吴遥,唐红玉,董新宁,等,2024. 西南地区东部前后冬气温反位相异常特征及成因分析[J]. 气象,50(7):847-858. Wu Y, Tang H Y, Dong X N, et al, 2024. Characteristics and causes analysis of anomalous temperature reversal in the eastern Southwest China during early and late winter[J]. Meteor Mon, 50(7):847-858(in Chinese).

西南地区东部前后冬气温反位相异常 特征及成因分析*

吴 遥^{1,2} 唐红玉^{1,2} 董新宁^{1,2} 周 杰^{1,2} 魏麟骁^{1,2}

1 中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室,重庆 401147
 2 重庆市气候中心,重庆 401147

提要:利用西南地区东部台站观测和 ERA5 再分析等资料,分析该地区冬季气温前后冬反位相异常转折(以下简称异常转折)特征及其成因。结果表明:该地区冬季气温在 2000 年以后易出现前冷后暖(P1 型)的异常转折变化,而前暖后冷(P2 型)则在 20 世纪 70 年代出现最多。冬季气温发生异常转折时,500 hPa 位势高度场上反映出青藏高原高度场是最为关键的环流系统,甚至超过了乌拉尔山阻塞高压的影响。200 hPa 风场上,西风急流等系统通过影响东亚冬季风进而影响冬季气温季节内变化。海平面气压场上,当蒙古高压在冬季呈显著前强后弱异常变化时,冬季气温易出现 P1 型异常转折,反之易出现 P2 型异常转折。冬季气温季节内发生异常转折时,北大西洋、赤道中东太平洋和赤道印度洋海温均表现出较为明显异常信号;当前期夏、秋季这三个海域海温异常偏高时,冬季气温易出现 P1 型异常转折,反之则易出现 P2 型异常转折,夏、秋季异常海温可作为预测前兆信号。

关键词:西南地区东部,冬季气温,异常转折,成因分析 中图分类号:P461 文献标志码:A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.020401

Characteristics and Causes Analysis of Anomalous Temperature Reversal in the Eastern Southwest China During Early and Late Winter

WU Yao^{1,2} TANG Hongyu^{1,2} DONG Xinning^{1,2} ZHOU Jie^{1,2} WEI Linxiao^{1,2}
1 CMA Key Open Laboratory of Transforming Climate Resources to Economy, Chongqing 401147
2 Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

Abstract: This study uses observation data from stations in the eastern Southwest China and ERA5 reanalysis data and analyzes the characteristics and causes of the inverse phase shift anomalies in winter temperatures (referred to as anomalous shifts) in this region. The findings indicate that after 2000, this region tended to experience a pattern of colder temperatures earlier in the winter followed by warmer temperatures later (referred to as P1 type), whereas a pattern of warmer temperatures followed by colder ones (referred to as P2 type) was more prevalent in the 1970s. During the occurrence of these anomalous shifts in winter temperatures, the 500 hPa geopotential height field reveals that the Tibetan Plateau plays a crucial role in the circulation system, even surpassing the influence of the Ural blocking high. At the 200 hPa wind field, systems such as the westerly jet stream affect the East Asian winter monsoon influencing the

2023年5月6日收稿; 2024年4月1日收修定稿

^{*} 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2022NSCQ-MSX0558)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J031)、中国气象局复盘总结专项 (FPZJ2023-106)和重庆市气象部门人才支持性项目(RCZC-202303)共同资助

第一作者:吴遥,主要从事诊断预测和区域气候模式研究.E-mail:472347935@qq.com

通讯作者:唐红玉,主要从事短期气候诊断预测业务和研究.E-mail:782378385@qq.com

气 象

intra-seasonal variation of temperature in winter. In terms of sea-level pressure fields, when the Mongolian high exhibits significant weakening after an initial strengthening in winter, P1 type temperature shifts are more likely to occur, and vice versa for P2 type shifts. Additionally, during these anomalous temperature shifts within the winter season, significant anomaly signals have been observed in the North Atlantic, the equatorial central and eastern Pacific and the equatorial Indian Ocean. High sea surface temperature anomalies in these three areas during the preceding summer and autumn seasons tend to cause P1 type shifts in winter temperatures, whereas the opposite conditions tend to result in P2 type shifts. Thus, abnormal sea surface temperature can serve as potential precursors for prediction.

