晏红明, 尹俊智, 金燕, 等.2024.冬季亚洲两种大气环流型对云南低温事件的影响[J].暴雨灾害,43(3):560-571. YAN Hongming, YIN Junzhi, JIN Yan, et al. 2024. The impact of two atmospheric circulation patterns in Asia on low-temperature events in Yunnan province during winter [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):560-571 (in Chinese). doi: 10.12406/byzh.2023-243

冬季亚洲两种大气环流型对云南低温事件的影响

晏红明[1], 尹俊智[2], 金燕[1], 马思源[1], 段丽华[3]
(1. 云南省气候中心, 昆明 650034; 2.云南省瑞丽市气象局, 瑞丽 678600; 3.云南省德宏州气象局, 芒市 678400)

摘　要: 利用1961—2022年云南125个国家气象站冬季逐日平均气温观测资料、NCAR/NCEP大气环流再分析资料, 分析了冬季亚洲环流变化的主要类型及其对云南低温事件的影响, 发现冬季亚洲500 hPa大气环流存在纬向型和经向型两种环流类型, 并对云南低温事件产生明显不同的影响。纬向型环流时, 冷空气从贝加尔湖直接南下, 主要影响东亚东部, 云南低温事件也主要发生在东部地区, 此时的低温过程与乌拉尔山高压和西伯利亚高压加强、欧亚中高纬度波列的活动密切联系; 而经向型时, 冷空气伴随贝加尔湖地区的异常反气旋东侧偏北气流沿着东亚大陆东部沿岸南下, 并在中低纬度地区以回流的形式向东南推进, 活动位置偏南偏西, 使得云南全省、青藏高原和东南亚低纬度地区气温偏低, 此时的低温过程主要与副热带波列的活动和青藏高原海平面气压(Surface level Pressure, SLP)的正距平加强有关, 与乌拉尔山和西伯利亚地区的高压加强关系不密切。

关键词: 亚洲大气环流型; 云南低温事件; 乌拉尔山高压; 西伯利亚高压; 大气异常波列
中图法分类号: P423.3+6　　**文献标志码**: A　　**DOI**: 10.12406/byzh.2023-243

The impact of two atmospheric circulation patterns in Asia on low-temperature events in Yunnan province during winter

YAN Hongming[1], YUN Junzhi[2], Jinyan[1], MA Siyuan[1], DUAN Lihua[3]

(1. *Yunnan Provincial climate center, Kunming* 650034; 2. *Ruili Meteorological bureau of Yunnan Province, Ruili* 678600; 3. *Dehong meteorological bureau of Yunnan province*, *Mangshi* 678400)

Abstract: Using the daily average temperature data of 125 national meteorological observation stations and NCAR/NCEP reanalysis data from 1961 to 2022, the main patterns of Asian circulation changes in winter and their impact on low-temperature events in Yunnan province were analyzed. The results show that there are two patterns of atmospheric circulation at 500 hPa in Asia during winter, namely zonal and meridional patterns, and the impact of the two patterns on low-temperature events in Yunnan province is significantly different. During the zonal circulation pattern, the stronger cold air flows directly southward from Lake Baikal to low latitudes, mainly affecting the eastern part of East Asia. The low-temperature events in Yunnan province also mainly occur in the eastern region. At this time, the low-temperature process is closely related to the strengthening of the Ural Mountains High and the Siberian High, as well as the wave trains at mid-to-high latitudes in Eurasia. During the meridional circulation pattern, the cold air flows southward along the eastern coast of the East Asian continent with the northerly airflow of the eastern side of the anomalous anticyclone in Lake Baikal, and moves southeast in the form of backflow in mid-to-low latitude areas. The activity is located southward and westward, which is beneficial for the low temperature of Yunnan province, the Tibet Plateau, and low latitude areas in Southeast Asia. At this time, the low-temperature events are mainly related to the changes in the subtropical wave train and the strengthening of positive surface level pressure (SLP) anomalies on the Tibet Plateau, but not closely related to the strengthening of High pressure in the Ural Mountain and the Siberian.

Key words: atmospheric circulation patterns in Asia; low-temperature event in Yunnan province; Ural high; Siberian high; anomalous atmospheric wave train

引 言

冬季低温冷害是主要的气象灾害之一, 对工农业生产和人民生活影响极大。在全球变暖背景下, 极端低温事件对生态环境和社会经济的影响日趋严重(IPCC, 2021)。云南位于低纬高原地区, 受青藏高原大

收稿日期: 2023-11-15; **定稿日期**: 2024-03-25
资助项目: 国家自然科学重点基金项目(U1902209); 云南省自然科学重点基金项目(202201AS070069)
第一作者: 晏红明, 主要从事季风气候研究和短期气候预测。E-mail:yanhongming2013@163.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

地形的阻挡，很少受到强冷空气的影响，尤其是云南西部地区。因此，云南境内的通讯、交通等设施以及热带经济作物对极端低温冷害的抵御能力非常弱，一旦遭受强冷空气影响，就会造成十分严重的损失。近年来，云南频繁遭受强冷空影响，例如，2008年1月下旬—3月上旬、2011年1月17—18日、2016年1月24—26日、2021年1月11—12日、2022年2月19—20日发生的强寒潮过程，给云南社会经济发展造成了重大损失(晏红明等，2009；韩荣青等，2021；万云霞等，2023；刘红武等，2020；朱蕾等，2020)。因此，深入开展云南冬季低温事件的时空特征及形成原因的研究，对于提高云南冬季低温事件的预报预测水平，做好防灾减灾工作具有十分重要的科学意义。

中国冬季冷暖与东亚冬季风活动密切联系，东亚强冬季风偏北气流带来的冷空气使中国大部分地区产生低温雨雪冰冻灾害天气，因此与冷空气活动相关的中高纬度环流变化一直以来受到广泛关注。但由于东亚冬季风活动以及相关联高低层大气环流的变化差异，冷空气强度和影响范围也明显不同，秦明月和李双林(2020)比较分析了2008年1月4—28日和2018年1月13日—2月4日中国发生的强寒潮过程，表明两次事件相应的中高纬度500 hPa大气环流呈现明显不同的特征，前者表现经向型特征，后者表现为纬向型特征，所引起的中国气温变化也存在较大的区域差异。中国地域辽阔，冷空气强度、活动位置的变化差异对中国冬季气候的影响不同，Song 和 Wu(2017)对比分析了冷空气仅影响东亚40°N以北和向南侵入影响到40°N以南的冷空气过程，发现相应的500 hPa中高纬度波列、副热带波列、东亚槽以及低层西伯利亚高压呈现明显不同的特征，并发现副热带波列的变化与北大西洋涛动(North Atlantic oscillation，NAO)正位相的变化有关。与中国冬季气温变化相类似，云南冬季气温变化也存在明显的区域差异，全区一致型和东西差异型是云南冬季气温变化的两种主要模态，表明云南冬季低温事件呈现出东部偏冷和全区一致偏冷的特征(Yan et al.，2022；晏红明等，2023a，2003b，2023c)。全区一致偏冷变化的影响较大，例如2022年2月19—24日全省范围发生的低温事件造成云南约334.3万人受灾，直接经济损失303 000万元。目前的初步分析表明不同模态的低温事件与冷空气活动的强度有关(王学锋等，2020；Li and Yan，2023)，但对与之相关联的大气环流变化差异还缺乏深入的认识。众所周知，影响区域气温变化的因子比较复杂，尤其在全球变暖背景下北极增暖放大效应引起的大气环流异常更增加了区域气温变化的复杂性和极端性(Luo et al.，2016；Cohen et al.，2020)。为了深入认识云南冬季不同类型低温事件发生的原因，本文从冬季500 hPa亚洲大气环流异常的主要类型为切入点，分析不同类型大气环流变化与云南冬季气温变化的联系，寻找可能对云南不同类型低温事件造成影响的关键环流因子。

1 资料和方法

为了分析环流变化，本文使用的资料包括：(1) 1961—2022年冬季云南125个国家站逐日平均气温资料；(2) 2011年和2015年冬季中国2 374站日平均气温资料；(3) 1961—2022年美国国家环境预测中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料，包括逐日气温、位势高度场、海平面气压场、风场等，网格空间分辨率为2.5°×2.5° (Kistler et al.，2001)。

