Vol. 49 No. 9 September 2023

晏红明,孔祥吉,字俣丞,等,2023. 云南 2022 年 2 月 19—24 日的极端冷事件分析[J]. 气象,49(9):1029-1044. Yan H M,Kong X J,Zi Y C,et al,2023. Analysis of extreme cold event in 19—24 February 2022 in Yunnan Province[J]. Meteor Mon,49(9): 1029-1044(in Chinese).

云南 2022 年 2 月 19—24 日的极端冷事件分析*

晏红明1 孔祥吉2 字俣丞3 舒康宁

- 1云南省气候中心,昆明650034
- 2 国家林业和草原局林草调查规划院,北京 100013
- 3 中国科学技术大学地球和空间科学学院,合肥 230026
- 4 云南省气象台,昆明 650034

提 要: 2022 年 2 月 19—24 日受强冷空气影响,云南全省发生了一次极端冷事件,该事件降温强度大、影响范围广、持续时间长。利用云南 124 个站气象观测资料、NCEP/NCAR 和 ERA5 大气环流再分析资料,分析了此次冷事件的极端性特征及其过程期间高低层大气环流异常的演变特征。结果表明:此次冷事件的极端性较强,是云南省近 10 年第二强的区域性寒潮天气过程,全省有 69 个站达到中等以上强度寒潮标准,有 10 个站日平均气温达到或突破 2 月最低纪录。过程期间雨雪天气突出,过程累计降水接近 2 月常年,单日降雪范围为近 20 年以来最大。影响此次冷事件的因子极其复杂,冷空气活动与乌拉尔山高压脊、东亚槽、亚洲高空西风急流、西伯利亚高压等大气环流系统的加强演变密切联系,并与起源于北大西洋地区的副热带异常波列的东传有关,该异常波列对于青藏高原地区波能量的向南频散和冷空气的南下有十分重要的引导作用,并对南支槽前的西南水汽输送加强有一定影响;同时,热带地区的对流活动也对东亚地区冷空气的加强南下有一定影响。过程期间,冷空气沿东北路径南下影响云南,云南区域冷暖空气的交汇作用十分显著,导致过程期间出现明显低温雨雪。

关键词:极端冷事件,乌拉尔山高压,西伯利亚高压,亚洲高空西风急流,冷空气路径,波能量频散

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j. issn. 1000-0526. 2023. 050602

Analysis of Extreme Cold Event in 19-24 February 2022 in Yunnan Province

YAN Hongming¹ KONG Xiangji² ZI Yucheng³ SHU Kangning⁴

- 1 Yunnan Climate Center, Kunming 650034
- 2 Forestry and Grassland Investigation and Planning Institute of the State Forestry and Grassland Administration, Beijing 100013
- 3 School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026
- 4 Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034

Abstract: Affected by the strong cold air in 19—24 February 2022, an extreme cold event occurred in Yunnan, which was characterized by sharp drop in temperature, affecting large areas and lasting a long time. In this paper, the extreme characteristics of the cold event and the evolution characteristics of the upper and lower atmospheric circulation during the process are analyzed by using the data of 124 meteorological observation stations in Yunnan, the reanalysis data of NCEP/NCAR and ERA5 atmospheric circulation. The results show that this cold event was very extreme, and was the second strongest cold wave weather event in Yunnan in recent ten years. The cold air intensity at 69 stations reached the cold wave standard, of which the daily average temperature at 10 stations reached or broke the lowest temperature record in February. During the cold event, the rainy and snowy weather was prominent, the accumulated precipitation

^{*} 国家自然科学基金重点项目(U1902209)资助

²⁰²²年12月12日收稿; 2023年6月4日收修定稿

in the process was close to the climatological precipitation in February, and the scope of a single day snowfall was the largest in recent 20 years. The factors that affected the strong cold event were extremely complex. The cold air activity was closely related to the strengthening and evolution of the atmosphere circulation system in mid-high latitudes, such as the Ural high ridge, the East Asia trough, the Asian upper-air west-erly jet, the Siberian high, and was also associated with the eastward propagation of the subtropical abnormal Rossby wave train which was originated from the North Atlantic Region. This abnormal Rossby wave train played an important role in guiding the southward dispersion of wave energy and the southward movement of cold air in the Tibetan Plateau, and had a certain impact on the strengthening of southwest water vapor transport in front of the south branch trough. Meanwhile, the convective activities in the tropics also had a certain impact on the strengthening of cold air in East Asia. During the cold event, the cold air flew southward along the northeast path, influencing Yunnan. The intersection of cold and warm air in Yunnan was very prominent, resulting in significant cooling, rain and snow during the cold event.

Key words: extreme cold event, Ural high, Siberian high, upper-air westerly jet in Asia, cold air path, wave energy dispersion

引言

2022年2月19—24日,中国发生了一次大范围的寒潮天气过程,该过程降温强度大、影响范围广、持续时间长,强冷空气一直向南推进到中南半岛北部。云南大部分地区出现了强降温和雨雪天气,有69个站达到中等以上寒潮标准,是云南近10年第二强的寒潮天气过程,单日降雪范围为近20年以来最大,给云南社会经济发展和人民生活带来了巨大损失。据不完全统计,仅本次极端冷事件就造成云南约23.7万人受灾,直接经济损失达5亿元,其中农业经济损失逾18亿元。

在全球变暖背景下,极端冷事件对生态环境和社会经济发展的影响日趋严重(艾雅雯等,2020)。云南位于低纬高原地区,由于青藏高原大地形的阻挡,很少受到强冷空气的影响,尤其是西部和西南部地区。因此,云南境内的通讯、交通等设施以及多种热带经济作物等对极端冷事件的防御能力非常弱,一旦遭遇强冷空气的影响,造成的损失就十分严重。但一直以来云南气象工作关注的重点主要集中在雨季开始期、春季和夏季旱涝等方面(陈艳等,2021;苏锦兰等,2021),对冬季气候异常的研究还比较少(姚愚和晏红明,2018),对极端冷事件的研究就更少(王学锋,2020)。目前的大部分工作集中在对冬季云南寒潮的时空特征分析,海云莎等(2011)分析了1961—2008年冬季云南的寒潮过程,发现云南寒潮频次东多西少,其中1月寒潮发生频率最高,2月和

12 月次之,并指出云南寒潮的发生与 500 hPa 东亚槽加强和西太平洋副热带高压(以下简称副高)偏弱有关;罗燕等(2015)以极端低温阈值小于一10℃分析了近 50 年云南极端低温分布情况,发现低温区主要出现在迪庆州北部。也有部分工作针对强寒潮过程进行分析,晏红明等(2009)、杨素雨等(2012)、闵颖等(2013)和史悦等(2017)分别对 2008 年、2011年、2016 年三次云南强寒潮天气过程的分析表明云南强寒潮过程与西伯利亚高压、东亚槽、副高等高低纬度大气环流异常,以及赤道中东太平洋地区的冷海温异常密切联系。研究成果为云南短期气候预测提供了科学依据,但对引起云南极端冷事件发生的更深层原因,以及影响云南的冷空气与影响中国东部的冷空气在移动路径和强度变化上的差异等方面的认识还十分有限。

