c），典型冷干事件主要发生于前冬，而典型冷湿事件则主要发生于后冬。即典型冷干事件的发生频次和持续时间基本都集中于 12 月和 1 月，2 月中下旬基本不发生；典型冷湿事件在 12 月偶有发生且持续时间较短，而多发生于 1 月中下旬至 2 月末，持续时间较长。

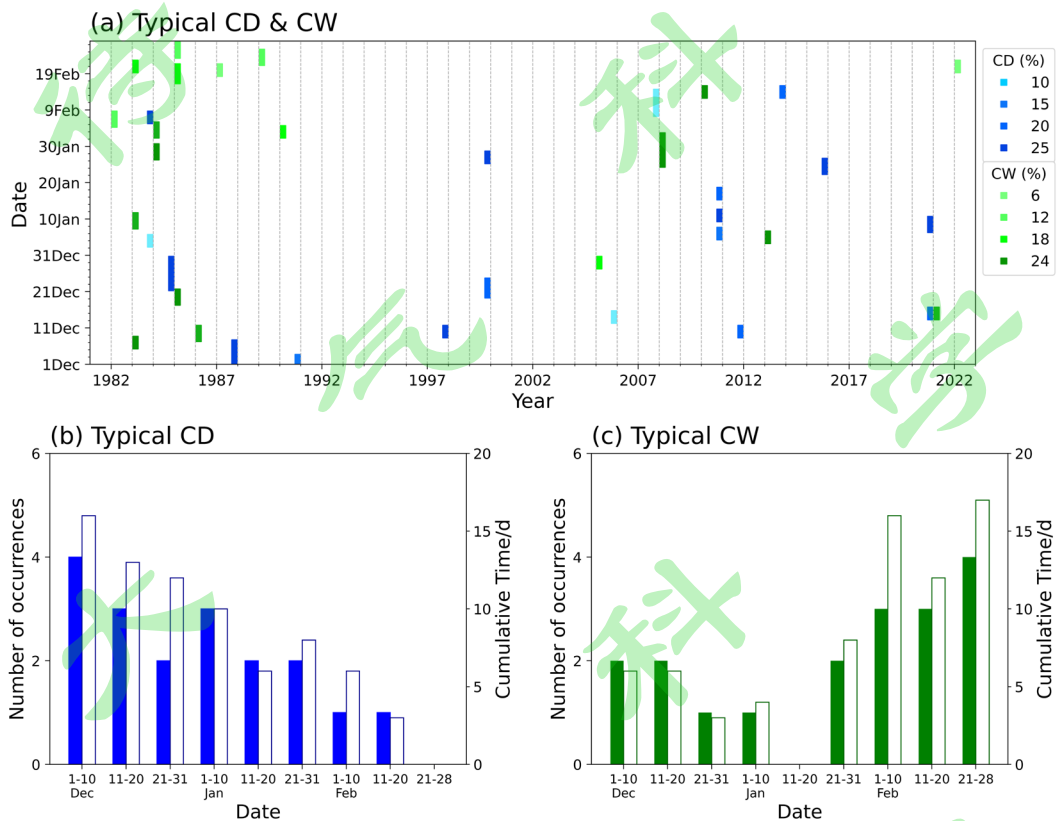


图 3 1982~2022 年我国南方冬季 (a) 典型冷干事件 (蓝色柱) 和典型冷湿事件 (绿色柱) 发生时段 (a)。柱的上 (下) 边缘对应事件的开始 (结束) 日期，柱长度对应事件持续天数 (单位: d)，柱颜色深浅对应事件影响格点占总格点的百分比 (单位: %)。1982~2022 年冬季各旬 (b) 典型冷干事件及 (c) 典型冷湿事件的累计频数 (实心柱) 和持续时间 (空心柱)。

Fig.3 Time of occurrence of typical Cold-Dry events (blue bars) and typical Cold-Wet events (green bars) in winter from 1982 to 2022 in southern China. The bottom (top) edge of the bar corresponds to the start (end) date, the length of the bar corresponds to the event duration (units: d) and the color of the bar corresponds to the percentage of grid points affected by the event out of the total grid points (units: %). Cumulative occurrences frequency (solid bar) and duration (hollow bar) of (b) typical Cold-Dry events and (c) typical Cold-Wet events in every dekad in winter from 1982 to 2022.

3.2 两类复合极端低温事件的环境背景及差异

由上述分析可以发现，我国南方冬季两类复合极端低温事件发生时间的季节内差异明显，即冷

干事件多发生于前冬，冷湿事件多发生于后冬，因此基于冬季平均的环流背景研究事件成因不够严谨。本文将冷干事件和冷湿事件发生频数 EOF 第一模态时间序列去趋势标准化后分别与前冬季（12 月和 1 月）和后冬季（1 月和 2 月）风场和位势高度场进行回归分析，两类复合低温事件对应的前冬和后冬的大气环流背景存在差异。结果表明，冷干事件主要受我国东北部异常的气旋性环流控制，西北侧的西伯利亚中西部地区异常的反气旋性环流控制，有利于引导北方冷空气入侵我国南方地区，控制我国东部大部分地区的气旋性环流不利于海洋暖湿气流输送，为冷干事件形成创造条件（图 4a, c 和 e）。且这两个主要的异常环流系统出现随高度增加而增强的现象，结合显著性检验结果同样也说明影响我国南方冷干事件的主要为对流层中高层大气环流系统。冷湿事件主要由西伯利亚地区至我国东北地区异常反气旋性环流和孟加拉湾北侧异常气旋性环流的一部分控制（图 4b）。前者有利于引导高纬度地区冷空气的南下入侵我国，后两者引起的偏北风气流影响我国南方地区，从而形成有利于复合冷湿事件的环流形势。显著性检验结果显示对流层中低层西伯利亚高压脊显著影响着复合冷湿事件（图 4d 和 f），且高压脊在后冬偏北偏东，或造成冷空气路径的差异。