Key words: eastern Southwest China, winter temperature, anomalous variation, cause analysis

引 言

近百年以来,随着全球气候变化,极端天气气候 事件频发多发重发(IPCC,2021)。但在全球整体变 暖的大背景下,并未改变冷冬的频繁出现(王迪等, 2015)。西南地区东部地处青藏高原东麓,由于四川 盆地周边山脉纬度相对偏南且会阻碍北方冷空气, 其在全国范围内冬季相对偏暖,虽受气候系统变率 的影响,但西南地区东部仍然在近年来频繁出现冬 季低温(马晓青等,2008;王凌等,2008;吴古会等, 2012)。

对于冬季低温的研究表明:北极增暖加快、北极 海冰持续减少有利于西伯利亚高压增强,使得近年 来欧亚地区冷冬出现频次较高(Serreze and Barry, 2011;Outten and Esau, 2012;武丰民等, 2014)。在 业务预测中,时间上往往主要以年际或年代际变化 作为研究重点,着重分析整个冬季的平均气温变化 特征及影响的外强迫信号,并以此作为预测依据 (Luo and Zhang, 2015; Li et al, 2019; 李想和王永 光,2023)。在空间上,研究指出我国气温在全国范 围主要表现出一致性和南北反相型特征(康丽华等, 2006)。而对于西南地区,同样存在不同分布型差 异,主要表现为全区一致性和东西反相型两种分布 (蒋兴文和李跃清,2010;叶钊等,2011)。深入分析 发现两种分布型主要影响系统存在显著差异,全区 一致性与东亚冬季风关系紧密;东西反相型主要与 冷空气活动和西太平洋副热带高压(以下简称西太 副高)关系紧密。以上研究表明无论是对全国范围 还是小范围地区,冬季气温都存在时间上的年际或 年代际变化和空间上的不一致性。以往的研究主要 集中在整个冬季的平均气温,往往忽略了季节内振 荡带来的灾害影响。

值得关注的是,中国冬季气温存在季节内振荡,

如 2007/2008 年和 2020/2021 年冬季,前后冬发生 了明显转折,且表现出前后冬冷暖不一致特征。特 别是 2007/2008 年发生了历史罕见的低温雨雪冰冻 灾害(丁一汇等,2008;韩荣青等,2021)。统计发现, 全国性前后冬冷暖转变概率大约为50%(韦玮等, 2014)。因此对于前后冬异常转折研究也逐渐受到 关注。有研究指出冬季风存在 10~20 d 及 30~ 60 d 的季节内大气低频振荡信号(马宁等,2011;朱 毓颖和江静,2013;杨双艳等,2014),这是冷空气向 南爆发频次在次季节上存在的差异,进而导致前后 冬气温发生转折(申红艳等,2021)。低层海陆热力 差异前后冬强(弱)变化导致的西伯利亚高压强度季 节内强(弱)变化是造成我国冬季气温发生季节内转 折的主要原因(孙健等,2019)。冬季气温季节内转 折不仅与中高纬环流系统关系紧密,还受太平洋、印 度洋等海温的影响(简云韬等,2017)。可见,冬季气 温季节内转折除了大气内部变率,还可能受外强迫 因子的影响。除此之外,在气候预测中,包括短期气 候预测和长期气候预估,极端气候的预测是非常重 要的一个研究内容。因此很有必要对前后冬气温转 折典型年份进行分析。

基于以上问题,本研究重点分析西南地区东部 前后冬气温异常转折现象,分析与其特征相联系的 大气环流特征,并分析影响这些环流变化的可能外 强迫因子,为业务预测提供一定的参考依据。

1 资料和方法

本文所用观测数据来源于气象大数据云平台• 天擎 1961—2022 年西南地区东部 115 个国家级气 象台站的逐日数据,资料统计时段为冬季(12 月至 次年 2 月,如 1963 年冬季指 1963 年 12 月至 1964 年 2 月),气候值为 1991—2020 年平均,站点分布如 图 1 所示。大气环流资料来自 NCEP/NCAR 提供 的逐月水平分辨率为 2.5°×2.5°的位势高度场、风 场和海平面气压场等再分析资料。NOAA 提供了 逐月的水平分辨率为 2°×2°的全球海表温度资料。