影响极端冷事件发生的因子非常复杂,尤其在全球变暖背景下,北极增暖导致的暖北极、冷欧亚,改变了热力经向梯度和海洋热源环流的变化(Francis and Vavrus,2012;Cohen et al,2014;2020;Luo et al,2016)。另外,海冰融化、全球海温异常等外强迫因子的影响(Gong and Luo,2017;Shi and Qian,2018;Lü et al,2019;徐士琦等,2022),使得极端冷事件的发生更加复杂多变,并存在显著的区域差异(陈文等,2018;韩荣青等,2021;马锋敏等,2022;支蓉和郑志海,2022;Sung et al,2021)。因此,开展全球变暖背景下不同区域极端冷事件演变规律和形成机理的研究,对于提高低温雨雪冰冻灾害天气气候事件的预报预测能力非常重要。尽管全球暖变化使

得极端天气气候事件频发多发,但暖背景下的极端冷事件发生频数并不多,尤其在中国西南地区发生的极端冷事件就更加偏少,极端冷事件的样本量非常有限。2022年2月19—24日发生在云南的全省性极端冷事件,为我们开展暖背景下的中国低纬高原地区的极端低温事件的研究提供了很好的契机。深入分析此次冷事件的极端性特征及其影响的关键大气环流因子,对认识暖背景下中国西南低纬高原地区极端冷事件的成因机理,寻找暖背景下低纬高原地区极端冷事件的关键预测因子具有重要的科学意义。

本文利用云南站点观测资料和高分辨率的大气 环流再分析资料,对 2022 年 2 月 19—24 日云南发 生的寒潮天气过程的极端性特征及其影响的关键大 气环流因子演变等进行全面系统的分析。

1 资料和方法

本文使用的资料主要有:(1)1961—2022 年冬季(12月至次年2月)云南 124个站逐日的平均气温、最高气温和最低气温观测资料;(2)美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的 1981—2022 年 2 月逐日不同等压面上的高度场、风场、温度场等再分析大气环流资料,水平分辨率为 2.5°×2.5°(Kistler et al,2001);(3)欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的第五代大气再分析全球逐日不同等压面上的风场、高度场、温度场等大气环流资料,水平分辨率为 1.0°×1.0°(Hersbach et al,2020),用于计算后向轨迹追踪冷空气路径。文中气候常年值为 1981—2010 年的平均值,云南省地图边界审图号为 S(2019)033 号。

本文分析利用了波通量(Plumb,1985; Takaya and Nakamura,2001)、后向轨迹追踪(Draxler and Hess,1998)、 $30\sim60$ d 低通滤波(魏凤英,2007)等方法。后向轨迹追踪方法(HYSPLIT-4 模式)是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的空气资源实验室和澳大利亚气象局联合研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模式(Draxler and Hess,1998)。该模式是具有处理多种气象要素输入场、多种物理过程和不同类型污染物排放源功能较为完整的输送、扩散和沉降模式,已经被广泛应用于多种污染物的传输和扩散研究。轨迹计算方法是假定质点轨迹随着风场而运动,在 t 时刻的初始位置是 P(t),相应速度为 V(P,t),则质点

在 $t+\Delta t$ 时刻的模拟位置 $P(t+\Delta t)$ 由式(1)、式(2) 计算得到。式(1)得到了质点的第一假想位置 $P'(t+\Delta t)$,式(2)通过初始位置和第一假想位置线性插值的 平均速度得到了质点的最终模拟位置 $P(t+\Delta t)$ 。具体计算公式如下:

$$P'(t + \Delta t) = P(t) + V(P, t) \Delta t$$

$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0.5 [V(P, t) + V(P', t + \Delta t)] \Delta t$$
(2)

为了能够更好地分析冷事件过程中冷空气输送路径和源地的变化,利用 HYSPLIT 模式进行向后15 d 的冷空气追踪。追踪的起始时刻为冷空气影响云南全省的2月21日12时,由于此次冷事件过程的影响范围较大,同时冷空气在不同高度上的输送情况不尽相同,因此共选取云南冷空气影响区域的22个格点(图1),并对各格点的4个垂直高度层进行后向追踪。由于 HYSPLIT 模式本身能够将等压面的数据通过内坐标转换和内部插值得到等高面的数据,4个垂直方向的高度层分别位于100、500、1000、3000 m。

2 冷事件过程的极端性特征

2月19—24日的极端冷事件过程降温强度大、 影响范围广、持续时间长,为了全面了解此次冷空气 过程的极端性特征,首先从东亚范围来分析该次过 程的低温情况,再重点针对云南区域进行分析。

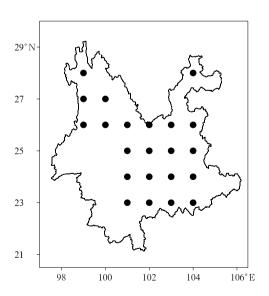


图 1 云南冷空气后向轨迹追踪的格点分布 Fig. 1 Grid distribution of the backward trajectory track of Yunnan cold air

2.1 东亚地区的冷事件特征

用东亚区域($20^{\circ}\sim50^{\circ}$ N、 $100^{\circ}\sim120^{\circ}$ E)平均的地面气温来表征东亚地区气温的变化。2021/2022年冬季东亚地区表现为前冬暖、后冬冷的气候特点,后冬(1 月 27 日至 2 月 25 日)气温持续偏低,其中2 月19-24 日寒潮过程是冬季最强的一次低温事件(图 2a)。从过程期间温度距平的空间分布来看,冷空气影响范围较大,东亚地区出现明显降温,强冷空气一直向南推进,影响中南半岛。18-19 日冷空气影响整个东亚大陆(图 2b),强降温中心位于东亚北部地区;20 日以后向南推进影响中南半岛地区,中南半岛全区域气温偏低,超过 -8° C的负距平中心位于华南一中南半岛北部,明显大于东亚北部地区的降温(图 2c)。

2.2 云南冷事件的极端性特征

受强冷空气的影响,云南也出现了极端冷事件。图 3a 为 2021/2022 年冬季云南全省 124 个站平均的逐日平均气温、最高气温、最低气温变化,可以看到自 2022 年 1 月下旬至 2 月底,受频繁活动的冷空气影响,云南气温变化波动较大,三次比较明显的冷空气过程分别出现在 2022 年 1 月 17—19 日、1 月

30 日至 2 月 3 日、2 月 19—22 日。其中 2 月 19—24 日的冷空气过程最显著,气温出现明显下降,22 日的平均气温和最高气温下降至最低值,分别比常年同期偏低 8.1 \mathbb{C} 和 12.8 \mathbb{C} ,最低气温在 23 日降到最低,比常年同期偏低 4.9 \mathbb{C} 。19—24 日平均的最低气温、最高气温和平均气温分别为12.8 \mathbb{C} 、3.7 \mathbb{C} 和 7.2 \mathbb{C} ,分别比常年同期偏低 7.8 \mathbb{C} 、3.0 \mathbb{C} 和5.0 \mathbb{C} 。

图 $3b\sim 3d$ 分别为 2 月 19-24 日期间平均气温、最高气温和最低气温的最大变温幅度的空间分布,可以看到过程期间云南中部和东部地区的气温下降最显著,平均气温普遍下降 $9\sim 15$ \mathbb{C} (图 3b),最高气温下降 $15\sim 21$ \mathbb{C} (图 3c),最低气温下降 $6\sim 12$ \mathbb{C} (图 3d)。云南西部也出现了明显降温,尤其是西南部地区,其降温幅度与中部地区接近。