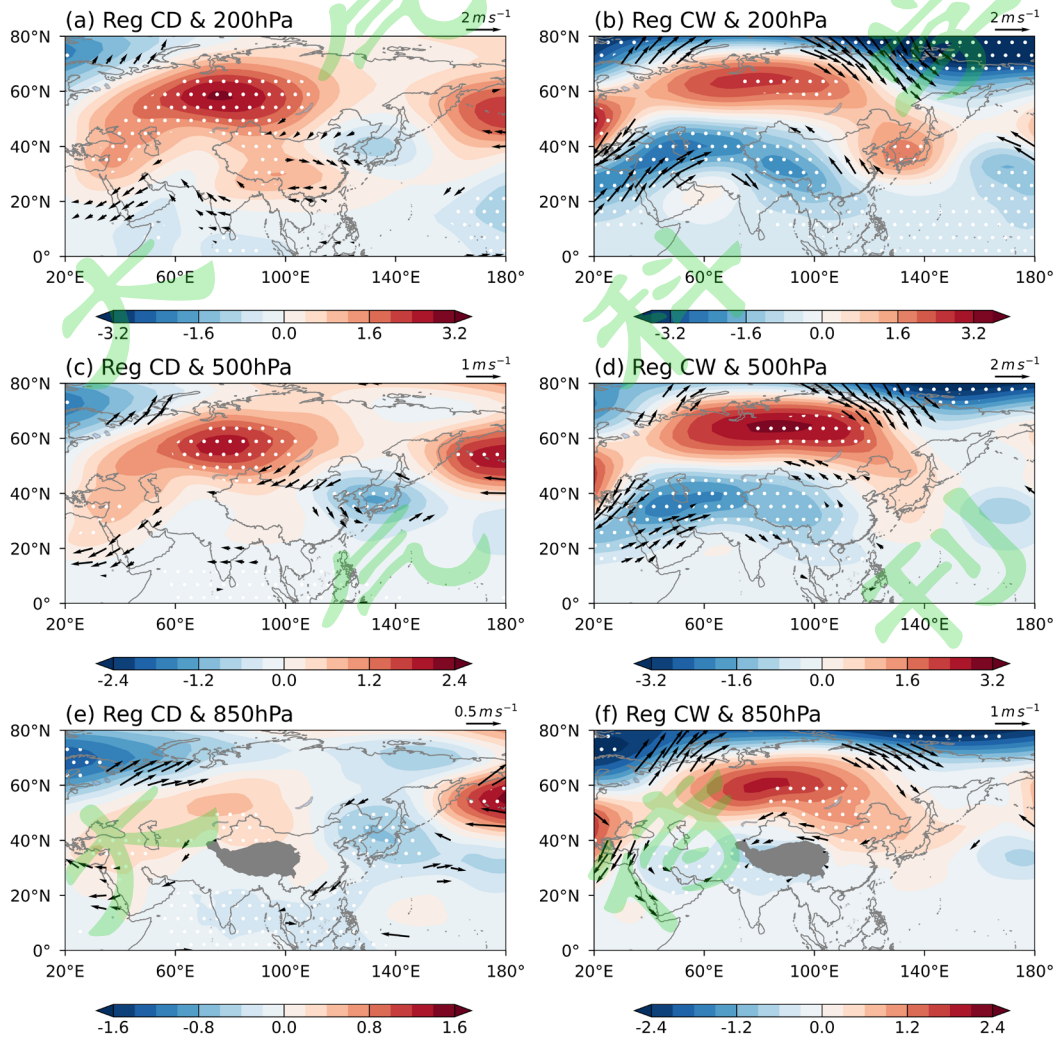


图 4 冷干事件（左列）和冷湿事件（右列）发生频数 EOF1 去趋势标准化时间序列与 (a, b) 200 hPa、(c, d) 500 hPa 和 (e, f) 850 hPa 位势高度场（阴影，单位：dagpm）和风场（矢量，单位：m s⁻¹）的回归。灰色阴影区域为青藏高原地区，白色打点区域为位势高度距平通过了显著性水平为 0.1 的检验，黑色矢量箭头为风场通过了显著性水平为 0.1 的检验。

Fig.4 Regression between the detrended and standardized time coefficient of the first mode of EOF decomposition of the frequency of Cold-Dry events (left column) Cold-Wet events (right column) and height fields (shaded, units: dagpm) and wind (vector, units: m s⁻¹) at (a, b) 200 hPa, (c, d) 500 hPa and (e, f) 850 hPa. Gray shadings indicate the Tibetan Plateau region. White dotted areas and black arrows indicate height anomalies and wind passing the significance test at a 0.1 level.

回归分析研究了两类极端事件发生于前冬和后冬的大气环流成因差异。冬季两类复合极端低温事件发生频数通常都在 10 天以下（图 1），因此为进一步验证两类事件发生时季节内环流差异，将典型事件发生时间段（表 1）的逐日位势高度场进行合成分析。结果显示，两类典型复合低温事件发生时，在东北亚地区存在明显的负距平使极涡边缘向东亚中纬度地区延伸拉长，东亚大槽加深（图 5a 和 b）。极涡向南延伸与西风带长波脊相配合，有利于冷空气的向南入侵我国（张恒德等，2008）。另外，在典型冷湿事件发生过程中，极涡在东欧平原向南扩展，西伯利亚地区阻塞高压的存在导致极涡在东半球中高纬有一定程度上的形变（图 5b）。典型冷干事件发生过程中，40°N 以北亚洲中高纬地区盛行大型斜脊-斜槽的结构特征。高压脊位于乌拉尔山东部，高压脊东侧偏北气流不断引导冷空气南下并在东亚中纬度地区堆积，造成中高纬地区海平面气压显著加强（图 5c 和 e）。西伯利亚高压主体面积比其冬季平均情况明显偏大，南扩明显。而典型冷湿事件发生时，东半球中高纬地区呈现明显的两槽一脊的结构特征。高压脊位置偏东位于贝加尔湖附近，槽后脊前的海平面气压显著加强，位置较冬季平均情况向东南扩展更明显，强度变化比典型冷干事件更加明显（图 5d 和 f）。孟加拉湾地区北侧显著负位势高度距平中心表明，孟加拉湾南支槽偏强，其是典型冷湿事件期间向我国南方地区输送水汽的关键环流系统，西太平洋副高正异常位于我国东海至西太平洋附近，有利于西太平洋暖湿气流的输送。