文中选取的亚洲区域范围为(60°—160°E、20°—70°N)；西伯利亚高压定义为(80°—120°E、40°—60°N)区域平均的海平面气压(Surface level Pressure，SLP)(Lü et al.，2019)；乌拉尔山高压定义为(40°—80°E、50°—70°N)区域平均的500 hPa位势高度(Luo et al.，2016)。李小泉和许乃猷(1965)研究表明亚洲地区500 hPa大气环流变化有纬向和经向两种环流类型，并定义了亚洲纬向型环流指数 I_Z (Asian Zonal Circulation Index)和经向型环流指数 I_M (Asian Meridional Circulation Index)，指数目前在气候监测预测业务中得到广泛应用。亚洲纬向环流指数 I_Z 用区域(60°—150°E、45°—65°N)的500 hPa位势高度场，以30个经度为间隔划分3个区，按照公式(1)计算；亚洲经向环流指数 I_M 用区域(45°N—65°N，60°E—150°E)的500 hPa位势高度场以30个经度为间隔划分3个区，按照公式(2)计算(http://cmdp.ncc-cma.net/cn/monitoring.html)。

$$I_Z=-\frac{\overline{\Delta z}}{\Delta\varphi}=\frac{\overline{z_1-z_2}}{\varphi_2-\varphi_1}=\frac{\sum_{i=1}^{l}z_1(i)-\sum_{i=1}^{l}z_2(i)}{l(\varphi_2-\varphi_1)} \tag{1}$$

式中，φ_1、φ_2 表示计算 I_Z 的纬度范围，$Z_1(i)$、$Z_2(i)$ 分别是在 φ_1、φ_2 两个纬圈上的高度值，l 为分别在 φ_1、φ_2 纬圈上均匀取点的高度值的数量。

$$I_M=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left|\overline{\left(\frac{1}{\cos\varphi}\frac{\partial z}{\partial\lambda}\right)_j}\right|=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left|\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{1}{\cos\varphi_j}\frac{\Delta z}{\Delta\lambda}\right)_j\right|$$

$$=\frac{1}{mn\Delta\lambda}\sum_{j=1}^{n}\left|\left[\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{\Delta z_i}{\cos\varphi_i}\right)\right]_j\right| \tag{2}$$

式中，n 为计算区域内的分区数，$\Delta\lambda$=15经度，在45°N、55°N和65°N计算 ΔZ_i，m=3表示三个纬圈的数量。在以上公式中“—”表示平均。

为了分析大气环流变化的主要特征，以及气象要素因子之间的相互关系，本文所用的分析方法包括：自然正交函数分解方法(Empirical Orthogonal Function，EOF)、相关分析、波通量(Takaya and Nakamura，2001)等方法，对线性相关系数的显著性检验采用t检验方法。考虑到全球增暖背景下气象要素年代际变化的影响，所有资料在分析之前均去除了线性趋势，气候态为1991—2020年的30 a平均。

2 冬季亚洲大气环流变化的主要模态及相应的高低层环流特征

首先分析亚洲区域(60°—160°E、20°—70°N)大气环流变化的主要特征，图1分别为冬季500 hPa位势高度场EOF前两个特征向量，第一特征向量(EOF1)解释方差占累计方差贡献的39%，反映了500 hPa亚洲区域西北和东南反相变化差异的特征，正负载荷值最大的区域分别位于俄罗斯中部和朝鲜半岛-日本，正负载荷值分界线平均约位于45°N附近(图1a)。第二特征向量(EOF2)占累计方差贡献的22%，整体上呈现出三级模态的高度变化差异，其中主要以东亚中高纬度地区载荷最大值的变化为主，最大值中心位于贝加尔湖附近，值得注意的是东亚中低纬度正负值分界线的位置明显偏南，平均位于35°N附近，南亚低纬度地区的载荷值变化较小，中心位于西太平洋地区(图1b)。以上第一和第二特征向量即表征了500 hPa亚洲大气环流变化的两个主要模态特征。

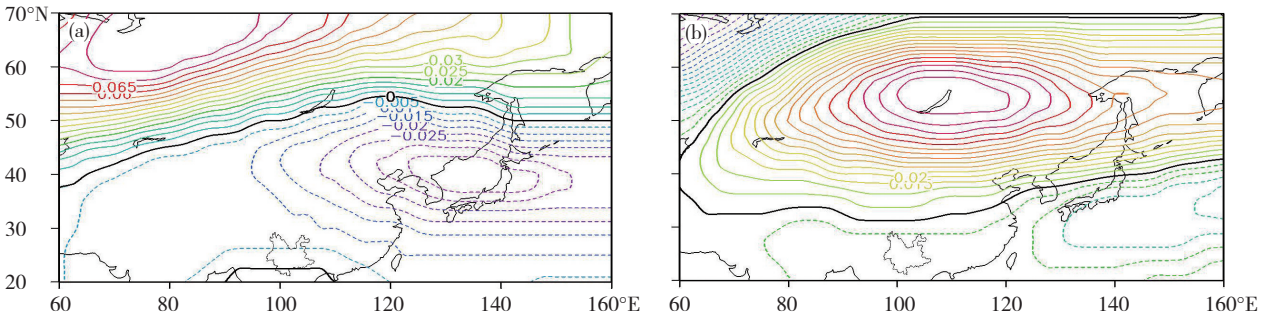


图1 1961—2020年冬季亚洲区域(60°—160°E、20°—70°N)500 hPa位势高度EOF分析第一(EOF1，a)和第二(EOF2，b)特征向量分布图

Fig. 1 The distribution of (a) first (EOF1) and (b) second (EOF2) EOF eigenvectors of 500 hPa geopotential height in Asia (60°—160°E、20°—70°N) in winter from 1961 to 2020

图2为EOF相应的前两个模态时间系数(PC1和PC2)分别与冬季I_Z和I_M的年际变化，PC1与I_Z指数显著负相关高达-0.91，与I_M的相关为-0.30；PC2与I_M有高达0.52的显著正相关，与I_Z指数的相关仅为-0.18。表明EOF1反映了东亚大气环流变化的纬向型特征，而EOF2则反映了经向型特征。在以下分析中，将PC1>0或PC2 > 0称为EOF1纬向型和EOF2经向型正位相，反之将PC1或PC2 < 0称为EOF1纬向型和EOF2经向型负位相。

分别分析冬季PC1和PC2与高低层大气环流的相关性，可以看到相应亚洲500 hPa的EOF1纬向型和EOF2经向型大气环流模态相应的高低层大气环流变化。首先从欧亚范围来看两个主模态时500 hPa大气环流的变化(图3c、d)，看到500hPa欧亚大气环流表现出明显不同的异常波列：EOF1模态时欧亚中高纬度为负-正-负的相关波列，两个显著负相关区分别位于挪威海和日本海，正相关位于西西伯利亚平原，波列主要表现出纬向型特征；与之不同，EOF2模态时欧亚从高纬度至低纬度为负-正-负的相关波列，两个显著负相关区分别位于乌拉尔山和中南半岛，正相关位于中国东北部，波列在中高纬度表现为纬向型，而在东亚则表现为经向型特征。对比发现两种模态时乌拉尔山地区和东亚地区的环流形势呈现明显不同的特征，正EOF1(EOF2)位相时乌拉尔山高压偏强(偏弱)，东亚南部为负高度异常(北高南低)；负EOF1(EOF2)时乌拉尔山高压偏弱(偏强)，东亚南部为正高度异常(北低南高)。

相应500 hPa两种主要环流型，其它高低层大气环流也呈现明显不同的特征。PC1与200 hPa纬向风从高纬度至低纬度为正-负-正-负的相关分布，而PC2与200 hPa纬向风的相关则刚好相反，呈负-正-负-正的相关分布(图3a、b)。值得注意的是，东亚中低纬度地区30°N附近纬向风与PC1和PC2的相关刚好相反，PC1时为正相关，PC2时为负相关，该区域纬向西风的强弱变化对东亚冷空气向南侵入的位置有重要影响，西风加强不利于冷空气向南活动，反之，西风减弱有利于冷空气向南活动(晏红明等，2023b)。

地面气压场SLP的变化也反映了明显不同的特征，正PC1(PC2)时，东亚地区SLP为北高南低(北低南高)，西伯利亚高压呈现偏强(偏弱)的特征；反之，负PC1(PC2)时，东亚地区SLP为北低南高(北高南低)，西伯利亚高压呈现偏弱(偏强)的特征(图3e、f)。