此次冷空气过程影响范围广、降温幅度大,过程期间有 27 个站日平均气温低于或等于 0℃,个旧、宜良、建水等 10 个站达到或突破 2 月日平均气温最低纪录(图 4a)。冷空气由东向西推进:2 月 19 日冷空气开始影响云南东部(图 4b);20 日向西推进影响云南中部和西北部(图 4c);21—24 日冷空气进一步向西推进到云南西部和西南部地区,全省为气温负距平(图 4d~4g);25 日气温逐渐回升,过程基本结束,但云南大部分地区仍为气温负距平(图4h)。此

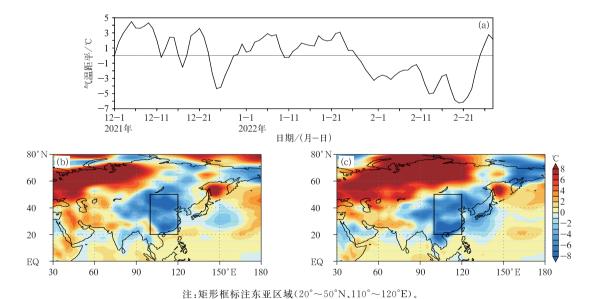


图 2 (a)2021/2022 年冬季东亚地区(20°~50°N、110°~120°E)逐日气温距平变化, (b,c)2022 年 2 月(b)18—19 日和(c)20—22 日气温距平分布

Fig. 1 (a) Daily variation of anomalous surface air temperature (SAT) in East Asia (20°-50°N, 110°-120°E) in winter of 2021/2022; (b, c) distribution of SAT anomalies in (b) 18-19 and (c) 20-22 February 2022

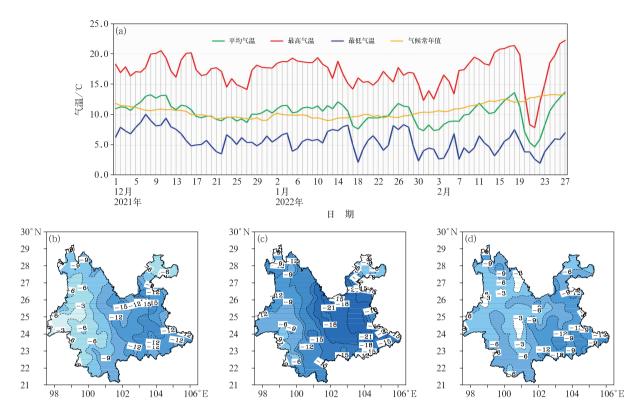


图 3 (a)2021/2022 年冬季云南逐日平均气温、最高气温、最低气温以及常年同期日平均气温变化,(b~d)2022 年 2 月 19—24 日期间的(b)平均气温、(c)最高气温和(d)最低气温的最大变温幅度分布(填色和等值线,单位:℃)

Fig. 3 (a) Daily variation of average temperature, maximum temperature, minimum temperature in winter of 2021/2022 and climatological daily mean temperature in Yunnan;

(b−d) distributions of the 24 h maximum temperature change range of (b) mean temperature, (c) maximum temperature and (d) minimum temperature (colored and isoline, unit: °C) in 19−24 February 2022

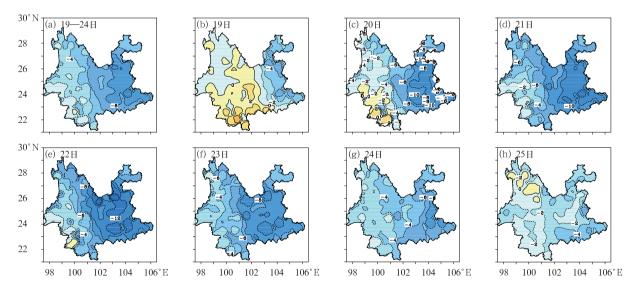


图 4 2022 年 2 月(a)19—24 日平均的气温距平和(b~h)19—25 日逐日的平均气温距平分布(填色和等值线,单位:℃) Fig. 4 (a) Distribution of average temperature anomaly in 19—24 February 2022 and

(b−h) the daily distribution of daily average temperature anomaly in 19−25 February 2022 (colored and isoline, unit: °C)

次冷事件的极端性特征显著,19-24 日全省有 69 个站达到寒潮标准,主要分布在云南中部、东部和西南部地区(图 5a)。过程期间,有 60 个站日最高气温低于 5°C,其中有 23 个站达到或突破 2 月日最高气温最低值记录(图 5b);有 56 个站最低气温低于或等于 0°C,其中有 19 个站低于 -2°C,个旧站突破 2 月日最低气温纪录(图略)。此次冷空气过程是云南省近 10 年来第二强寒潮天气过程,仅次于 2016 年 1 月 22—26 日发生在云南的极端冷事件。

2.3 极端冷事件期间的降水特征

过程期间,除低温天气突出,2月19—22日云南大部地区相伴出现了明显降水,全省平均的累计降水为16.7 mm,接近2月常年降水(17.7 mm),其中22日全省平均降水为10.3 mm,是2021/2022年冬季第二大降水日(图 6a);降水主要集中在云南中西部和东南部地区,大理、楚雄和红河大部分地区的过程累计降水大于25 mm,红河部分地区甚至超过50 mm(图 6b),与常年同期相比,除西北部和西南部的9个站降水距平百分率偏低4%~34%,其余大部分地区降水偏多超过3倍,其中在昆明、楚雄、玉溪、大理、红河等地的30个站降水偏多10~85倍(楚雄元谋)(图 6c)。过程期间全省有10个站日降水达到大雨量级,元谋、牟定、姚安、南华4个站日降水突破2月日降水极大值。2月22日全省有65个站出现降

雪,单日降雪范围为近20年以来最大;昭通南部、曲靖、昆明北部出现中到大雪、局部暴雪或大暴雪天气,过程累计积雪深度达6~20 cm(会泽)(图略)。

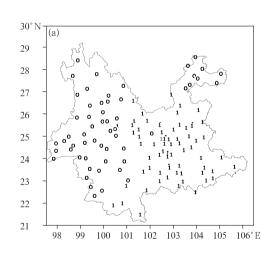
3 中高纬度环流演变和冷空气活动

东亚冬季风活动是影响云南冬季极端冷事件发生的直接因素,而亚洲副热带高空西风急流、欧亚中高纬度阻塞高压、高原高度场变化、东亚大槽、西伯利亚高压等是东亚季风的主要成员,其异常变化反映了高低层东亚冬季风活动的异常。下面围绕以上东亚冬季风系统关键成员的演变特征来分析 2022年2月19—24日极端冷事件的形成过程。

冷空气从 2 月 19 日开始影响云南东部,影响的 关键时段主要集中在 2 月 20—23 日。由于云南特殊的地理位置,影响云南的冷空气很难快速移出,大部分情况下冷空气会一直滞留在云南区域,直至变性减弱,24 日就属于滞留冷空气造成的强低温天气。因此以 2 月 20—23 日为冷空气影响的关键时段,记为同期"0"时段,分析该时段超前 1~5 d(2 月 15—19 日)和滞后 1~2 d(2 月 24—25 日)逐日的大气环流演变特征。