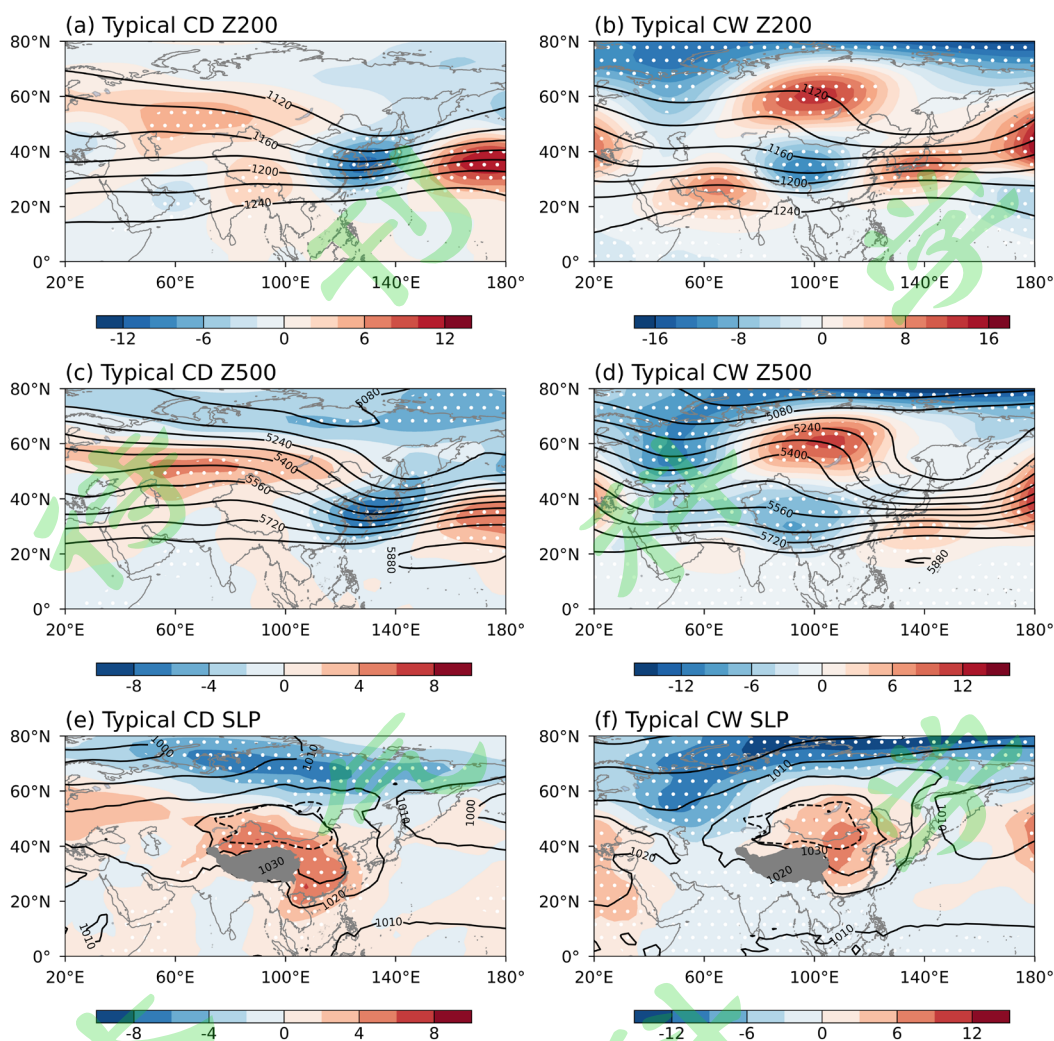


图 5 典型冷干事件（左列）和典型冷湿事件（右列）期间 200 hPa 位势高度场（第一行，等值线间隔：20 dagpm）、500 hPa 位势高度场（第二行，等值线间隔：8 dagpm）及其距平（阴影，单位：dagpm）、海平面气压场（第三行，等值线间隔：10 hPa）及其距平（阴影，单位：hPa）的合成分布。（e, f）中黑色虚线为 SLP 1030 hPa 等值线冬季平均。灰色阴影区域为青藏高原地区，白色打点区域通过了显著性水平为 0.1 的检验。

Fig.5 Composite distributions of 200 hPa geopotential height (top line, contour intervals: 20 dagpm); 500 hPa geopotential height (second line, contour intervals: 8 dagpm) and its anomalies (shaded, units: dagpm) and Sea Level Pressure (bottom line, contour intervals: 10 gpm) and its anomalies (shaded, units: hPa) during typical Cold-Dry events (left column) and Cold-Wet events (right column). The dash line in (e, f) represent 1030 hPa isobar for climatological winter mean. Gray shadings indicate the Tibetan Plateau region. White dotted areas passed the significance test at a 0.1 level.