为选择出现前后冬异常转折年份(以下简称异 常转折):(1)按照《气候影响评价业务规定(修订)》, 在气候监测评价业务中,对气温的评价采用气温距 平(△T),按表1标准进行评价,其中对气温异常的 评价为气温距平的绝对值≥1℃;(2)1961—2021年 西南地区东部冬季气温的EOF分析发现(图略),西 南地区东部冬季气温的第一模态为全区一致的分布 模态,其方差贡献占到总方差的82.1%,说明西南 地区冬季气温有较好的收敛性和一致性。因此,本 文定义P1型为前冬(12月)全区平均气温偏低1℃, 且后冬(2月)温度偏高1℃作为前冷后暖典型年;反 之定义P2型为前暖后冷典型年。根据上述定义选 择出历史上西南地区东部P1型年份为1965、2001、 2012和2020年,P2型年份为1963、1968、1970、 1973、1977、1979、1988、1994和2007年。文中P1(P2)



图 1 西南地区东部地形高度(填色)及 站点位置(黑点)分布

Fig. 1 Distribution of the topography height (colored) and station locations (black solid dot) in the eastern Southwest China

表 1 气温距平(ΔT)评价标准

Table 1	Evaluation	criteria	for	temperature
		1 (1 77)		

anomaly (ΔT)				
$\Delta T/$ °C	评价标准			
$\Delta T \ge 1.0$	显著偏高			
0.5 $\leq \Delta T < 1.0$	偏高			
$-0.5 < \Delta T < 0.5$	正常			
$-1.0 < \Delta T \leq -0.5$	偏低			
$\Delta T \leqslant -1.0$	显著偏低			

型合成为 P1(P2)型所有年份平均,偏差(即 P1-P2)合成为 P1 型所有年份平均减去 P2 型所有年份 平均,距平相较于气候值计算而得。

2 西南地区东部前后冬气温异常转折 特征

2.1 总体变化特征

依据前文对异常转折的定义,由表 2 可见,1961 年以来西南地区东部 P1 型年份相对较少(4 a);P2 型年份相对较多(9 a)。统计 1961 年以来各年代 P1 和 P2 型的发生次数,在 P1 型中,有 3 a 出现在 2000 年以后,1 a 出现在 20 世纪 60 年代,可见西南地区 东部冬季气温(以下简称冬季气温)在 2000 年以后 易出现 P1 型转折变化。P2 型年份中,以 20 世纪 70 年代出现最多,共出现了 4 a;20 世纪 60 年代出 现次之,共出现了 2 a;1980—2009 年各年代均出现 1 次。在进入 21 世纪 10 年代后,未出现过 P2 型变 化,以 P1 型变化为主。为了分析方便,本文定义 12 月为前冬,1 月为隆冬,2 月为后冬。

表 2 1961—2022 年西南地区东部不同年代 异常转折年份数(单位:a)

Table 2 Anomalous transition years in the eastern Southwest China in different decades (1961-2022) (unit: a)

•	, ,	• •
年代	P1 型	P2 型
1960—1969 年	1	2
1970—1979 年	0	4
1980—1989 年	0	1
1990—1999 年	0	1
2000—2009 年	1	1
2010—2022 年	2	0

2.2 空间变化特征

从空间分布特征可以看出(图 2),在 P1 型年 份,虽然前冷后暖的特征明显,但冬季气温在区域内 总体以一致偏高为主(图 2d)。季内各月变化明显, 前冬为全区一致偏冷,尤其偏东地区偏冷程度更为 明显(图 2a);隆冬为空间分布不一致特征,其中重 庆中部和东北部偏冷,其余地区偏暖(图 2b);后冬 为全区一致偏暖,偏暖幅度甚至高于前冬的偏冷幅 度(图 2a,2c)。在 P2 型年份,前暖后冷特征明显, 但冬季气温以一致偏冷为主(图 2h)。前冬为全区 一致偏暖(图 2e),偏暖幅度大部地区超过 1℃;隆 冬为一致略偏冷,偏冷幅度大部地区在 0.5℃以内



图 2 P1 和 P2 型年份逐月平均和冬季气温距平及相应的偏差(P1-P2)合成图 Fig. 2 Monthly average and winter temperature anomalies for years in P1 and P2 types, and the composite analysis of corresponding difference (P1-P2)

(图 2f);后冬为全区一致显著偏冷,大部地区偏冷 幅度达到 1.5~2.5℃,偏冷程度甚至高于前冬偏暖 程度(图 2e,2g)。

对比 P1 型和 P2 型年份,从偏差(P1-P2)图中 可看出,冬季气温总体为显著的正偏差(图 21)。其 中,前冬为显著的负偏差(图 2i);隆冬和后冬则为明 显的正偏差,后冬正偏差达到 3℃以上,最为显著 (图 2j,2k)。可见无论是整个冬季还是季内各月, P1 型气温的变化幅度明显大于 P2 型,P2 型气温的 变化从冬季总体和季内各月气温偏离气候态的程度 要相对较弱。