3.1 西伯利亚高压

从2月15-25日海平面气压(SLP)场及其距平



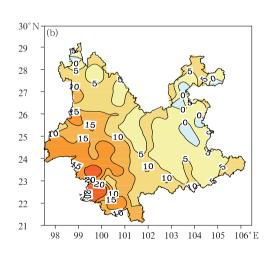
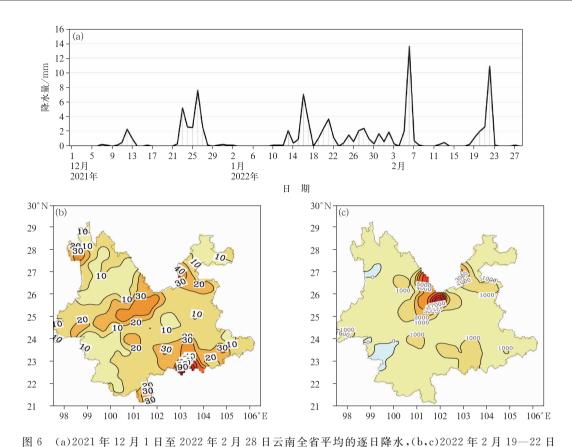


图 5 2022 年 2 月 19—24 日(a)出现寒潮的站点("1":有寒潮,"0":无寒潮)和 (b)日最高气温最低值分布(填色和等值线,单位:℃)

Fig. 5 (a) The stations with strong cold wave ("1": cold wave, "0": no cold wave) and (b) distribution of minimum value of daily maximum temperature (colored and isoline, unit: °C) in 19-24 February 2022



(b)累计降水(填色和等值线,单位:mm)和(c)降水距平百分率(填色和等值线,单位:%)分布 Fig. 6 (a) Variation of daily precipitation in Yunnan from 1 December 2021 to 28 February 2022, (b, c) distribution of (b) accumulated precipitation (colored and isoline, unit, mm) and (c) percentage

(b, c) distribution of (b) accumulated precipitation (colored and isoline, unit; mm) and (c) percentage of precipitation anomaly (colored and isoline, unit; %) in 19-22 February 2022

场(图 7)可以看到西伯利亚高压(40°~60°N、70°~120°E)(Lü et al,2019)的演变过程。15 日西伯利亚为 SLP 负距平,显著的 SLP 高压中心和正距平位于里海附近;16 日里海附近的 SLP 正 1050 hPa的高压中心位于蒙古,云南为 SLP 负距平区;19 日西伯利亚高压向南扩展至 20°N 附近,但正距平中心仍位于蒙古国,高压前部等压线密集,云南东北部为等压线密集的 SLP 正距平区;20—23 日西伯利亚高压主体明显南压,云南中东部为 SLP 正距平,在云南东部至贵州有一个 SLP 正距平中心;24—25 日SLP 正距平中心南压至华南沿海,强度明显减弱,标志着冷空气过程结束。从 SLP 场的演变来看,此次冷空气过程与西伯利亚高压的发展、加强和南压密切联系,而西伯利亚高压的加强与里海附近高压的发展东移有关。

3.2 500 hPa 大气环流演变

500 hPa 高度场演变(图 8)表明此次冷空气过

程与乌拉尔山高压(50°~70°N、40°~80°E)(Luo et al,2016; Gong and Luo,2017; Tyrlis et al,2019) 的发展东移和东亚槽的发展加强密切联系。15日 欧亚中高纬度总体为一脊一槽,乌拉尔山以西的地 区为脊区,西伯利亚一东亚为宽广的低压槽区 (图 8a);16—18 日乌拉尔山以西的正高度距平东 移,乌拉尔山高压脊明显加强(图 8b,8d);19 日高压 脊主体继续东移至乌拉尔山东部地区,东亚东部至 青藏高原为负高度距平,有利于东亚槽加强 (图 8e);20—23 日乌拉尔山高压脊东移至贝加尔湖 附近,东亚地区位势高度北高南低的形势明显,有利 于冷空气加强南压(图 8f);24—25 日,东亚槽减弱 东移,青藏高原至我国大部分地区转为正距平,云南 也转为明显的正距平区,表明冷空气活动减弱 (图 8g,8h)。从 500 hPa 高度场还可以看到副高的 变化,在强冷空气影响云南的前期(15-17日)副高 较弱,位置明显偏东(图 8a~8c);18─19 日副高加 强西伸,西脊点位置与多年气候平均西脊点位置基

本一致(图 8d,8e);20—23 日强冷空气南下影响的主要时段副高再次减弱东退,有利于冷空气向南活动(图 8f);24—25 日副高又再次加强西伸,并与西亚的副热带高压合并,热带印度洋至西太平洋地区的高度场升高,东亚北高南低的形势减弱消失(图 8g,8h)。

另外,从 500 hPa 高度的环流演变也可以看到 无论在过程前期的 15—18 日,还是在过程期间的 19—23 日,北印度洋大部分地区均为负高度距平 (图 8a~8f)。但过程前期负高度距平中心位于印度 半岛,表明南支槽位置偏西;19—23 日南支槽东移, 负距平中心东移至孟加拉湾北部地区,表明过程期间孟加拉湾南支槽加强。24日之后北印度洋转为正高度距平,南支槽明显减弱。

3.3 高空西风急流

高层西风急流与低层冷空气活动密切联系 (Yang et al,2002;况雪源等,2008)。此次冷空气过程的发展演变过程中 200 hPa 亚洲强西风急流中心表现出明显东移的特征,从青藏高原东移至西北太平洋地区。15 日 70 m • s⁻¹的西风急流中心以及较强的正距平中心位于青藏高原(图 9a);16—18 日逐

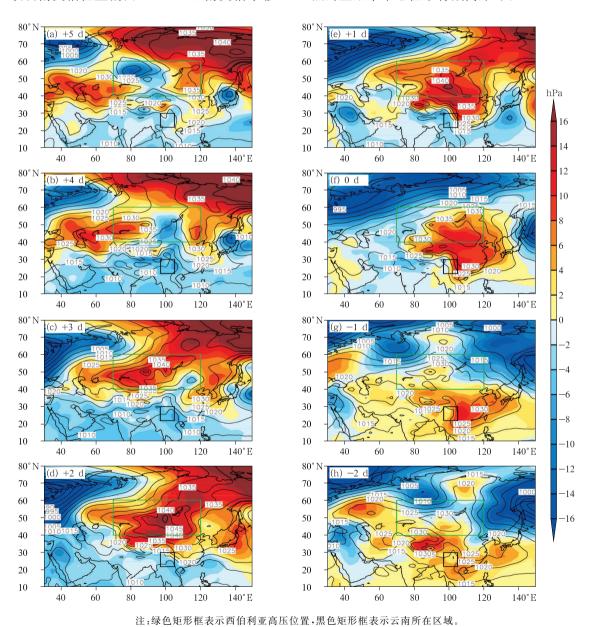
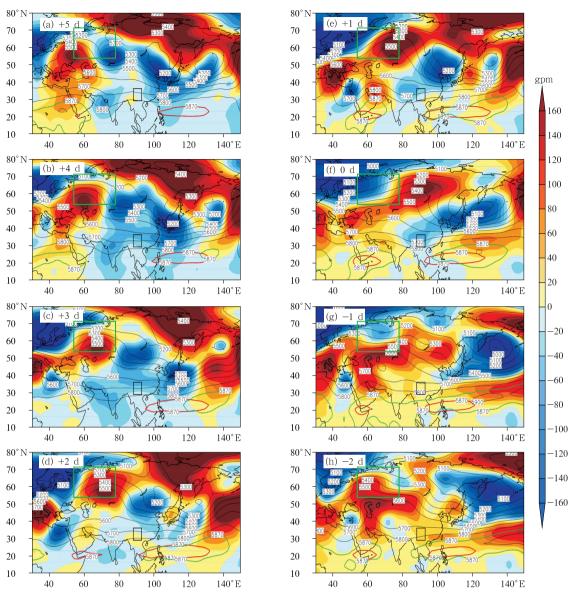