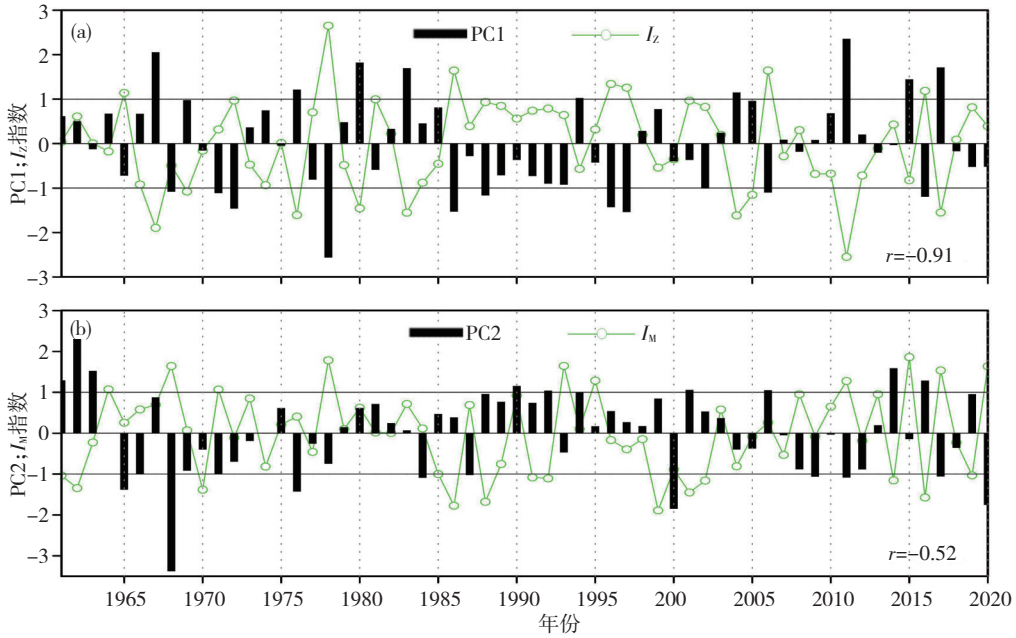


图2　1961—2020年冬季标准化的第一模态时间系数PC1和亚洲纬向环流指数 I_Z (a)及第二模态时间系数PC2和亚洲经向环流指数 I_M (b)逐年演变图(r为时间系数和相应亚洲环流指数的相关系数)

Fig. 2　The interannual variation of (a) the standardized first mode time coefficient PC1 and Asian zonal circulation index I_Z, as well as (b) the second mode time coefficient PC2 and Asian meridional circulation index I_M in winter from 1961 to 2020 (r is the correlation coefficient between the time coefficient and corresponding Asian circulation index)

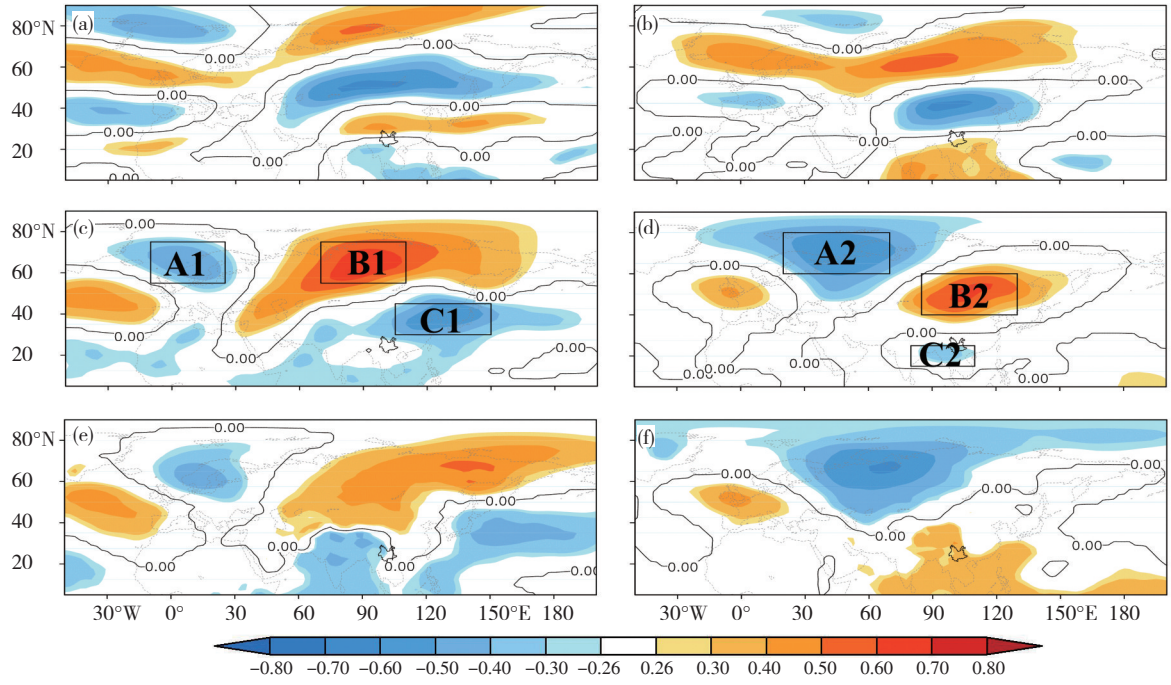


图3　1961—2020年冬季PC1(a、c、e)和PC2(b、d、f)与200 hPa纬向风(a、b)、500 hPa位势高度(c、d)和地面气压SLP(e、f)的相关系数分布图(矩形框为相关显著的关键区)

Fig. 3 The correlation coefficient distribution between (a, c, e) PC1 and (b, d, f) PC2 with (a, b) 200 hPa zonal wind, (c, d) 500 hPa geopotential height and (e, f) SLP in winter from 1961 to 2020 (Rectangular boxes denote the key areas with significant correlation)

3　冬季亚洲两种主要环流型与东亚和云南气温变化的关系

冬季东亚地区地面气温变化与高低层大气环流变化密切联系(Song and Wu, 2017；秦明月和李双林，2020)。从以上分析看到，相应500h Pa两种主要大气环流类型，高低层大气环流变化呈现明显不同的特征，那么相应不同的环流型，东亚气候会发生怎样的

变化呢?

从图4a、b看到冬季亚洲两种环流类型时东亚气温变化呈显著差异,PC1与东亚冬季气温的相关大致为北正南负,正负相关的分界线平均位于50°N附近,中国区域除西南地区西部为弱正相关,其余大部分地区为显著负相关;PC2与东亚的相关同样也呈北正南负,但正负相关位置却显著不同,其分界线向南偏移至30°N附近,显著负相关区位于西南西部、青藏高原、孟加拉湾、中南半岛和西太平洋,显著正相关位于东亚北部,中国东部为正相关。由于本文主要关注亚洲环流类型对冬季低温事件的影响,这里仅对比分析显著负相关区的位置变化,可以看到相应正PC1,即EOF1纬向型正位相,中国东部–日本气温偏低,而西南西部气温偏高;相应正PC2,即EOF2经向型正位相,东亚气温偏低区的位置明显偏南,位于西南西部、青藏高原以及东南亚地区,中国东部和北部气温偏高。就中国范围而言,相关分布反映了两种不同主要模态时西南西部与我国其它地区气温变化的反相差异特征。

从PC1和PC2与云南125站冬季气温的相关看到气温变化的差异特征更加显著(图4c、d),PC1与云南气温的相关呈东负西正,尤其与云南东部气温呈显著负相关,中心高达–0.5;PC2除与云南东北边缘地区气温弱正相关,与云南大部分地区气温呈显著负相关,高达–0.5的负相关中心位于西北部,与云南中部的负相关也比较显著,超过–0.4。对比两种主要环流型时显著负相关的范围,EOF2经向型模态对云南冬季气温变化的影响比较显著,正位相模态有利于云南全区域气温偏低;而EOF1纬向型模态主要影响云南东部地区的气温变化,正位模态相有利于云南东部气温偏低。该结论与晏红明等(2023c)前期工作的分析结论基本一致,进一步证实了纬向型和经向型环流变化对云南冬季气温一致型变化和东西差异型变化的重要影响。