3 西南地区东部前后冬气温异常转折 环流成因

3.1 500 hPa 高度场

为进一步探寻导致冬季气温发生异常转折的成

因,图3给出了发生异常转折时同期 500 hPa 位势 高度及距平场。

在 P1 型年份,前冬(图 3a)欧亚中高纬度地区 主要表现为西高东低(即西正东负)环流配置特征, 新地岛以南及乌拉尔山地区为显著正距平,最大距 平中心值超过 5 dagpm;贝加尔湖一日本海为显著 负距平,最大距平中心值超过-5 dagpm;孟加拉湾 地区和西太平洋副热带地区为相对弱负距平区。可 见前冬欧亚中高纬上空维持西高东低的单阻型环 流,乌拉尔山阻塞高压、贝加尔湖槽和东亚大槽均发 展强盛,我国大陆大部地区在负高度距平场控制之 下。在强盛的乌拉尔山阻塞高压作用下,不断南压 北方冷空气,西南地区东部处在贝加尔湖槽底部和 不断南下的强偏西气流交界处;强东亚大槽和相对 较弱的低纬度系统,进一步促使中高纬环流的经向 度加大,拉长了冷空气影响的持续时间,从而造成气 温显著偏低。隆冬(图 3d)乌拉尔山阻塞高压和东 亚大槽逐渐减弱,贝加尔湖槽较前冬严重北缩至贝

加尔湖及其以北地区,我国大陆包括西南地区东部 转为正距平控制,中高纬环流从显著的经向环流向 纬向环流转变。但低纬地区的系统变化相对较小, 印缅槽较前冬略有减弱,西太副高面积减小但强度 略有增强,总体变化不如中高纬地区的显著。后冬 (图 3g)中高纬地区西高东低的经向型环流完全消 失,调整为南高北低的纬向型环流,乌拉尔山地区为 负距平控制,乌拉尔山阻塞高压完全崩溃消失,贝加 尔湖槽和东亚大槽进一步减弱和北缩,我国大陆完 全在正距平控制下,且西南地区东部上空的正距平 进一步加强,最大距平中心值从隆冬的1 dagpm 增 强为3 dagpm;西太副高面积进一步减小。在此种 环流形势下,冷空气异常偏北,影响该地区的南下冷 空气显著减弱或消失,使其气温由前冬偏冷转为后 冬的明显偏暖。

在 P2 型年份,从前冬(图 3b)一隆冬(图 3e)— 后冬(图 3h),欧亚低纬度地区环流系统变化较小, 中高纬总体以纬向型环流为主,且表现出与 P1 型 年份相反的变化特征,即前冬欧亚大陆的大部地区 为明显的负距平,但新地岛一乌拉尔山附近和青藏 高原地区的负距平异常显著,最大距平中心值超过 -3 dagpm;贝加尔湖以东一东亚沿岸及日本海为 正距平区。可见乌拉尔山阻塞高压并没有建立,东 亚大槽强度偏弱,北方冷空气不利于南下影响西南 地区东部,可使得气温偏高。从隆冬到后冬,可以清 晰看到乌拉尔山阻塞高压和东亚大槽在隆冬开始发 展,后冬完全建立并加强,同时西南地区东部上游青 藏高原地区低值系统进一步加强,环流的经向度逐 步加大,从而有利于北方冷空气南下,使冬季气温出 现从前冬偏暖到后冬偏冷的明显转折。

总体来看,P1 和 P2 型年份 500 hPa 位势高度 场表现出相反的环流变化(图 3j,3k)。关键区环流 系统表现为,出现 P1 型时,乌拉尔山阻塞高压偏 强,贝加尔湖和东亚大槽偏强、偏北,青藏高原高度



注:绿色"+"为通过 0.10 显著性水平检验区域。

图 3 P1 和 P2 型年份逐月和冬季 500 hPa 位势高度(等值线,单位:dagpm)和距平(填色)及相应的偏差(P1-P2)合成图 Fig. 3 Monthly and winter geopotential heights at 500 hPa (contour, unit: dagpm) and their anomalies (colored) for years in P1 and P2 types, and the composite analysis of corresponding difference (P1-P2)