图 7 2022 年 2 月 15—25 日 SLP 场(等值线,单位:hPa)及其距平场(填色)逐日演变

Fig. 7 Daily evolution of SLP (isoline, unit: hPa) and its anomaly (colored) in 15-25 February 2022



注:绿色矩形框表示乌拉尔山高压位置,黑色矩形框表示云南所在的区域, 红色实线为多年气候平均副高位置,绿色虚线为副高的实时位置。

图 8 2022 年 2 月 15—25 日 500 hPa 高度场(等值线,单位:gpm)及其距平场(填色)逐日演变 Fig. 8 Daily evolution of 500 hPa geopotential height (isoline, unit: gpm) and its anomaly (colored) in 15—25 February 2022

新发展东移(图 9b~9d);19 日西风急流中心东移至华北,中心风速加强至 90 m·s⁻¹(图 9e);20—23 日强冷空气南下影响云南时西风急流中心继续东移至日本海(图 9f);24—25 日东移至西北太平洋上空,冷空气过程结束(图 9g,9h)。高层西风急流中心的变化表明此次冷空气过程与西风急流中心从青藏高原东移至西北太平洋上空的变化有关。目前的一些研究表明,东亚地区的高空急流与低层西伯利亚高压和阿留申低压的加强密切联系。当东亚西

风急流强度偏强时,在急流入口区左侧,由于气流辐合,造成低层气压上升;在出口区左侧,则由于气流发生强烈辐散,造成低层气压下降。低层气压变化分别对应西伯利亚高压和北太平洋阿留申低压的加强。同时由于海陆气压差加大,导致东亚大槽和东亚冬季风加强(Yang et al,2002;况雪源等,2008)。因此,在此次极端冷事件过程中,低层西伯利亚高压的加强南压以及东亚冬季风的加强,可能与高层亚洲副热带西风急流的加强东移有十分密切的联系。

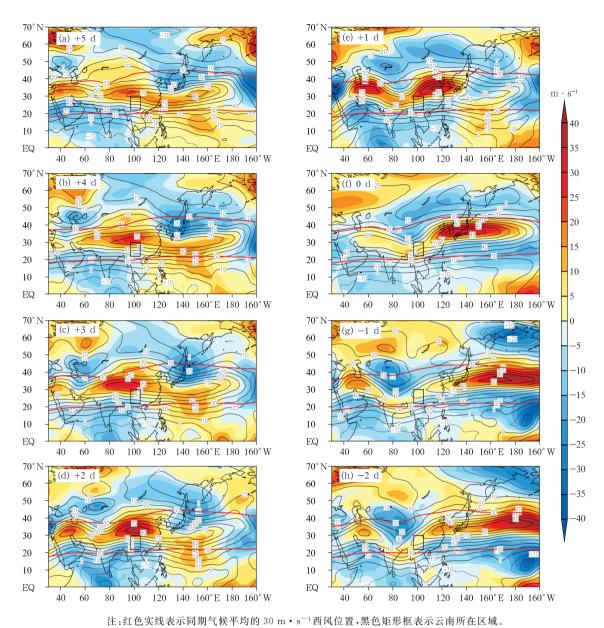


图 9 2022 年 2 月 15—25 日 200 hPa 纬向风(等值线,单位:m·s⁻¹)及其距平场(填色)逐日演变

Fig. 9 Daily evolution of 200 hPa zonal wind (isoline, unit: m·s⁻¹) and its anomaly (colored) in 15-25 February 2022

3.4 Rossby 波列活动

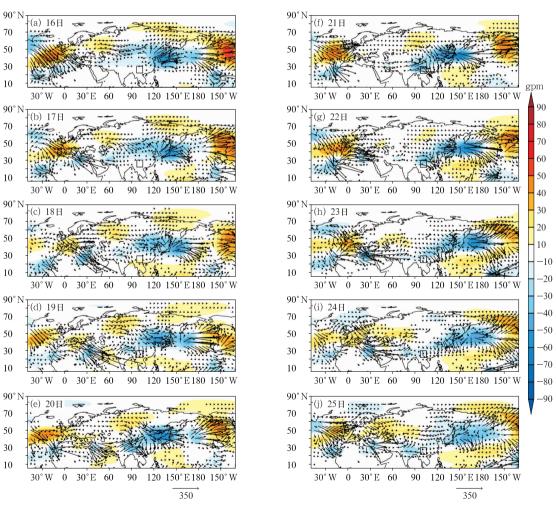
为了进一步认识 Rossby 波活动在此次极端冷事件中的作用,参考 Takaya and Nakamura(2001)和 Plumb(1985)的方法计算了过程前后 300 hPa 的波通量(图 10)。可见,2 月 16 日分别在北大西洋副热带地区和乌拉尔山西部存在的两个高度正异常中心,对应着冷空气过程的两支波列,其中:北支波列显著,表现为欧亚中高纬度至东亚为"十一"高度异常,乌拉尔山西部为高度正异常,青藏高原至东亚为

高度负异常,波能量从正高度异常区向负高度异常区频散;南支波列表现为能量从北大西洋副热带的正高度异常区向非洲西北部的负高度异常区频散,波列结构特征不显著(图 10a)。17—18 日北支波列的乌拉尔山正高度异常中心东移至西西伯利亚,向下游青藏高原至东亚负高度异常区的能量频散也逐渐加强,有利于青藏高原至东亚东部的冷空气堆积,对应此时西伯利亚高压的增强(图 7c,7d);同样,南支波列中北大西洋副热带正高度异常中心和非洲西北部的负高度异常中心也逐渐东移,"十一"异常波

列结构特征逐渐清晰(图 10b,10c)。19 日北支波列的青藏高原东部负高度异常区的能量出现向南频散的分量,表明有冷空气向南活动影响西南地区,对应低层西伯利亚高压中心南压(图 7e);起源于北大西洋副热带地区,经非洲和阿拉伯海,到青藏高原的"十一十一"的南支波列结构变得非常显著,阿拉伯海正高度异常区有能量向青藏高原地区频散,加强了青藏高原地区的负高度异常(图 10d)。20 日受北支波列和南支波列的共同影响,青藏高原地区的负高度异常和高原东部向南的能量频散均明显加强(图 10e),对应低层西伯利亚高压的明显南压(图 7f)。21—22 日,南支波列明显减弱,非洲至青藏高原的波列基本消失,而贝加尔湖地区和伊朗高