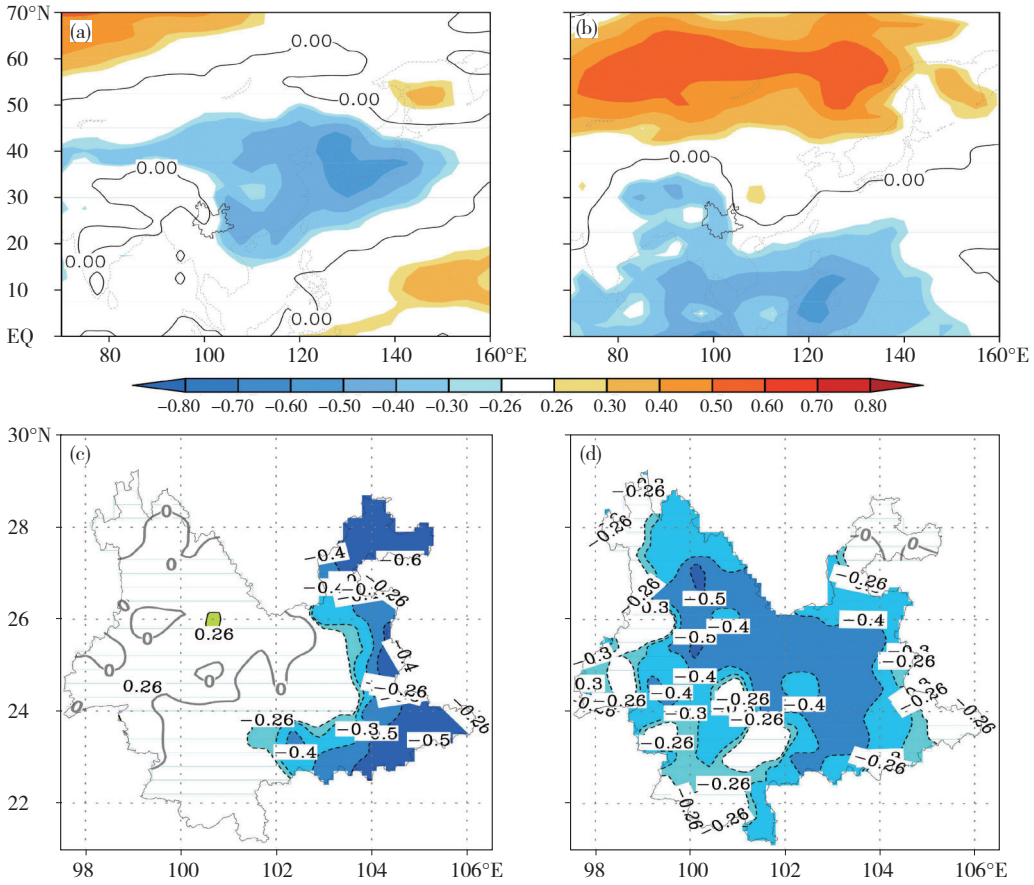


图4 1961—2020年冬季PC1(a、c)、PC2(b、d)与东亚(a、b)和云南125站(c、d)气温的相关系数分布图

Fig. 4 The correlation coefficient distribution between (a、c) PC1 , (b、d) PC2 and temperature in (a、b) East Asia and (c、d) 125 observation stations in Yunnan province in the winter of 1961—2020

由于PC1与I_Z、PC2与I_M密切相关,进一步分析冬季I_Z和I_M分别与云南气温的相关(图略),结果表明I_Z与云南冬季气温的相关分布尽管类似于图4a,但相关较弱,通过显著性检验的区域较小;I_M与云南冬季气温的相关更弱,基本没有相关通过显著性检验的区域。表明本文分析得到的EOF1纬向型模态和EOF2经

向型模态所表征的大气环流变化与云南冬季气温的变化关系更加密切。以下将进一步分析EOF1和EOF2两种大气环流模态对云南冬季低温事件的影响。

4 冬季两种大气环流型影响云南低温事件的可能机理

4.1 高低层大气环流变化对气温的影响

对比图3、图4可以看到东亚和云南的气温变化与高低层大气环流变化是密切联系的。由于本文主要关注大气环流型对云南低温事件的影响，下面主要分析EOF1纬向型(PC1)和EOF2经向型(PC2)正位相模态对云南低温事件的影响。

首先通过图3来初步探讨两种大气环流型对云南低温事件的影响。正EOF1纬向型环流时，500 hPa东亚位势高度场东低西高，乌拉尔山高压脊和东亚槽加强(图3c)；SLP场北高南低，西伯利亚高压加强(图3e)；200 hPa云南北部30°N附近85°—170°E范围西风加强。研究表明，强东亚冬季风活动与乌拉尔山高压和西伯利亚高压的加强有关(韩荣青等，2021；袁媛等，2022；晏红明等，2023b)，大气环流的变化表明EOF1纬向环流型时东亚冬季风加强，但由于200 hPa云南北部30°N附近西风加强，使得冷空气活动位置偏北，导致冷空气仅影响云南东部，而云南西部至高原南部气温偏高。正EOF2经向型环流时，500 hPa东亚中低纬度位势高度场北高南低(图3d)，200 hPa东亚30°—50°N西风急流偏弱(图3b)，这种形势非常有利于冷空气向南活动，导致青藏高原、中国西南西部和东南亚低纬度地区的气温偏低(图4b、d)。但值得注意的是，EOF2环流型时500 hPa乌拉尔山高压脊和低层西伯利亚高压偏弱(图3d、f)，表明此种环流模态的冷空气活动与乌拉尔山高压和西伯利亚高压偏强变化的关系不明显。

不同环流正位相模态时东亚高低层风场也反映出显著不同的冷空气活动特征(图5)。首先来看500 hPa风场变化(图5a、b)，正EOF1时500 hPa东亚为反气旋(A)–气旋(C)，分别位于俄罗斯中西部和日本海，气旋东侧的偏北气流和气旋西侧的偏北气流在贝加尔湖合并向南流动，导致东亚东部大部分地区气温偏低；而正EOF2时为气旋(C)–反气旋(A)，分别位于俄罗斯西部和贝加尔湖，反气旋东侧的偏北气流携带冷空气向南活动，并在中低纬度地区以回流的形式向西推进，导致云南全区域和东南亚地区气温偏低，而东亚东部40°N以北的中高纬度地区，由于受反气旋环流控制，气温偏高。值得关注的是，孟加拉湾北部地区的大气环流明显不同，正EOF1时为反气旋，正EOF2时为气旋，该区域环流变化会通过影响南支槽强弱，进而影响到冬季水汽输送和中国西南地区冬季降水的异常变化。低层850 hPa东亚地区的风场异常和500 hPa风场类似(图5c、d)，正EOF1环流型时的东亚偏北气流与俄罗斯中西部地区反气旋东侧的偏北气流和日本海附近气旋西侧的偏北气流有关，而正EOF2环流型时影响东亚中低纬度地区的冷空气主要与贝加尔湖地区高压前部的偏东气流有关。

从图5看到两种模态时影响云南的冷空气活动路径是不同的，正EOF1纬向型模态时，冷空气从贝加尔湖直接南下，强度较强，主要影响东亚东部地区；而正

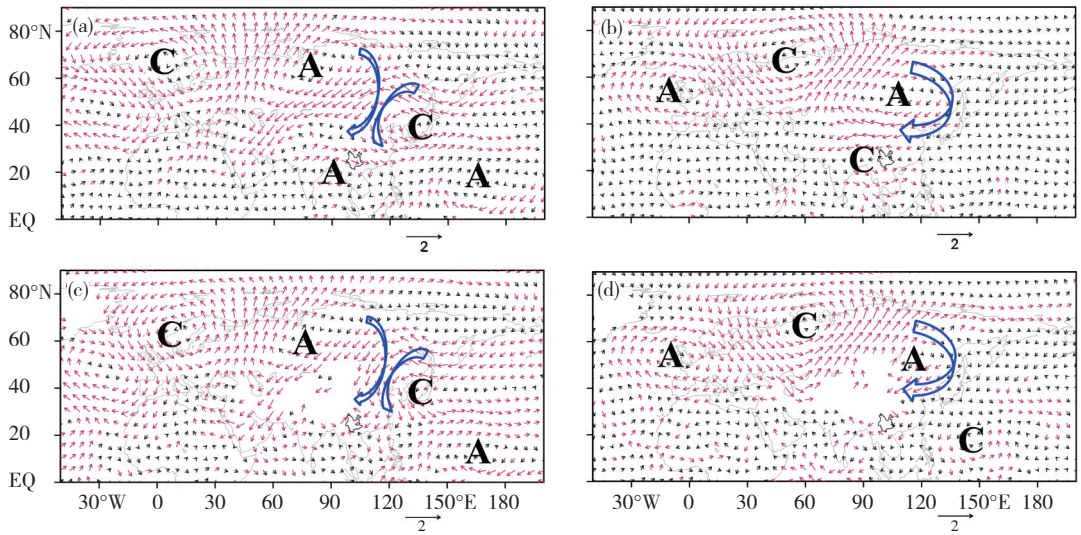


图5　1961—2020年冬季PC1(a、c)和PC2(b、d)与500 hPa(a、b)和850 hPa(c、d)风场的相关(红色箭头表示相关通过95%显著性检验)，图中“A”表示反气旋环流，“C”表示气旋环流

Fig. 5 The correlation distribution between (a, c) PC1 and (b, d) PC2 with the wind at (a, b) 500 hPa and (c, d) 850 hPa respectively (Red arrow indicates that the correlation passes the 95% significance test) "A" denotes anticyclonic circulation and "C" denotes cyclonic circulation.