为了分析两类典型复合极端低温事件发生时关键系统发展和影响情况，将典型事件发生当天作为第 0 天，分别合成了典型冷干（冷湿）事件发生第 0 天、前 2 天和前 5 天 250 hPa 位势高度相对于 1986~2015 年 12 月和 1 月（1 月和 2 月）平均的扰动场及 T-N 波作用通量（图 6）。可以发现冷干事件主要受北支波列影响，冷湿事件受南支、北支波列共同影响。典型冷干事件发生-5 天起，东半

球中高纬北支波列波作用通量较强，位势高度异常也更明显，说明典型冷干事件发生前位势高度异常信号向下游传播。因此 Rossby 波能量经西伯利亚上空并向东南方向传播，使得下游的东亚大槽加强（图 6a, c 和 e），而南支波列作用通量则经过中东上空影响印度地区，对我国南方地区影响较弱。典型冷湿事件发生前，亚欧大陆两槽一脊的背景形势下，西西伯利亚正高度异常向东南方向频散 Rossby 波能量影响我国（图 6b）。北支波列作用通量向东南传播，意味着槽系统的能量主要来自西北方向的高压脊，槽脊系统向东发展（图 6d）。大西洋阻塞高压也常成为冬季北半球 Rossby 波活动的源区（Kodera et al., 2013），南支波列在欧洲上空聚集的能量向东南传播，使得北印度洋上空高空脊维持，并使得中南半岛北部上空南支槽加强（图 6d 和 f），南支急流中 Rossby 波能量传播的下游效应有利于冷湿事件大气环流形势的形成。

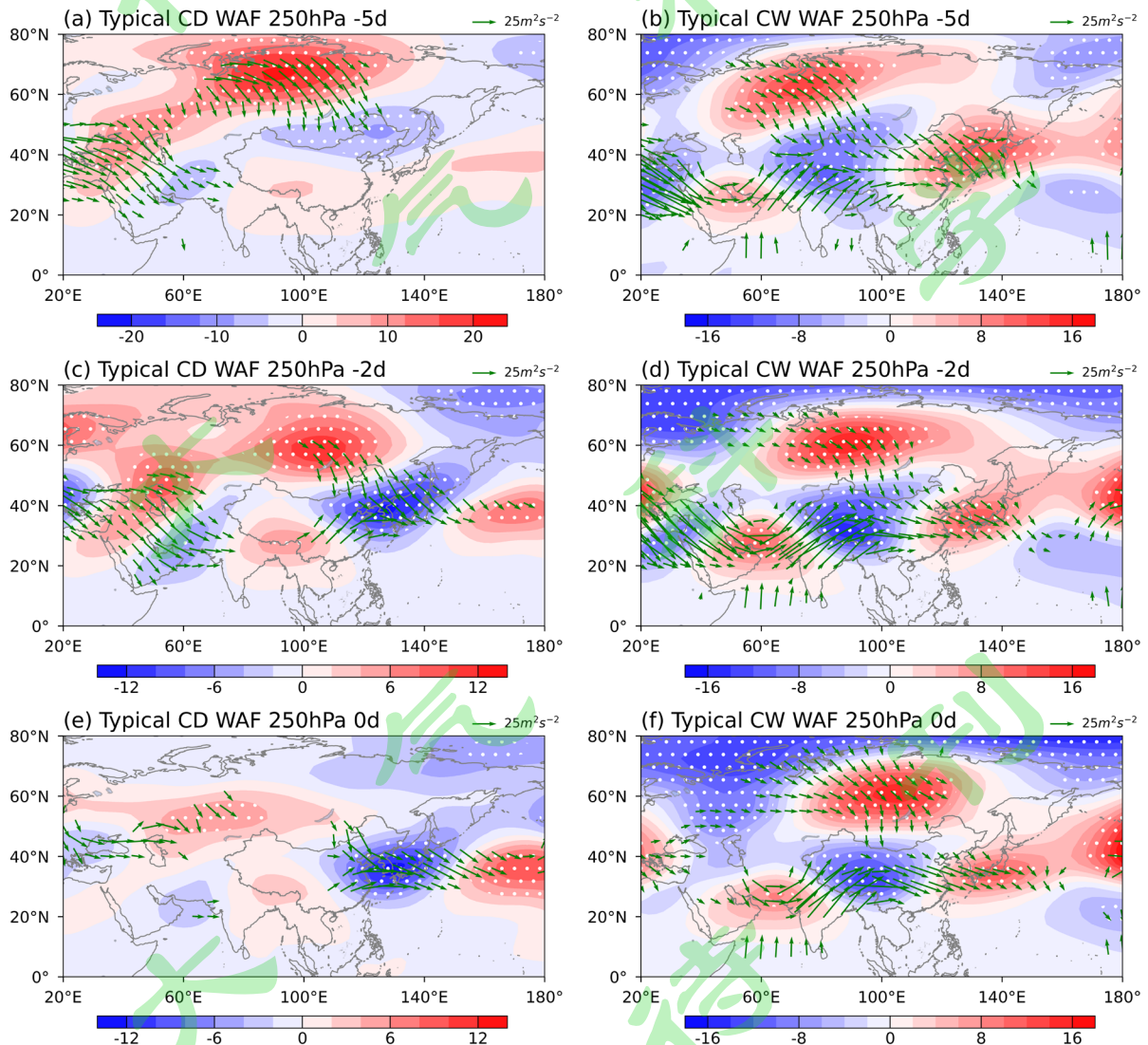


图 6 典型冷干事件（左列）发生（a）-5 天、（c）-2 天、（e）0 天 250 hPa 位势高度场相对于 1986~2015 年 12 月和 1 月平均的扰动场（阴影，单位：dagpm）和典型冷湿事件（右列）发生（b）-5 天、（d）-2 天、（f）0 天 250 hPa 位势高度场相对于 1986~2015 年 1 月和 2 月平均的扰动场（阴影，单位：dagpm）及 T-N 波作用通量（矢量，仅显示大于 $10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ ）的合成分布。白色打点区域通过了显

著性水平为 0.1 的检验。

Fig.6 The typical cold dry events (left column) occur at (a) -5 days, (c) -2 days, and (e) 0 days, with the 250 hPa potential height field relative to the 1986~2015 December and January average disturbance field (shading, units: dagpm). The typical cold wet events (right column) occur at (b) -5 days, (d) -2 days, and (f) 0 days, with the 250 hPa potential height field relative to the 1986~2015 January and February average disturbance field (shading, units: dagpm) and the composite distribution of T-N wave flux (vectors, only showing values greater than $10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$). White dotted area passed the significance test at a 0.1 level.