场偏高和西太副高偏强等特征;出现 P2 型时,乌拉 尔山阻塞高压、贝加尔湖槽和东亚大槽亦无明显加 强,青藏高原高度场显著偏低及西太副高偏弱。虽 然 P1(P2)型时冬季气温总体偏暖(冷),但造成季内 气温发生前冷(暖)后暖(冷)反位相转折的主要原因 是中高纬环流发生了明显的调整,呈相反的变化特 征。此外,青藏高原高度场也呈现类似变化特征,其 影响甚至超过了乌拉尔山阻塞高压的影响,需在冬 季气温预测中重点关注。

3.2 海平面气压场

海平面气压场也是影响冬季气温的重要因子之 一。从图 4 可以看出,无论是冬季总体还是季内各 月,主要差异集中在中高纬地区(图 4c,4f,4i,4l)。

在 P1 型年份,前冬(图 4a)西伯利亚—蒙古地 区被大范围正距平所控制,最大距平中心值超过 5 hPa,表现出蒙古高压异常偏强。西南地区东部冬 季气候往往受东亚冬季风的影响,当东亚冬季风偏 强(弱)时,冬季气温以偏低(高)为主(蒋兴文和李跃 清,2010)。而蒙古高压作为东亚冬季风最为重要的 影响系统,其偏强(弱)时,东亚冬季风则偏强(弱) (赵平和张人禾,2006),P1 型年份前冬正是由于蒙 古高压偏强(图 4a),西南地区东部受强东亚冬季风 控制,从而出现了气温的异常偏低;隆冬—后冬 (图 4d,4g)为蒙古高压由强转弱过程,至后冬(图 4g) 西伯利亚—蒙古地区完全为负距平控制,最大距平



图 4 P1 和 P2 型年份逐月和冬季海平面气压(等值线,单位:hPa)和距平(填色)及相应的偏差(P1-P2)合成图 Fig. 4 Monthly and winter sea-level pressures (contour, unit: hPa) and their anomalies (colored) for years in P1 and P2 types, and the composite analysis of corresponding difference (P1-P2)

中心值超过-3 hPa,蒙古高压异常偏弱,西南地区 东部在弱东亚冬季风的影响下,出现了异常偏暖转 折。从冬季平均来看,总体受到弱蒙古高压即弱东 亚冬季风的影响,气温以暖为主(图 4j)。

在 P2 型年份,海平面气压场特征从前冬 (图 4b)一隆冬(图 4e)一后冬(图 4h)表现出从弱到 强变化特征,其中前冬和后冬距平负中心和正中心 最大值超过±3 hPa,表明前冬东亚冬季风异常偏 弱,后冬东亚冬季风异常偏强,在这种形势影响下, 出现了前暖后冷的异常转折。整个冬季则在偏强的 蒙古高压影响下,总体以冷为主(图 4k)。

总体而言,当蒙古高压在冬季呈显著前强后弱 异常变化时,易出现 P1 型异常转折,相反易出现 P2 型异常转折。海平面气压场上蒙古高压的季节和季 节内变化是预测冬季气温重点关注另外一个因子。

3.3 200 hPa 纬向风

北半球横贯东亚一西太平洋上空部分的西风急

流是对流层上部持续存在的环流系统,其变率对东 亚区域气候有重要影响(朱抱真等,1990;毛睿等, 2007)。Lau and Boyle(1987)指出东亚冬季风强度 显著受东亚西风急流的影响,从而影响气温等。为 进一步了解冬季对流层上层西风急流等系统对冬季 气温及季内异常转折的影响,分析了该地区 P1 型 和 P2 型年份同期 200 hPa 纬向风分量(以下简称纬 向风)。由图 5 可见,发生异常转折时,纬向风主要 差异出现在中高纬西风急流区及其北侧地区(图 5c, 5f,5i,5l)。在 P1 型年份,影响西南地区东部的急流 大值中心主要位于 30°~40°N、95°~130°E 附近,最 大距平中心值超过 5 m · s^{-1} (图 5i),在季内,其中 心距平值呈现由强到弱的变化(图 5a,5d,5g),与气温 冷暖的变化相对应。前冬(图 5a)西风急流异常偏强 (最大距平中心值超过 5 m \cdot s⁻¹),急流轴在我国西 部一日本海一西北太平洋地区,大值中心位置位于 32°N 附近,急流北侧为东风或弱西风。已有研究认 为冬季中纬度高空西风急流是影响亚洲和太平洋地