EOF2经向型模态时，冷空气伴随贝加尔湖反气旋东侧的偏北气流沿着东亚大陆东部沿岸南下，并在中低纬度地区以回流的形式向东南推进，活动位置偏南偏西，有利于中国西南西部和东南亚低纬度地区气温偏低。

4.2 典型冷事件过程的选取和分析

为了进一步分析不同环流型模态大气环流变化对云南极端低温事件的影响，选取两种环流型背景下云南发生的典型冷事件过程进行分析。由于年代际增暖变化的影响，根据图2中PC1和PC2的变化选取2000年后PC1和PC2正异常最显著的2011年12月—2012年2月和2014年12月—2015年2月，重点分析这两年冬季发生的低温事件。为了能够更合理选取与两种环流类型相关的极端冷事件过程，计算逐日的环流类型指数，根据图3c和图3d相关显著的关键区定义了PC1-IDX(记为P_{c1})和PC2-IDX(记为P_{c2})两种环流型指数分别为

$$P_{c1}=H_{B1}-(H_{A1}+H_{C1}) \quad (3)$$

$$P_{c2}=H_{B2}-(H_{A2}+H_{C2}) \quad (4)$$

式中H_{A1}、H_{B1}、H_{C1}、H_{A2}、H_{B2}、H_{C2}分别为A1 (10°W—25°E、55°—75°N)、B1 (70°—110°E、55°—75°N)、C1 (105°—150°E、30°—45°N)、A2 (20°—70°E、60°—80°N)、B2 (85°—130°E、40°—60°N)、C2 (80°—110°E、15°—25°N)区域的平均位势高度。以上两个指数与云南气温的相关与图4c、d非常类似(图略)，可以代替PC1和PC2来计算逐日的两种大气环流型指数。图6分别为2011年12月—2012年2月和2014年12月—2015年2月逐日气温、PC1-IDX、PC2-IDX变化，可以看到全年两个指数基本处于正位相，对比相应的云南冬季气温逐日变化，分别选取2011年12月10—11日(简称为过程A)和2015年1月10—13日(简称为过程B)作为典型过程代表EOF1和EOF2两种环流类型进行分析。两次冷事件时PC1-IDX和PC2-IDX均为正值或正峰值期。过程A和过程B是典型的极端冷事件过程，过程A全省平均气温比常年同期偏低2.7 ℃，过程期间2011年12月11日气温偏低最明显(-2.8 ℃)，全省有76%站点气温距平低于0 ℃，其中有50%站点气温偏低超过-4 ℃，楚雄州双柏县和红河州个旧市的气温偏低最明显(-6.8 ℃)，有63站平均气温偏低，排有气象记录以来前5位，占总站数的50%，其中有15个站突破历史最小值记录，这些站点主要集中在云南中部和东

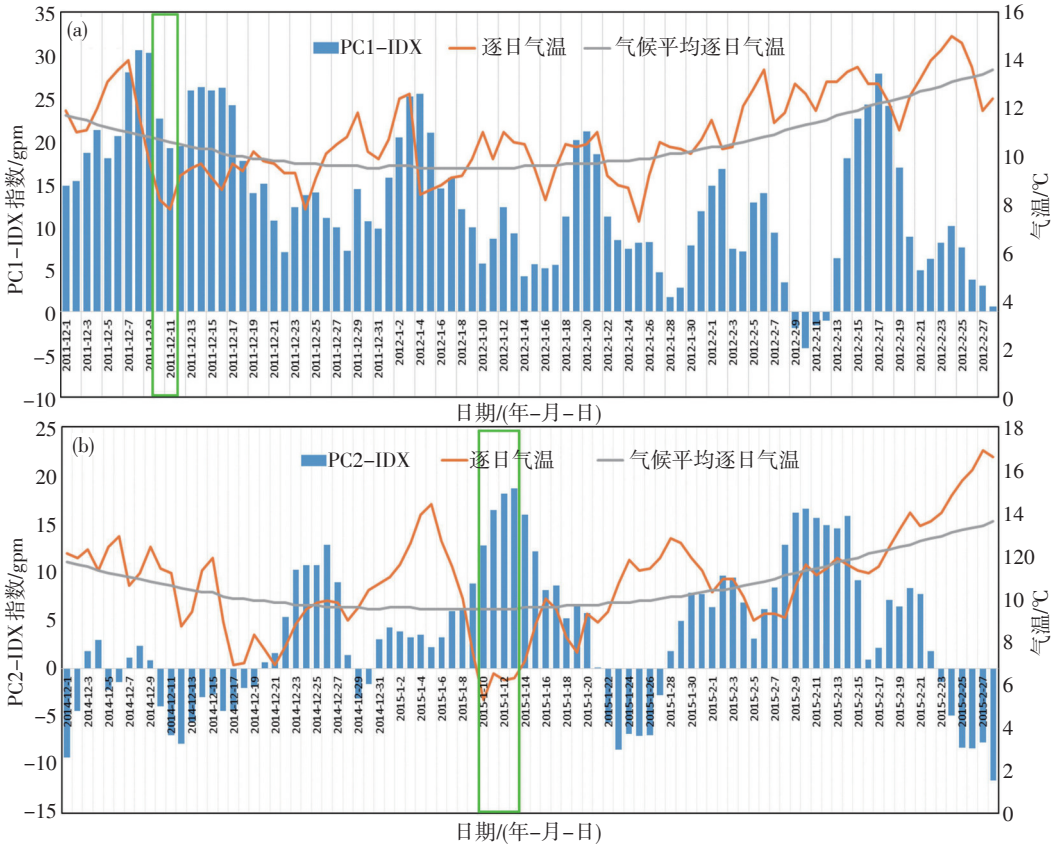


图6 2011年12月—2012年2月逐日PC1-IDX指数和云南日平均气温、日气候平均气温变化(a)及2014年12月—2015年2月逐日PC2-IDX指数、云南日平均气温、日气候平均气温变化(b)(绿色矩形框标注为选取的两次冷事件)

Fig.6 The daily variation of (a) PC1-IDX index, daily mean temperature, and climatological daily mean temperature of Yunnan province from December 2011 to February 2012 and (b) PC2-IDX index, daily mean temperature and climatological daily mean temperature of Yunnan province from December 2014 to February 2015 (The green rectangular boxes mark the two selected cold events)

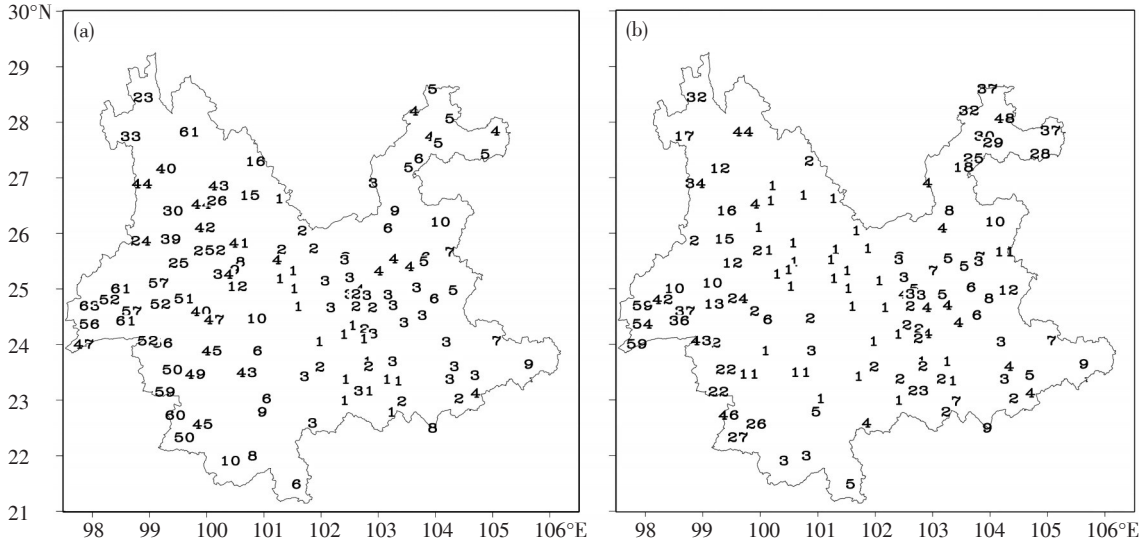


图7 2011年12月11日(a)和2015年1月10日(b)云南125个国家气象观测站日平均气温偏低排名分布情况
("1"表示日平均气温是1961年以来第1偏低，"2"表明第2偏低……)

Fig. 7 The ranking distribution of daily average temperature from low to high of 125 national meteorological observation stations on (a) December 11, 2011 and (b) January 10, 2015 ("1" denote the first lowest since 1961, and "2" indicate the second lowest…..)