3.3 两类复合极端低温事件的水汽条件差异

两类复合事件发生期间不仅有低温，还需要具备一定的水汽条件。90%以上的水汽集中在 500 hPa 以下大气层中，低层比湿对降水的贡献十分重要(朱乾根等, 2007)。两类典型复合极端低温事件发生期间的垂直运动和水汽条件存在很大差别。在典型冷干事件发生过程中，中国南方大部分地区存在显著的下沉气流，对流层中低层比湿异常偏小(图 7a)，与之对应的 850 hPa 中国南方地区水汽通量散度基本为正值且存在明显正异常(图 7c)，中国南方地区水汽辐散有利于冷干事件的发生。典型冷湿事件发生过程中，20°N 以北的我国南方地区存在异常上升气流，对流层大部分高度表现为比湿的正异常分布(图 7b)，有利于降水的产生。孟加拉湾和南海至我国南方为强的西南水汽通量正距平，是典型冷湿事件发生时期主要的水汽来源，850 hPa 华南地区为大范围且强烈的水汽通量散度负异常(图 7d)，对应的水汽通量散度也为负值，表明该区域对应有显著的水汽辐合，为冷湿事件的发生提供水汽条件。

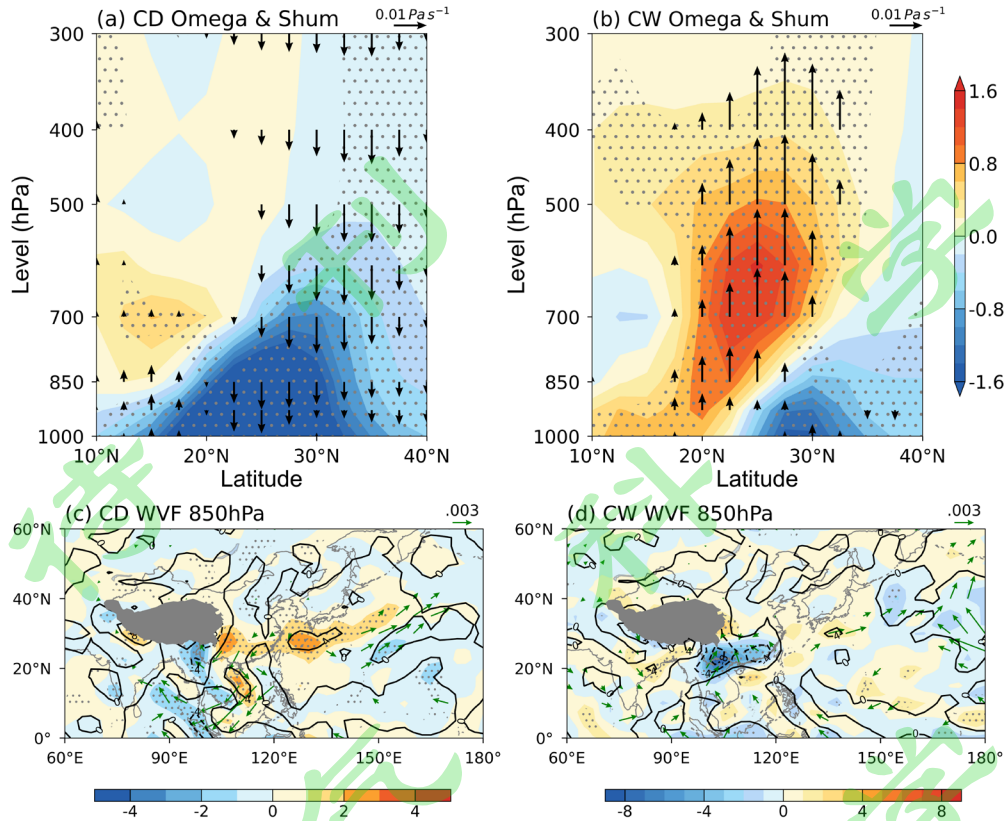


图 7 典型冷干事件（左列）和典型冷湿事件（右列）期间（a, b）垂直风（矢量，单位： Pa s^{-1} ）距平和比湿（阴影，单位： g kg^{-1} ）距平沿 $100^{\circ}\text{--}123^{\circ}\text{E}$ 平均经向垂直剖面合成分布、（c, d）850 hPa 水汽通量距平（矢量，单位： $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{hPa}^{-1}$ ）、水汽通量散度（等值线，单位： $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{hPa}^{-1}$ ）及其距平（阴影，单位： $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{hPa}^{-1}$ ）。（a, b）黑色箭头和灰色打点区域分别为垂直风距平和比湿距平通过了显著性水平为 0.1 的检验，（c, d）中绿箭头和打点区域分别为水汽通量距平和水汽通量散度距平通过了显著性水平为 0.1 的检验，灰色阴影区域为青藏高原地区。

Fig.7 Composite distributions of (a, b) $100\text{--}123^{\circ}\text{E}$ -averaged vertical wind anomaly (vector, units: Pa s^{-1}) and vertical specific humidity anomaly (shaded, units: g kg^{-1}), (c, d) mean water flux anomalies (vector, units: $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{hPa}^{-1}$), water flux (contours, units: $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{hPa}^{-1}$) and anomalies (shaded, units: $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{hPa}^{-1}$) at the 850 hPa level during typical Cold-Dry events (left column) and Cold-Wet events (right column). In (a, b), the black arrows and gray dotted areas indicate that the vertical wind and specific humidity anomalies passed the significance test at the 0.1 level. In (c, d), the green arrows and dotted areas indicate that the water vapor flux and water vapor flux divergence anomalies passed the significance test at the 0.1 level and the gray shadings indicate the Tibetan Plateau region..