原仍然有能量向中国东部和南部地区频散。值得注意的是,尽管南支波列中伊朗高原至青藏高原的波列减弱,但在北大西洋中低纬度地区又出现新的波列,该波列中有波能量从中纬度的正高度异常区域向低纬度的负高度异常区频散(图 10f,10g)。23—25日,贝加尔湖以北地区的正高度异常减弱,能量频散也明显减弱,而北大西洋中纬度地区经非洲北部、伊朗高原、青藏高原的波列结构和能量频散却再次加强(图 10h~10j),由于云南受到来自印度半岛北部向东和青藏高原东部向南的能量频散的影响,尽管此时冷空气已逐渐减弱,但云南大部地区 25日仍然出现大范围的负高度距平区域(图 4h)。

以上分析表明,南北两支波列的共同作用对青



注:黑色矩形框表示云南所在区域。

图 10 2022 年 2 月 16—25 日 300 hPa 波通量(箭矢,单位:m²·s⁻²)和 高度距平(填色)逐日演变

Fig. 10 The daily evolution of wave flux (vector, unit: $m^2 \cdot s^{-2}$) and height anomaly (colored) at 300 hPa in 16-25 February 2022

藏高原至东亚地区负高度异常的加强和云南极端冷事件的发生有十分重要的影响,尤其是 19 日南支波列的影响对于北支波列波能量在青藏高原东部地区的向南频散和冷空气南下有十分重要的引导作用,同时,南支波列活动有利于孟加拉湾地区南支槽加强,相应加强了西南水汽输送。下文进一步分析此次冷事件过程中热带环流系统和暖湿气流的变化特征。

3.5 冷空气活动路径

云南位于青藏高原向东延伸部份,受地形阻挡,影响云南的冷空气路径与影响中国东部地区的冷空气路径明显不同。在云南,东北路径最多(占冷空气路径总数的 63 %),其次是偏东路径(占 28 %),西北路径最少(仅占 9 %)(秦剑等,1997)。冷空气路径主要看低层冷空气的移动,通过 HYSPLIT 方法追踪 2 月 21 日后向 15 d 的冷空气路径(图 11),发现此次过程的冷空气主要沿东北路径进入云南。由于云南所处的地理位置和自身地形条件,当冷空气

南下影响时,低层的冷高压由北向南移动,云南受高 压前部的偏东北或偏东气流影响,冷空气由东北或 偏东路径进入云南。由图 11a 看到,低层 100 m 高 度层的大部分冷空气从中国东北进入,经华北、华东 向西南推进,从贵州进入云南,另外,可以看到由于 四川盆地海拔降低,有少量冷空气从四川东部沿东 北路径南下影响云南东北部。但在 500 m 以上高 度,冷空气的移动路径与低层相比明显不同,除了东 北路径的冷空气,还有来自青藏高原南侧的偏西气 流,越到高层,从青藏高原进入云南的西风气流越 强,3000 m 高度云南主要受到青藏高原南部西风气 流的影响(图 11b~11d)。从气流的起源和移动路 径看到,影响云南的气流主要是来自欧亚中高纬度 的北支波列和北大西洋副热带地区的南支波列,在 青藏高原合并后,向东南经青藏高原南部,从云南 西边界进入(图 11d)。同时,可以看到在 1000 m 高度有来自孟加拉湾的气流,表明在该高度上云南 受到来自孟加拉湾地区水汽输送的影响最明显 (图 11c)。

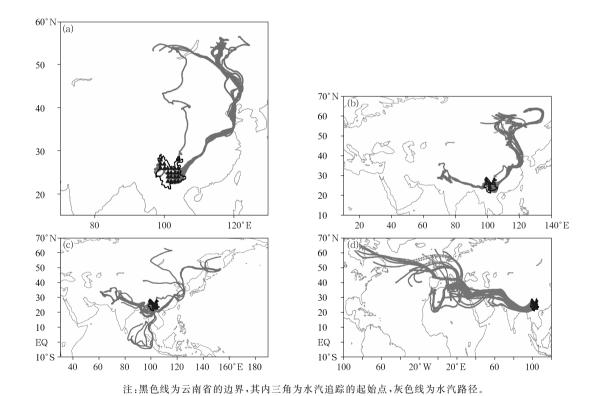


图 11 2022 年 2 月 21 日不同高度后向 15 d 的冷空气路径轨迹追踪 (a)100 m,(b)500 m,(c)1000 m,(d)3000 m

Fig. 11 The 15 d cold air path tracked by backward trajectory model at different altitudes on 21 February 2022

(a) 100 m, (b) 500 m, (c) 1000 m, (d) 3000 m

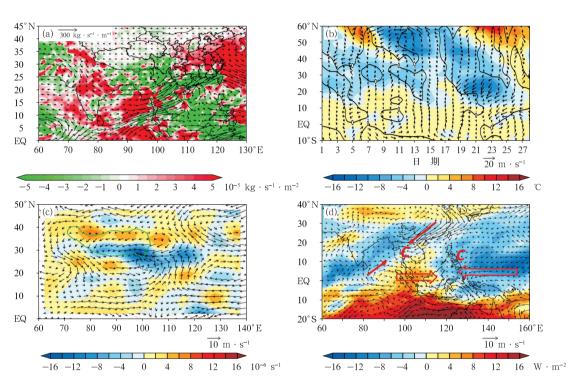
4 热带环流系统和水汽输送异常

此次极端冷事件不仅出现强降温,还伴随明显的强雨雪天气。因此,除了来自中高纬度地区的冷空气影响,热带地区的环流异常及水汽输送也是十分重要的。

过程期间,2月19—22日云南全省出现降水,23—24日无降水,最大降水出现在22日(图 6a)。图 12a为19—22日平均的整层水汽输送通量异常和水汽输送散度,可以看到该时段云南受到来自孟

加拉湾西南水汽输送的影响,全省大部分地区出现水汽辐合,水汽条件较好。过程期间西南气流和东北气流在云南区域交汇非常显著,随着偏北气流的加强,冷暖空气交界面逐渐南压至 10°N 附近,云南区域出现明显降温(图 12b)。19—22 日 700 hPa 在云南区域也出现明显的辐合,偏东和偏南气流的交汇非常显著,表明冷空气在影响华南之后,由东向西推进影响云南的过程(图 12c)。在气象业务上一般称这种低层由东向西推进的冷空气为"回流"天气,这是冷空气影响云南的重要特征。

副热带地区的环流变化可能与热带对流活动有



注:图 c中,绿色线为青藏高原 700 hPa 高度的轮廓线;图 d中,红色实心箭头表示冷空气和 异常西南风,红色空心箭头表示异常西风和东风。

图 12 2022 年 2 月 19—22 日平均的(a)整层水汽通量异常(箭矢)和水汽输送辐合辐散异常(填色),(c)700 hPa 散度(填色)和距平风场(风矢),(d)30~60 d 低频向外长波辐射异常(填色)和低频 850 hPa 风场异常(风矢),以及(b)2 月逐日沿 100°~110°E 平均的 850 hPa 距平风场(风矢)和温度距平(填色)的纬度-时间剖面