部地区(图7a)；过程B全省平均气温比常年同期偏低3.4 ℃，过程期间2015年1月10日气温偏低最明显(-4.2 ℃)，全省有90%站点气温距平低于0 ℃，其中有61%站气温偏低等于或小于-4 ℃，红河州个旧市气温偏低最明显(-9.5 ℃)，有75站平均气温排历史最小值前5位，占总站数的60%，其中有30个站突破历史最小值记录，这些站点分布在云南中部、西北部、西南和东南部地区(图7b)。

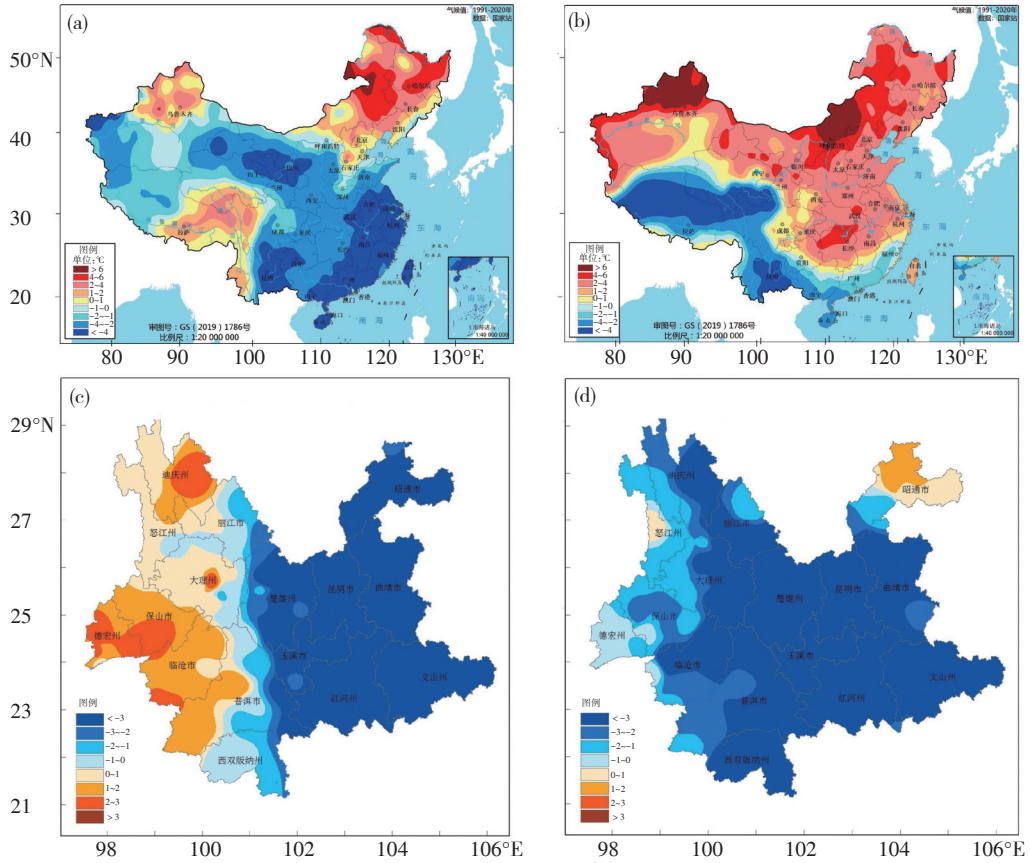


图8 2011年12月10—11日(a、c)和2015年1月10—13日(b、d)中国(a、b)和云南(c、d)气温距平分布(单位：℃)

Fig. 8 The distribution of temperature anomalies (unit: ℃) in (a, b) China and (c, d) Yunnan province from (a, c) December 10 to 11, 2011 and (b, d) January 10 to 13, 2015

为了从更大范围考察两次典型过程中气温变化特征，图8分别给出中国和云南冬季气温的距平分布。可见两次过程中国冬季气温变化的差异较大，基本与图4中PC1和PC2与气温相关分布反映的气温变化一致，均反映了中国西南西部和中国大部分地区气温反相变化的特征。2011年12月10—11日中国东部大部地区气温偏低，相反西南和高原大部气温偏高；2015年1月10—13日的气温变化刚好相反(图8a、b)。云南区域的气温分布也呈现明显不同的特征，2011年12月10—11月气温变化为东冷西暖，2015年1月10—13日除东北边缘地区外其它地区一致偏冷的特征非常显著(图8c、d)。

接下来对以上两个典型过程的大气环流演变进行分析。从图9看到，过程A与500 hPa乌拉尔山高压和东亚槽的逐渐加强密切联系，过程前期乌拉尔山高压逐渐加强，脊前西北气流携带的冷空气加强东亚槽，过程期间东亚中高纬度地区为显著的西高东低高度异常分布(图9a—e)。SLP场西伯利亚高压较强，并逐渐南压，过程期间西伯利亚高压南压减弱，正SLP距平场向南扩展至中南半岛(图9f—j)。从300 hPa的Rossby波能量频散过程来看，过程A与欧亚中高纬度异常波列有关，该波列来自北大西洋中部，首先经过欧洲、乌拉尔山，然后波能量逐渐向东亚地区频散；超前过程2～3 d时在中高纬度地区从大西洋中部至东亚形成负-正-负的异常波列；超前过程1 d和过程期间，来自大西洋的波能量减弱，而从俄罗斯中部向东亚的波能量频散加强。逐日波通量变化表明过程A就是一次波能量从北大西洋中部沿中高纬度路径向东亚传播影响的过程(图9k—o)。

与过程A相比，过程B的环流变化呈显著不同的特征。500 hPa欧亚中高纬度为一槽一脊，分别位于乌拉尔山至北非和贝加尔湖，乌拉尔山为负高度距平，相比贝加尔湖的正高度距平，东亚中低纬度高度场较

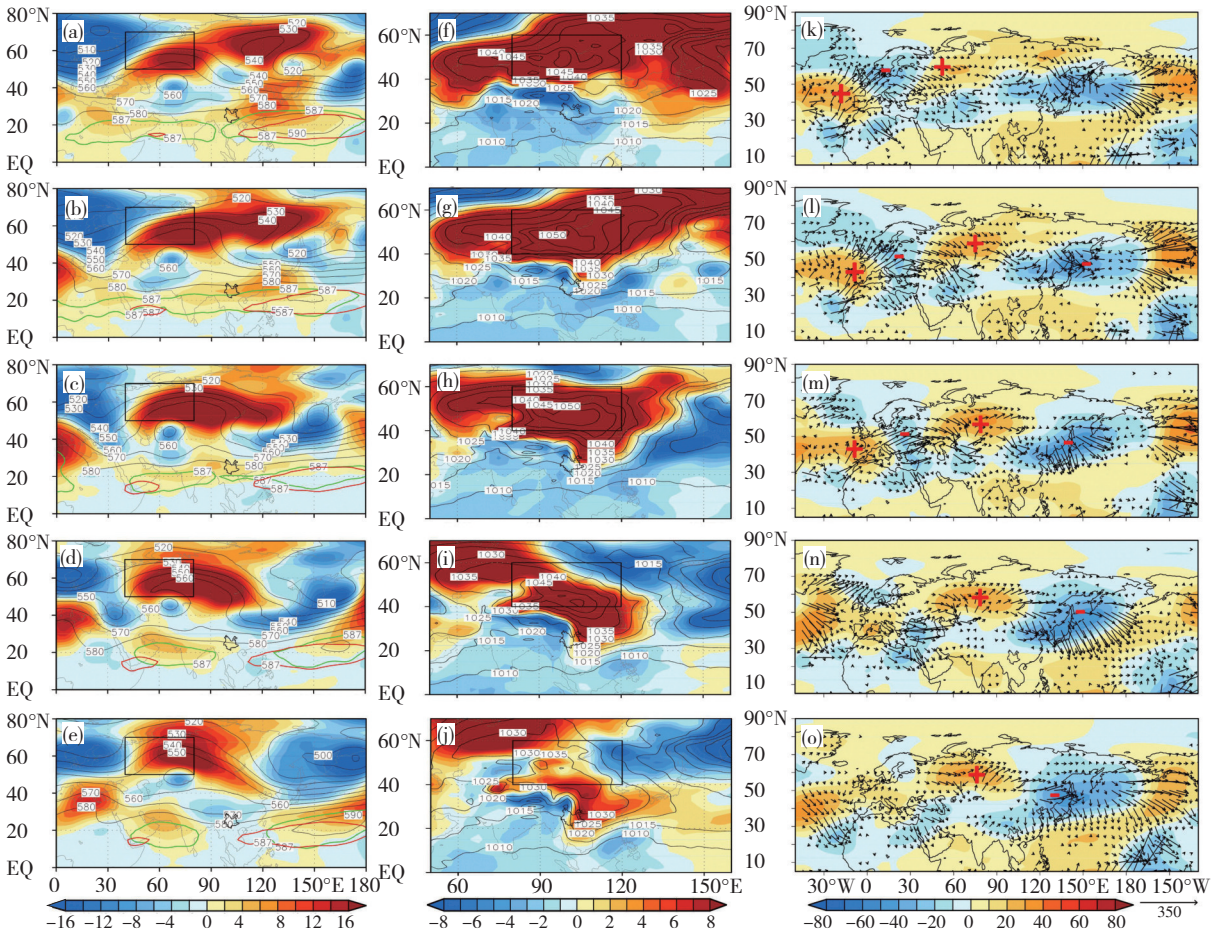


图9 2011年12月6—11日500 hPa高度(等值线)及其距平(填色，a-e，单位：gpm)、SLP场(等值线)及其距平(填色，f-j，单位：hPa)、300 hPa波通量(矢量，单位：$m^2 \cdot s^{-2}$)及高度距平(填色，k-o，单位：gpm)分布(500 hPa高度场和SLP的矩形框标注分别为乌拉尔山高压和西伯利亚高压的位置，图k-o中“+”表示高度正异常，“-”表示高度负异常)