4. 结论与讨论

本文利用了 1982~2022 年冬季我国南方地区逐日最低气温和相对湿度的 CN05.1 格点化观测数据集，以及 ERA5 再分析资料，首先分析了我国南方地区两类复合极端低温事件的时空分布特征，并筛选了典型复合低温事件进行对比分析，进一步探讨其可能成因，得到如下结论：

（1）我国冬季复合冷干事件在南方均有分布，主要集中于东部和江淮地区，主要呈增加的年代际趋势；冷湿事件呈现南多北少的分布型，大值区位于华南和西南地区，主要为减少趋势。两类典

型复合低温事件发生时间有明显的季节内差异,典型冷干事件主要发生于前冬季(12月至1月上旬),而典型冷湿事件主要发生于后冬季(1月下旬至2月)。

(2) 两类复合极端低温事件发生的大气环流背景差异明显:冷干事件主要受到西伯利亚冷高压和东北反气旋控制,关键环流系统的维持为北方冷空气南侵提供有利环流条件。冷湿事件主要受到西伯利亚高压、西北太平洋上空异常反气旋、印度-缅甸槽共同影响。经过西亚、西伯利亚、东亚的北支波列和经过西亚、中东、印度洋的南支波列共同为关键环流系统输送能量,这些大气环流异常是我国南方地区冷湿事件发生的关键。

(3) 两类复合极端低温事件发生时,我国南方水汽条件存在极大差别。冷干事件发生期间我国南方地区对流层中低层水汽显著负异常且伴随下沉运动,水汽通量散度正异常对应水汽辐散。冷湿事件发生时,华南地区水汽明显偏多且有明显的上升运动,水汽通量方向显示水汽来源主要为孟加拉湾和南海,水汽通量散度负值区对应显著负异常,为冷湿事件提供充足的水汽。

本文探讨了两类复合极端低温事件的时空分布特征及其可能成因。主要研究了两类事件发生时间的季节内差异,并分析了两类事件发生的有利条件包括大气环流配置和水汽供应。复合极端事件的影响机理非常复杂,温暖的北极和寒冷的热带太平洋的协同效应为北半球反常的经向半球尺度温度梯度提供了不可或缺的背景,从而加剧了极地冷空气向中高纬度地区的入侵(Zheng et al., 2021; Li et al., 2022)。冬季欧亚大陆积雪对同期和后期中国气候影响的相关研究说明与欧亚大陆积雪异常相关联的中国气候异常以及积雪通过改变土壤湿度、表面温度和辐射分布,引起大气环流异常,进而对中国气候产生影响的过程(Chen et al., 2003; Diro et al., 2014; 张人禾等, 2016)。因此未来的工作将尝试对复合极端低温事件的陆面因子影响及其动力学机理进行深入探讨。

参考文献 (References):

- Alexander L V, Zhang X B, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111 (D5): D05109.
- Bayley G V, Hammersley J M. 1946. The effective number of independent observations in an auto-correlated time series [J]. *J. Roy. Statist. Soc.*, 8(1B): 184-197.
- Bernstein, B. C. 2000. Regional and Local Influences on Freezing Drizzle, Freezing Rain, and Ice Pellet Events [J]. *Wea. Forecasting*, 15: 485-508.
- 布和朝鲁, 纪立人, 施宁. 2008. 2008 年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析 I: 亚非副热带急流低频波 [J]. *气候与环境研究*, 13(4): 419-433. Bueh Cholaw, Ji Liren, Shi Ning. 2008. On the Medium-Range Process of the Rainy, Snowy and Cold Weather of South China in Early 2008. Part I: Low Frequency Waves Embedded in the Asian African Subtropical Jet [J]. *Climatic and Environmental*

- Research (in Chinese), 13(4): 419-433.
- Cattiaux J, Vautard R, Cassou C, et al. 2010. Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate [J]. *Geophysical Research Letters*, 37(20).
- 陈海山, 刘蕾, 朱月佳. 2012. 中国冬季极端低温事件与天气尺度瞬变波的可能联系 [J]. 中国科学: 地球科学, 42 (12): 1951-1965. Chen Haishan, Liu Lei, Zhu Yuejia. 2012. Possible linkage between winter extreme low temperature events over China and synoptic-scale transient wave activity [J]. *Science China: Earth Sciences* (in Chinese), 42 (12): 1951-1965.
- Cholaw B, Xian Y F, Zuo W X. 2011. 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 Yihui, Wang Zunya, Song Yafang, 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.
- Diro G T, Sushama L, Martynov A, et al. 2014. Land-atmosphere coupling over North America in CRCM5 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(21): 11955–11972.
- 方建, 陶凯, 牟莎, 等. 2023. 复合极端事件及其危险性评估研究进展 [J]. 地理科学进展, 42(3): 587-601. Fang Jian, Tao Kai, Mu Sha, et al. 2023. Progress of research on compound extreme event and hazard assessment [J]. *Progress in Geography* (in Chinese), 42(3): 587-601
- Feng S, Wu X, Hao Z, et al. 2020. A database for characteristics and variations of global compound dry and hot events [J]. *Weather and Climate Extremes*, 30: 100299.
- Fischer, E., Knutti, R. 2016. Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models [J]. *Nature Clim Change*, 6: 986–991.
- 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 [J]. 气象, 34(4): 101-106. Gao Hui, Chen Lijuan, Jia Xiaolong, et al. 2008. Analysis of the Severe Cold Surge, Ice-snow and Frozen Disasters in South China During January 2008: II. Possible Climatic Causes [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 34(4): 101-106.
- Gao X, Zhu Q, Yang Z, et al. 2018. Temperature Dependence of Hourly, Daily, and Event-based Precipitation Extremes Over China [J]. *Sci. Rep.*, 8: 17564.
- Groisman P Y, Knight R W, Easterling D R, et al. 2005. Trends in Intense Precipitation in the Climate Record [J]. *J. Climate*, 18: 1326–1350.
- Hao Z, AghaKouchak A, Phillips T J. 2013. Changes in concurrent monthly precipitation and temperature extremes [J]. *Environ. Res. Lett*, 8: 3034014.
- He W, Chen H, Ma J. 2023. Variations in Summer Extreme Hot-Humid Events over Eastern China and the Possible Associated Mechanisms [J]. *J. Climate*, 36: 3801–3815.
- He Y, Wang Z, Wong H M, et al. 2023. Spatial-temporal changes of compound temperature-humidity extremes in humid subtropical high-density cities: An observational study in Hong Kong from 1961 to