Fig. 12 (a) Water vapor flux anomaly (vector) and water vapor transport convergence and divergence anomaly (colored),

(c) 700 hPa divergence (colored) and anomalous wind field (wind vector),

(d) averaged 30-60 d low-frequency outward long-wave radiation anomaly (colored) and low-frequency 850 hPa wind field anomaly (wind vector) in 19-22 February, and (b) latitude-time profile of daily mean wind anomaly (wind vector) and temperature anomaly (colored) along 100°-110°E at 850 hPa in February 2022

关,当热带地区的对流活动从印度洋东移至西太平 洋时,会引起副高和南支槽的异常变化,进而引起我 国降水异常(吴俊杰等, 2009; Jia et al, 2011)。 图 12d 为 2 月 19-22 日异常的 30~60 d 低频向外 长波辐射(OLR)和低频 850 hPa 矢量风,看到极端 冷事件发生时较强的对流活动中心分别位于赤道中 印度洋至孟加拉湾北部和热带西太平洋地区。热带 西太平洋对流活动中心西侧的西风和东侧的东风在 菲律宾群岛南部辐合,南海南部至菲律宾群岛北部 为气旋性环流,该气旋型环流西北侧的偏东北气流 加强。另外,也可以看到从华南至中南半岛北部偏 东北气流的加强在一定程度上也可能受到赤道中印 度洋至孟加拉湾北部强对流活动的影响,该区域的 强对流活动有利于低层气流的辐合上升,进而加强 从华南至中南半岛北部的偏东北气流。因此,极端 冷事件期间东亚冬季风的加强南压与热带地区的对 流活动是密切联系的。

5 结论和讨论

通过分析,得到以下几点结论:

(1)2022 年 2 月 19—24 日云南寒潮过程的强降温主要发生在 20—23 日,冷空气从东北路径进入影响云南,低温持续时间长并伴有强降水,是云南近10 年第二强的区域性寒潮天气过程,全省有 69 个站达到中等以上强度的寒潮标准,有 10 个站日平均气温达到或突破 2 月最低值纪录,23 个站日最高气温达到或突破 2 月最低值纪录。

(2)此次冷空气过程与乌拉尔山高压脊、东亚槽、亚洲高空西风急流、西伯利亚高压等中高纬度环流系统的加强密切联系。过程期间伴随高层乌拉尔山高压脊加强东移,低层西伯利亚高压加强南压、东亚槽加深,在东亚形成显著的北高南低形势,非常有利于冷空气向南活动。过程期间亚洲高空西风急流中心从青藏高原逐渐东移,强度显著加强,当高空急流东移至日本附近时,冷空气过程结束,因此,极端冷事件的发生、发展和结束时间与亚洲高空西风急流中心由西向东的移动过程密切联系。

(3)该次强冷空气过程中,起源于北大西洋副热带地区的异常波列东传,对于青藏高原至东亚东部地区负位势高度异常的加强,以及青藏高原东部地区波能量的向南频散和冷空气的南下有十分重要的引导作用,并对南支槽前西南水汽输送的加强有一

定影响。

(4)过程期间,除了强降温,还伴随明显的降水 天气,影响降水的水汽主要来源孟加拉湾地区,热带 低频对流活动对于东亚东部冷空气的加强南压有一 定影响,西南气流和东北气流在云南区域交汇作用 使得过程期间出现明显的低温雨雪。

很多研究表明乌拉尔山高压脊和西伯利亚高压 是影响冷空气活动最直接的大气环流系统(Luo et al,2016; Yan et al,2022)。本文分析发现亚洲高 空西风急流中心由青藏高原向日本海加强东移的过程,实际上对应着此次冷空气过程中西伯利亚高压 的加强南压,以及冷空气过程的开始和结束。因此 有关亚洲高空急流活动影响云南冷事件发生发展的 过程和机理还需要开展进一步研究。

另外,本文分析还发现起源于北大西洋副热带地区的波列东传对云南极端冷事件的影响也是值得进一步关注的问题。Song and Wu(2017)的研究以40°N为界将中国东部划分为南部和北部两个区域,对比分析了冷空气仅影响北部,以及同时影响北部和南部地区的两种过程,发现副热带地区的环流存在显著差异:当冷空气同时影响南部和北部时,副热带地区没有异常波列出现;相反,当冷空气仅影响北部地区时,副热带地区存在起源北大西洋"十一十一十"的异常 Rossby 波列,该异常波列的东传刚好在青藏高原至华南形成一个高压环流,阻挡了冷空气的南下,导致中国南部偏暖。该结论与本文的分析存在明显不一致,因此,有关副热带 Rossby 波列东传对中国南部气候的影响还需要对更多极端冷事件个例的分析来验证。

参考文献

艾雅雯,孙建奇,韩双泽,等,2020.1961—2016 年中国春季极端低温事件的时空特征分析[J]. 大气科学,44(6):1305-1319. Ai Y W, Sun J Q, Han S Z, et al,2020. Spatial and temporal features of spring extreme low temperature events in China during 1961—2016[J]. Chin J Atmos Sci,44(6):1305-1319(in Chinese).

陈文,丁硕毅,冯娟,等,2018. 不同类型 ENSO 对东亚季风的影响和 机理研究进展[J]. 大气科学,42(3):640-655. Chen W, Ding S Y, Feng J, et al,2018. Progress in the study of impacts of different types of ENSO on the East Asian monsoon and their mechanisms[J]. Chin J Atmos Sci,42(3):640-655(in Chinese).

陈艳,张万诚,陶云,等,2021. 低频振荡对 2015 年春季云南东部降水 异常的影响[J]. 气象,47(7):805-816. Chen Y, Zhang W C, Tao Y, et al, 2021. Influence of low-frequency oscillation on abnormal precipitation over eastern Yunnan Province in spring 2015