Fig.9 The distribution of (a-e) 500 hPa geopotential height (contour) and its anomaly (colored, unit: gpm), (f-j) SLP (contour) and its anomaly (colored, unit: hPa), (k-o) 300 hPa wave flux (vector, unit: $m^2 \cdot s^{-2}$) and height anomaly (colored, unit: gpm) from December 6 to 11, 2011 (The position of the Ural Mountains high pressure and Siberian high pressure are marked by the rectangles in 500 hPa height field and SLP panels, respectively. In panels (k-o), "+" indicates a positive height anomaly, and "-" indicates a negative height anomaly)

低，并逐渐转为负高度距平，在东亚形成显著的北高南低形势(图10a—e)。SLP场西伯利亚区域正距平较弱，但在高原上有一显著的正SLP距平中心，并逐渐加强向南扩展(图10f—j)。从300 hPa清晰看到Rossby波能量频散主要从北大西洋沿中低纬度副热带路径经过非洲、青藏高原影响云南，自北大西洋到云南在副热带地区形成正-负-正-负的高度异常波列，青藏高原为正高度距平，云南为负高度距平中心(图10k—o)。

比较两次过程发现，过程A与乌拉尔山高压和西伯利亚高压加强、欧亚中高纬度异常波列的变化密切联系，而过程B则与乌拉尔山地区和西伯利亚地区高压的加强关系不密切，主要与副热带异常波列的活动，以及青藏高原正SLP的加强密切联系。

从850 hPa距平风和温度平流的变化同样可以

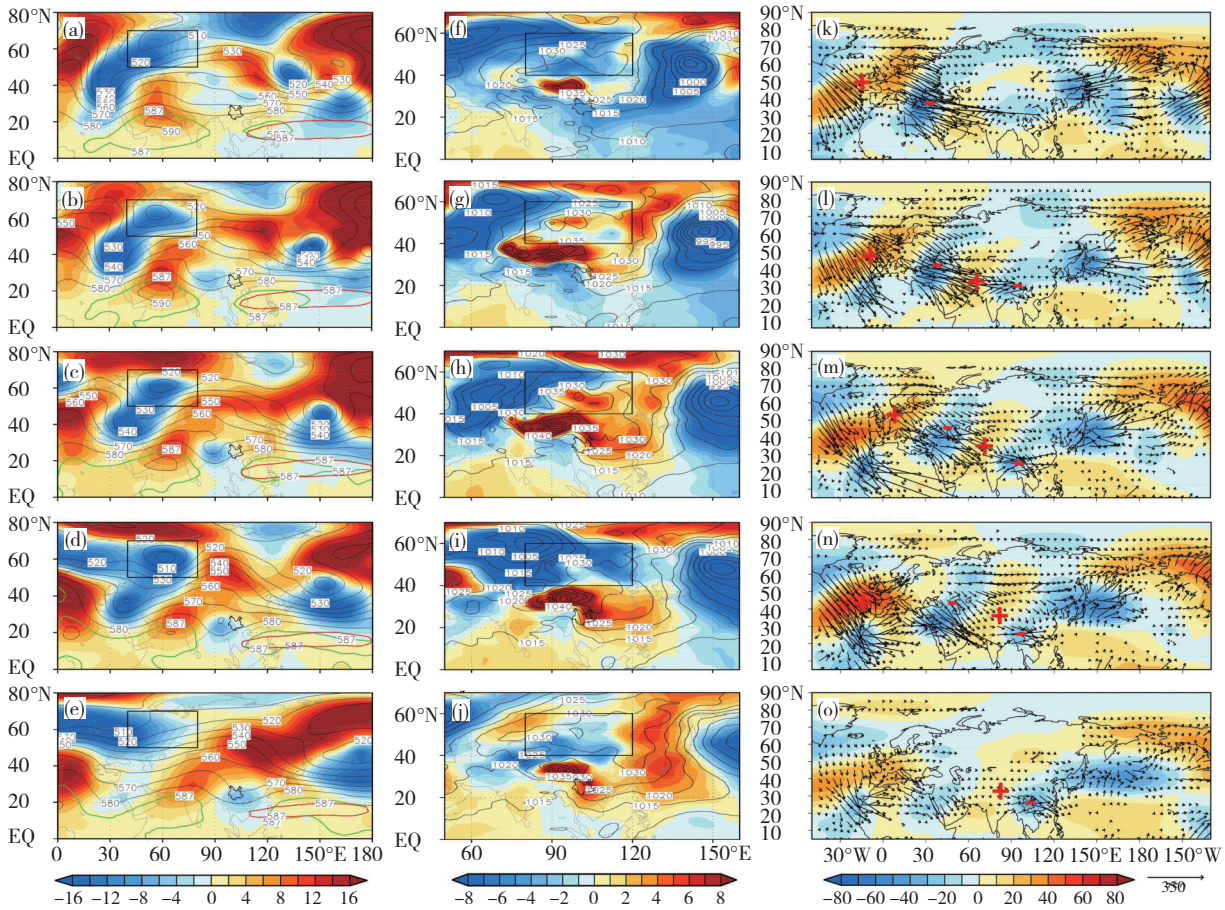


图10　同图9，时间为2015年1月6—13日

Fig. 10 Same as Fig 9, but from January 6 to 13, 2015

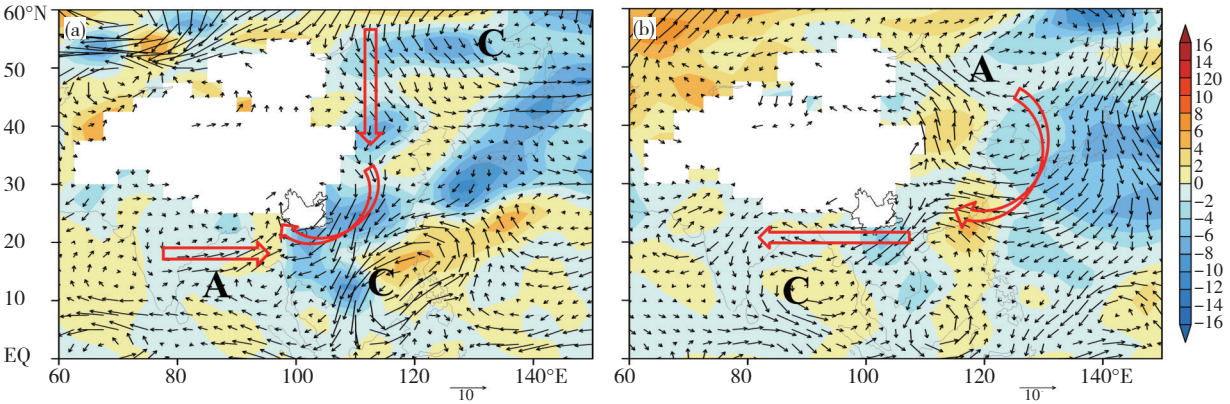


图11 2011年12月10—11日(a)和2015年1月10—13日(b)低层850hPa距平风(矢量，单位：m·s)和温度平流(填色，单位：10^{-6} K·s)合成图("A"表示反气旋环流，"C"表示气旋环流；箭头表示关注区域气流的方向)

Fig. 11 The composite distribution of wind anomalies (vector, unit: m • s) at 850 hPa and temperature advection (colored, unit: 10^{-6} K·s) from (a) December 10 to 11, 2011 and (b) January 10 to 13, 2015("A" mark as the anticyclonic circulation and "C" mark as the cyclonic circulation. Arrows indicate the direction of airflow in the key areas)

看到低层两次典型过程低层冷空气的差异(图11),过程A东亚地区偏北气流和冷温度平流直接从高纬度地区向南流动,影响中国东部,并向南影响到东亚低纬度地区,但孟加拉湾北部至云南西部为异常偏西风,在一定程度上阻止了冷空气向西推进(图11a),导致云南西部和高原南部的气温偏高(图8a)。过程B的冷空气是以回流的形式随东亚沿岸中高纬度地区异常高压前部的偏东气流向西推进至孟加拉湾北部,表明冷空气向西推进比较明显,导致云南、青藏高原和北印度洋地区气温偏低显著,而中国东部和北部地区为异常高压环流控制(图11b),气温反而偏高(图8b)。

综合以上分析,在500 hPa两种类型环流形势下云南冬季气温的变化是不同的。纬向型环流时冷空气活动仅影响云南东部,导致云南东部气温偏低,这种低温过程与乌拉尔山和西伯利亚的加强、高层中高纬度异常波列的变化有关。而经向型环流时冷空气活动影响云南全省,导致云南全省气温偏低,该类过程主要与高层副热带异常波列的活动有关,而与乌拉尔山高压和西伯利亚高压的加强关系不明显。