- 2020 [J]. *Urban Climate*, 101669: 2212-0955.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730): 1999-2049.
- IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 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 Li Ren, Bueh Cholaw, Shi Ning, 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.
- Kharin V V, Zwiers F W, Zhang X et al. 2007. Changes in Temperature and Precipitation Extremes in the IPCC Ensemble of Global Coupled Model Simulations [J]. *J. Climate*, 20: 1419-1444.
- Kodera K, Mukougawa H, Fujii A. 2013. Influence of the vertical and zonal propagation of stratospheric planetary waves on tropospheric blockings [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118: 8333-8345.
- 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 [J]. *气候与环境研究*, 13(2): 113-122. LI Chong Yin, YANG Hui, GU Wei. 2008. Cause of Severe Weather with Cold Air, Freezing Rain and Snow over South China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 13(2): 113-122.
- Li H, Sun B, Wang H, et al. 2023. Characteristics and mechanisms of the severe compound cold-wet event in southern China during February 2022 [J]. *Environmental Research Letters*, 18: 114021.
- Li J, Wu W, Ye X, et al. 2019. Innovative trend analysis of main agriculture natural hazards in China during 1989-2014 [J]. *Natural Hazards*, 95: 677-720.
- Li J, Xie T, Tang X, et al. 2022. Influence of the NAO on Wintertime Surface Air Temperature over East Asia: Multidecadal Variability and Decadal Prediction [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 39: 625-642.
- Lorenz, Edward. 1956. Empirical Orthogonal Functions and Statistical Weather Prediction [R]. Science Report 1, Statistical Forecasting Project, Department of Meteorology, MIT (NTIS AD 110268), 49 PP.
- 刘雅星, 范广洲, 董一平, 等. 2010. 近 46 年中国冬季日均气温及极端温度的变化 [J]. *成都信息工程学院学报*, 25 (3): 286-292. Liu Yaxing, Fan Guangzhou, Dong Yiping et al. 2010. Variations of winter daily average temperature and extreme temperature in the recently 46 years in China [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese)*, 25 (3): 286-292.
- Mallick J, Salam R, Islam H M T, et al. 2022. Recent changes in temperature extremes in subtropical climate region and the role of large-scale atmospheric oscillation patterns [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 148(1): 329-347.
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling Errors in the Estimation of Empirical Orthogonal Functions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110: 699-706.
- Orlowsky B, Seneviratne S I. 2012. Global changes in extreme events: Regional and seasonal dimension [J]. *Climatic Change*, 110(3): 669-696.

- Park M, Johnson N C, Delworth T L. 2024. The driving of North American climate extremes by North Pacific stationary-transient wave interference [J]. *Nat Commun*, 15: 7318.
- 彭京备, 孙淑清. 2019. 2018 年 1 月南方雨雪天气的形成及其与冬季风异常的关系 [J]. *大气科学*, 43(6): 1233-1244. Peng Jingbei and Sun Shuqing. 2019. Formation of Rainy and Snowy Weather in South China in January 2018 and Its Relationship with the Abnormal East Asian Winter Monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 43(6): 1233-1244.
- Peng J B, Bueh C. 2012. Precursory Signals of Extensive and Persistent Extreme Cold Events in China [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 5(3): 252-257.
- Peng J B, Bueh C, Xie Z W. 2021. Extensive Cold-Precipitation-Freezing Events in Southern China and Their Circulation Characteristics [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38: 81-97.
- Peng T, Zhao L, Zhang L, et al. 2023. Changes in temperature-precipitation compound extreme events in China during the past 119 years [J]. *Earth and Space Science*. 10. e2022EA002777.
- Sarhadi A, Ausín M C, Wiper M P, et al. 2018. Multidimensional risk in a nonstationary climate: Joint probability of increasingly severe warm and dry conditions [J]. *Science Advances*, 4(11): eaau3487.
- 史军, 崔林丽, 顾宇丹, 等. 2023. 气候变化背景下复合极端事件研究进展 [J]. *地球科学进展*, 38(8): 771-779. Shi Jun, Cui Linli, Gu Yudan, et al. 2023. Advances in compound extreme events in the context of climate change [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 38(8): 771-779.
- 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 Ning, Bueh Cholaw, Ji Liren, 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.
- 施春华, 蔡雯映, 金鑫. 2016. 强厄尔尼诺事件下 2016 年 1 月中国南方超级寒潮的动力学机制: 瞬变波对大气长波异常的调制 [J]. *大气科学学报*, 39(6): 827-834. Shi Chunhua, Cai Wenyi and Jin Xin. 2016. Modulation by transient waves of atmospheric longwave anomalies: Dynamic mechanism of the super cold wave in South China in the extremely strong El Niño of 2015/2016 [J]. *Trans Atmos Sci* (in Chinese), 39(6): 827-834.
- 施春华, 金鑫, 刘仁强. 2017. 大气动力学中三种 Rossby 波作用通量的特征差异和适用性比较 [J]. *大气科学学报*, 40(6): 850-855. Shi Chunhua, Jin Xing and Liu Renqiang. 2017. The differences in characteristics and applicability among three types of Rossby wave activity flux in atmospheric dynamics [J]. *Trans Atmos Sci* (in Chinese), 40(6): 850-855.
- Shi J, Cui L, Ma Y, et al. 2018. Trends in temperature extremes and their association with circulation patterns in China during 1961-2015 [J]. *Atmospheric Research*, 212: 259-272.
- Sun B, Wang H, Li H, et al. 2022. A long-lasting precipitation deficit in South China during autumn-winter 2020/2021: Combined effect of ENSO and Arctic sea ice [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127: e2021JD035584.
- 索朗塔杰, 施宁, 王艺橙, 等. 2020. 我国冬季极端低温指数的年代际变化特征 [J]. *大气科学*, 44(5): 1125-1140. Suolang Tajie, Shi Ning, Wang Yicheng, et al. 2020. Interdecadal Variation Characteristics