- [J]. Meteor Mon, 47(7): 805-816.
- 海云莎,田永丽,陈新梅,2011. 云南寒潮时空特征及变化分析[J]. 云南大学学报(自然科学版),33(S1):147-152,156. Hai Y S, Tian Y L, Chen X M,2011. Analysis on spatial distribution and temporal variation of cold wave in Yunnan[J]. J Yunnan Univ,33 (S1):147-152,156(in Chinese).
- 韩荣青,石柳,袁媛,2021. 2020/2021 年冬季中国气候冷暖转折成因分析[J]. 气象,47(7):880-892. Han R Q, Shi L, Yuan Y,2021. Analysis on the causes of cold and warm transition in China during the winter of 2020/2021[J]. Meteor Mon,47(7):880-892(in Chinese).
- 况雪源,张耀存,刘健,2008. 对流层上层副热带西风急流与东亚冬季风的关系[J]. 高原气象,27(4):701-712. Kuang X Y, Zhang Y C, Liu J, 2008. Relationship between subtropical upper-tropospheric westerly jet and East Asian winter monsoon[J]. Plateau Meteor,27(4):701-712(in Chinese).
- 罗燕,田永丽,戴敏,等,2015. 云南近 50 年极端气温及降水事件变化特征与区域气候变暖的关系[J]. 云南大学学报(自然科学版),37(6):870-877. Luo Y, Tian Y L, Dai M, et al, 2015. Extreme temperature and precipitation events change features over Yunnan in recent 50 years and their relation with regional climate change[J]. J Yunnan Univ,37(6):870-877(in Chinese).
- 马锋敏,陈丽娟,李想,等,2022. 中国冬季气温不同年代际的季节内变化特征及成因分析[J]. 大气科学,46(3):573-589. Ma F M, Chen L J, Li X, et al,2022. Characteristics and causes of intraseasonal variation of winter temperature in China under different interdecadal scale[J]. Chin J Atmos Sci,46(3):573-589 (in Chinese).
- 闵颖,李华宏,朱莉,等,2013.2011年3月云南一次寒潮天气过程分析[J]. 成都信息工程学院学报,28(1):34-42. Min Y,Li H H, Zhu L,et al,2013. Analysis of a cold wave weather process in Yunnan in March 2011[J]. J Chengdu Univ Inform Technol,28 (1):34-42(in Chinese).
- 秦剑,琚建华,解明恩,1997. 低纬高原天气气候[M]. 北京:气象出版社. Qin J, Ju J H, Xie M E,1997. Weather and Climate over Low Latitude Plateau[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 史悦,郑建萌,张万诚,等,2017.2016 年 1 月云南低温雨雪灾害的原因分析[J].灾害学,32(4):208-213. Shi Y,Zheng J M,Zhang W C,et al,2017. Analysis on the causes of low temperature and snow disaster in Yunnan in January 2016[J]. J Catastrophol,32 (4):208-213(in Chinese).
- 苏锦兰,张万诚,宋金梅,等,2021. 云南小时降水的时空分布变化研究[J]. 气象,47(2):133-142. Su J L, Zhang W C, Song J M, et al,2021. Study on spatio-temporal distribution of hourly precipitation in Yunnan Province[J]. Meteor Mon,47(2):133-142 (in Chinese).
- 王学锋,2020. 云南省气候业务技术手册[M]. 北京:气象出版社. Wang X F,2020. Yunnan Climate Operational Technical Manual [M]. Beijing; China Meteorological Press(in Chinese).
- 魏凤英,2007. 现代气候统计诊断与预测技术:第2版[M]. 北京:气

- 象出版社. Wei F Y,2007. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 吴俊杰,袁卓建,钱钰坤,等,2009. 热带季节内振荡对 2008 年初南方 持续性冰冻雨雪天气的影响[J]. 热带气象学报,25(S1):103-111. Wu J J, Yuan Z J, Qian Y K, et al, 2009. The role of intraseasonal oscillation in the southern-China snowstroms during January 2008[J]. J Trop Meteor, 25(S1):103-111(in Chinese).
- 徐士琦,刘刚,杨雪艳,等,2022. 中国东北地区春季透雨早晚与 2—3 月热带印度洋海温异常的联系[J]. 大气科学,46(4):873-885. Xu S Q, Liu G, Yang X Y, et al, 2022. Relationship between February—March tropical Indian Ocean sea surface temperature anomaly and onset date of spring soaking rain in Northeast China [J]. Chin J Atmos Sci,46(4):873-885(in Chinese).
- 晏红明,王灵,朱勇,等,2009.2008 年初云南低温雨雪冰冻天气的气候成因分析[J].高原气象,28(4):870-879. Yan H M,Wang L, Zhu Y, et al,2009. Cause analyses of severe cold and snowy weather formation in Yunnan in early 2008[J]. Plateau Meteor, 28(4):870-879(in Chinese).
- 杨素雨,李华宏,严华生,等,2012.2011 年初云南东部极端低温冰冻灾害天气气候特征及成因分析[J]. 成都信息工程学院学报,27 (1):71-76. Yang S Y,Li H H,Yan H S,et al,2012. Feature of weather and climate and cause analysis of extreme cold and freezing weather in East Yunnan in early 2011[J]. J Chengdu Univ Inform Technol,27(1):71-76(in Chinese).
- 姚愚,晏红明,2018. 云南 1 月降水异常的气候成因分析[J]. 气象,44 (12):1583-1592. Yao Y, Yan H M,2018. Analysis on climatic causes of precipitation anomaly in Yunnan in January[J]. Meteor Mon,44(12):1583-1592(in Chinese).
- 支蓉,郑志海,2022.2021/2022 年冬季中国气候异常特征及南方降水异常偏多成因分析[J]. 气象,48(7):925-935. Zhi R,Zheng Z H,2022. Characteristics of climate anomalies over China in winter 2021/2022 and causes for precipitation anomalies over southern China[J]. Meteor Mon,48(7):925-935(in Chinese).
- Cohen J. Screen J A. Furtado J C., et al., 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather [J]. Nat Geosci, 7(9): 627-637.
- Cohen J. Zhang X., Francis J., et al., 2020. Divergent consensuses on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather[J]. Nat Climate Change, 10(1):20-29.
- Draxler R R, Hess G D, 1998. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition [J]. Aust Meteor Mag, 47:295-308.
- Francis J A, Vavrus S J, 2012. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes[J]. Geophys Res Lett, 39 (6); L06801.
- Gong T T, Luo D H, 2017. Ural blocking as an amplifier of the Arctic sea ice decline in winter[J]. J Climate, 30(7): 2639-2654.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 146(730):1999-2049.
- Jia X L, Chen L J, Ren F M, et al, 2011. Impacts of the MJO on

- winter rainfall and circulation in China[J]. Adv Atmos Sci, 28 (3):521-533.
- Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al, 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation [J]. Bull Amer Meteor Soc, 82(2): 247-268.
- Luo D H, Xiao Y Q, Yao Y, et al, 2016. Impact of Ural blocking on winter warm Arctic-cold Eurasian anomalies. Part I: blocking-induced amplification[J]. J Climate, 29(11): 3925-3947.
- Lü Z Z, He S P, Li F, et al, 2019. Impacts of the autumn Arctic sea ice on the intraseasonal reversal of the winter Siberian high[J]. Adv Atmos Sci, 36(2):173-188.
- Plumb R A,1985. On the three-dimensional propagation of stationary waves[J]. J Atmos Sci,42(3):217-229.
- Shi J, Qian W H, 2018. Asymmetry of two types of ENSO in the transition between the East Asian winter monsoon and the ensuing summer monsoon[J]. Climate Dyn, 51(9): 3907-3926.
- Song L, Wu R G, 2017. Processes for occurrence of strong cold events over Eastern China[J]. J Climate, 30(22):9247-9266.

- Sung M K, Son S W, Yoo C, et al, 2021. Seesawing of winter temperature extremes between East Asia and North America[J]. J Climate, 34(11): 4423-4434.
- 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(6): 608-627.
- Tyrlis E, Manzini E, Bader J, et al, 2019. Ural blocking driving extreme Arctic sea ice loss, cold Eurasia, and stratospheric vortex weakening in autumn and early winter 2016-2017[J]. J Geophys Res: Atmos, 124(21):11313-11329.
- Yan H M, Yuan Y, Tan G R, et al, 2022. Possible impact of sudden stratospheric warming on the intraseasonal reversal of the temperature over East Asia in winter 2020/21[J]. Atmos Res, 268: 106016.
- Yang S, Lau K M, Kim K M, 2002. Variations of the East Asian jet stream and Asian-Pacific-American winter climate anomalies [J]. J Climate, 15(3):306-325.

(本文责编:戴洋 王蕾)