5 结论与讨论

云南位于低纬高原地区,由于青藏高原大地形的影响,冬季气候与我国其它地区尤其是东部地区的气候明显不同。本文从500 hPa大气环流的异常变化入手,分析了亚洲两种类型环流异常对云南冬季低温事件的影响,得到以下主要结论:

(1) 500 hPa亚洲大气环流变化的主要呈纬向和经向两种类型,其中纬向型模态是亚洲大气环流变化的主要模态,占方差贡献的39%,经向型模态是次主要模态,占方差贡献的22%。

(2) 相应亚洲纬向型和经向型两个主要环流模态,从更大范围定义了欧亚纬向型PC1-IDX和经向型PC2-IDX大气环流模态指数。纬向型模态有三个大气活动中心分别在挪威海(10°W—25°E、55°—75°N)、日本海(70°—110°E、55°—75°N)、西西伯利亚平原(105°—150°E、30°—45°N),其中西西伯利亚平原的活动中心与挪威海和日本海两个活动中心的位势高度变化相反,当高度距平场在挪威海和日本海为负、西西伯利亚平原为正时表示纬向型正位相,反之为纬向型负位相;经向型模态的三个大气活动中心分别位于乌拉尔山(20°—70°E、60°—80°N)、中国东北部(85°—130°E、40°—60°N,)、中南半岛(80°—110°E、15°—25°N,),其中中国东北部的活动中心与乌拉尔山和中南半岛两个活动中心的位势高度变化相反,当高度距平场在乌拉尔山和中南半岛为负、中国东北为正时表示经向型正位相,反之为经向型负位相。

(3) 两种大气环流正位相模态时影响云南的冷空气活动路径及其影响范围有显著差异,正纬向型模态时,冷空气从贝加尔湖直接南下,强度较强,主要影响东亚东部地区,此时的低温过程与乌拉尔山高压和西伯利亚高压加强、欧亚中高纬度异常波列的变化密切联系;而正经向型模态时,冷空气伴随贝加尔湖地区的反气旋东侧偏北气流沿着东亚大陆东部边沿南下,并在中低纬度地区以回流的形式向东南推进,活动位置偏南偏西,有利于云南全省、青藏高原和东南亚低纬度地区气温偏低,此时的低温过程主要与副热带异常波列的变化和高原正SLP的加强有关,与乌拉尔山高压和西伯利亚区域高压加强的关系不密切。

本文分析表明在不同类型大气环流作用下,云南低温冷事件的发生区域是明显不同的,同时与之相联系的关键影响系统也存在明显差异。而由于文章篇幅所限,并没有探究影响大气环流异常变化的更深层次原因。在下一步的工作中有几个值得进一步研究的问题: (1) 从本文的分析看到,不管是纬向型环流的中高纬度异常波列,还是经向型环流的副热带异常波列,均起源于北大西洋,影响波列沿不同路径传播的关键因子是什么? (2) 从相应500 hPa不同类型的大气环流变化看到孟加拉湾地区的环流异常也存在明显差异,孟加拉湾地区纬向型时为反气旋环流,经向型时为气旋环流,该区域两种环流类型时的环流变化对水汽输送,以及相关过程降水的影响情况如何? (3) 从纬向型环流变化的影响过程来看,可以从乌拉尔山高压和西伯利亚高压的加强变化看到影响中国的冷空气发展加强的过程,但经向型环流变化与贝加尔湖地区异常反气旋环流的活动密切联系,乌拉尔山脊和西伯利亚高压反而是减弱的,影响贝加尔湖异常反气旋环流加强的关键因子也是值得进一步研究的问题。

参考文献:

韩荣青,石柳,袁媛.2021. 2020/2021年冬季中国冷暖转折成因分析[J].气象,47(7):880-889. 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]. Meteorological Monthly,47(7):880-892 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0521.07.011

刘红武,李振,唐林,等.2020. 2018年12月湖南极端低温暴雪环流特征及成因分析[J].暴雨灾害,39(5):487-495. Liu H W, Li Z, Tang L, et al. 2020. Circulation characteristics and causes of extreme low temperature and blizzard in Hunan in December 2018 [J]. Torrential Rain and Disasters,39(5):487-495 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.

05.007

李小泉,许乃猷. 1965, 亚欧500 hPa环流指数[C]. 论文汇集,中央气象局气象科学研究所. Li X Q, Xu N Y. 1965. 500 hPa circulation index in Eurasian[C]. Collected works, Institute of meteorological science, China meteorological administration.

秦明月,李双林.2020. 2018年和2008年1~2月影响我国的持续低温事件及其对比分析[J].气候与环境研究,25(6):601-615. Qin M Y, Li S L. 2020. Comparison of Persistent Cold Events in China during January-February of 2018 and 2008 [J]. Climatic and Environmental Research,25(6):601-615 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19154

万云霞,晏红明,金燕,等.2023.两次不同ENSO背景下云南冬季极端冷事件的成因分析[J].大气科学学报,46(4):575-586. Wan Y X, Yan H M, Jin Y, et al. 2023. Causes of two extremely cold events in Yunnan during different ENSO events [J].Transactions of Atmospheric Sciences,46(4):575-586 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2022061 4001

王学锋,晏红明,李蒙,等.2020.云南省气候业务技术手册[M].北京:气象出版社. Wang X F, Yan H M, Li M, et al. 2020. Yunnan climate operational technical manual [M]. Beijing: Meteorological press (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,4(28):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]. 4(28):870-879 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2009.04.0870.10.

晏红明,孔祥吉,字俣丞,等.2023a.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. 2023. Analysis of extreme cold event in 19-24 February 2022 in Yunnan Province [J]. Meteorological Monthly,49(9):1029-1044 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2023.050602

晏红明,李刚,袁媛,等.2023b. 2021/2022年东亚大陆冬季前暖后冷的环流差异及其成因[J].地球物理学报,66(10):4026-4044. Yan H M, Li G, Yuan Y, et al. 2023. Atmospheric circulation difference between warm in early winter and cold in late winter 2021/2022 over East Asia continent and its causes [J]. Chinese Journal of Geophysics.,66(10):4026-4044 (in Chinese). doi:10.6038/cjg2022Q0654

晏红明,王灵,金燕,等.2023c.云南冬季气温变化的主要模态及其影响的关键环流因子[J].高原气象,42(2):386-402. Yan H M, Wang L, Jin Y, et al, 2023. Dominant Patterns of Winter Temperature Variation in Yunnan and Key Circulation Factors Affecting on them [J]. Plateau Meteorology,42(2):386-402 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00070

袁媛,申乐琳,晏红明.2022.年代际尺度的拉尼娜事件对中国西南地区冬季气温的影响[J].地球物理学报,65(1):169-185. Yuan Y, Shen L L, Yan H M.2022. Influence of La Nina on the winter temperature in Southwest China on the interdecadal timescale [J]. Chinese Journal of Geophysics,65(1):169-185 (in Chinese). doi:10.6038/cjg2022P0267

朱蕾,王清平,王勇,等.2020.乌鲁木齐两次极端暴雪天气过程对比分析[J].暴雨灾害,39(3):225-233. Zhu L, Wang Q P, Wang Y, Zhao K M. 2020. Comparative analysis of two extreme blizzard processes in Urumqi [J]. Torrential Rain and Disasters,39(3):225-233 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.002

Cohen J L, Zhang X, Francis J, et al. 2020. Divergent consensuses on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather [J]. Nature Climate Change,10:20-29. doi:10.1038/s41558-019-0662-y

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 [M]. Cambridge University Press

Kistler R, Collins W, Saha S, et al. 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. Bulletin of American Meteorological Society,82(2):247-268

Li W M, Yan H M. 2023. The influences of the Arctic oscillation on the frequency of winter extreme cold days in Yunnan of China [J]. Theoretical and Applied Climatology,151:1615-1622. doi:10.1007/s00704-022-04347-3

Luo D H, Xiao Y Q, Yao Y, et al. 2016. The impact of Ural blocking on winter warm Arctic-cold Eurasian anomalies. Part I: Blocking-induced amplification [J]. Journal of Climate,29:3925-3947. doi:10.1175/JCLI-D-15-0611.1

L ü 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]. Advances in Atmospheric Sciences,36(2):173-188. doi:10.1007/s00376-017-8089-8

Song L, Wu R G. 2017. Processes for occurrence of strong cold events over Eastern China [J]. Journal of Climate,30:9247-9266. doi:10.1175/JCLI-D-16-0857.1

Takaya Koutarou, Nakamura Hisashi. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. Journal of the atmospheric sciences,58:608-627. doi:10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2

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]. Atmospheric Research,268(15):106016. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106106

（责任编辑　张　文）