- of Extreme Low Temperature Index in Winter in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 44(5): 1125–1140.
- Takaya K, Nakamura H. 2001: A Formulation of a Phase-Independent Wave-Activity Flux for Stationary and Migratory Quasigeostrophic Eddies on a Zonally Varying Basic Flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58: 608–627.
- Tebaldi C, Hayhoe K, Arblaster J, et al. 2006. Going to the extremes: An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events [J]. *Clim. Chang.*, 79: 233–234.
- 王凌, 高歌, 张强, 等. 2008. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 I. 气候特征与影响评估 [J]. *气象*, 34(4): 95–100. Wang Ling, Gao Ge, Zhang Qiang, et al. 2008. Analysis of the Severe Cold Surge, Ice-snow and Frozen Disasters in South China During January 2008: I. Climatic Features and Its Impact [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 34(4): 95–100.
- 王迪, 何金海, 祁莉, 等. 2015. 全球变暖减缓背景下欧亚秋冬温度变化特征和原因 [J]. *气象科学*, 35(5): 534–542. Wang Di, He Jinhai, Qi Li, et al. 2015. Temperature characteristics of Eurasia in autumn and winter and its causes under global warming mitigation [J]. *Journal of the Meteorological Sciences* (in Chinese), 35(5): 534–542.
- 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. *地球物理学报*, 56(04): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(04): 1102–1111.
- 余荣, 翟盘茂. 2021. 关于复合型极端事件的新认识和启示 [J]. *大气科学学报*, 44(5): 645–649. Yu Rong, Zhai Panmao. 2021. Advances in scientific understanding on compound extreme events [J]. *Trans Atmos Sci* (in Chinese), 44(5): 645–649.
- Yu R, Zhai P. 2020. Changes in compound drought and hot extreme events in summer over populated eastern China [J]. *Weather and Climate Extremes*, 30: 100295.
- Yu Y Y, Li Y F, Ren R C, et al. 2022. An Isentropic Mass Circulation View on the Extreme Cold Events in the 2020/21 Winter [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(4): 643–657.
- 张恒德, 高守亭, 刘毅. 2008. 极涡研究进展 [J]. *高原气象*, 27(2): 10. Zhang Hengde, Gao Shouting, Liu Yi. 2008. Advances of Research on Polar Vortex [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 27(2): 10.
- 张人禾, 张若楠, 左志燕. 2016. 中国冬季积雪特征及欧亚大陆积雪对中国气候影响 [J]. *应用气象学报*, 27(5): 513–526. Zhang Renhe, Zhang Ruonan, Zuo Zhiyan. 2016. An Overview of Wintertime Snow Cover Characteristics over China and the Impact of Eurasian Snow Cover on Chinese Climate [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 27(5): 513–526.
- Zheng F, Yuan Y, Ding Y, et al. 2021. The 2020/21 Extremely Cold Winter in China Influenced by the Synergistic Effect of La Niña and Warm Arctic [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 39: 546–552.
- 周晶, 孙燕, 齐雅静. 2024. 中国春季复合极端低温多雨事件的年代际变化及成因分析 [J]. *气候变化研究进展*, 20(1): 1–9. Zhou Jing, Sun Yan, Qi Yajing. 2024. Analysis on interdecadal variation and the causes of compound extreme cold and rainfall events in spring in China [J]. *Climate Change Research* (in Chinese), 20 (1): 1–9.
- Zhou B, Wen Q H, Xu Y, et al. 2014. Projected changes in temperature and precipitation extremes in china

- by the cmip5 multimodel ensembles [J]. *J. Clim.*, 27: 6591–6611.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文. 2007. 天气学原理和方法(第四版) [M]. 气象出版社. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2007. Principles and methods of weather science [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- Zong H F, Bueh C, Ji L R. 2014. Wintertime extreme precipitation event over southern China and its typical circulation features [J]. *Chinese Science Bulletin*, 59: 1036–1044.
- 宗海锋, 布和朝鲁, 彭京备, 等. 2022. 中国南方大范围持续性低温、雨雪和冰冻组合性灾害事件: 客观识别方法及关键特征 [J]. 大气科学, 46(5): 1055–1070. Zong Haifeng, Bueh Cholaw, Peng Jingbei, et al. 2022. Combined Disaster Events of Extensive and Persistent Low Temperatures, Rain/Snow, and Freezing in Southern China: Objective Identification and Key Features [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 46(5): 1055–1070.
- Zscheischler J, Seneviratne S I. 2017. Dependence of drivers affects risks associated with compound events [J]. *Science Advances*, 3(6): e1700263.