注:绿色"+"为通过 0.10 显著性水平检验区域。

图 5 P1 和 P2 型年份逐月和冬季 200 hPa 纬向风(等值线,单位:m・s⁻¹)和 距平(填色)及相应的偏差(P1-P2)合成图

Fig. 5 Monthly and winter zonal winds at 200 hPa (contour, unit: $m \cdot s^{-1}$) and their anomalies (colored) for years in P1 and P2 types, and the composite analysis of corresponding difference (P1-P2)

区的重要大气环流系统,当冬季西风急流加强时,会 伴随着西伯利亚高压、东亚大槽等大尺度环流系统 的加强,东亚可能盛行冷、干性质的气流,频繁的冷 空气活动直接导致东亚地表温度偏低(杨素英等, 2005;Gong et al, 2001;Jhun and Lee, 2004),也用 与西风急流有关的经向风来定义东亚冬季风的强 度。可见在对流层高层西风急流与东亚冬季风紧密 关联,即西风急流的加强会影响东亚冬季风和东亚 大槽的加强,从而使前冬西南地区东部气温异常偏 低。从隆冬(图 5d)到后冬(图 5g),西风急流逐渐由 强转弱;隆冬急流大值中心区在 30°N 以北地区,西 南地区东部处于负距平控制之下,负距平值大部在 $-3\sim-1$ m·s⁻¹,急流北侧开始转为东风,气温由 冷开始向暖转折;后冬急流中心正、负距平中心进一 步北抬,负距平区控制在我国 35°N 以南地区,最大 距平中心值超过 $-5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,急流北侧以东风为主 且风速增强,西南地区东部完全处于弱的急流中心 控制之下,气温出现显著偏暖的转折。

在 P2 型年份,急流大值中心位置约位于 20°~ 30°N、75°~100°E附近,最大正距平中心值超过3m• s⁻¹(图 5k),中心位置较 P1 时段明显偏南且中心强 度也有所减弱,季内,纬向风的变化呈现与 P1 型相 反的由弱到强(距平由负到正)的变化(图 5b,5e, 5h)特征。其中,前冬西风急流中心区为显著负距 平(图 5b),主要存在 2 个负距平中心:一是位于我 国大陆 30°N 附近;二是位于日本海到西北太平洋 上空,最大距平中心值超过 $-3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。西南地区 东部正好位于弱西风急流中心区,致使前冬异常偏 暖。隆冬(图 5e)西风急流区加强,其西部中心区已 转为正距平中心控制,最大距平中心值超过3m• s⁻¹,西南地区东部处在正距平中心区域,其在东亚 冬季风由弱转强的进程中,气温也开始发生转折,由 前冬偏暖转为偏冷。后冬(图 5h)西风急流正距平 区进一步东扩到日本海一北太平洋上空,最大距平 中心值大部在1~3 m • s⁻¹,西南地区东部处在西 部正距平中心区内。在强东亚冬季风的影响下,气 温也发生异常偏冷的转折,由前冬异常偏暖转为后 冬异常偏冷。

总体而言,当冬季东亚西风急流中心位置相对 偏北,我国东部西风急流中心区呈北正南负的分布 型,西南地区东部处在偏弱的西风急流中心区时,冬 季气温总体偏暖(图 5j);反之冬季气温总体偏冷 (图 5k)。在季内,P1型时西风急流总体较 P2 型的 同期变化偏北,强度呈由强转弱的变化,急流北侧由 弱西风向弱东风变化;P2型时基本与之相反,但西 风急流北侧的纬向风变化相对较小。因此,对流层 上层西风急流区的位置、强度及其在季内的变化也 是预测冬季气温重点关注的一个因子,相对而言,其 南北位置对冬季气温的影响更明显,而其强度在季 内的变化对季内各月气温的影响更加明显。

4 西南地区东部前后冬气温异常转折 外源因子影响

由上可知,导致冬季气温异常转折的直接原因 是中高纬大气环流的异常;但大尺度大气环流的调 整和变化,通常与海温等外源因子相联系(韦玮等, 2014:2020)。为了解引起该地区冬季气温发生异常 转折时大气环流发生调整的外源影响因子,对冬季 气温发生 P1 型和 P2 型异常转折时的前期海温进 行分析(图 6)。由图 6 可见, P1 型和 P2 型前期夏、 秋季海温分布的主要差异在北大西洋、北太平洋、赤 道东太平洋和赤道南印度洋的部分地区(图 6c,6f, 6i),这些地区前期海温距平在 P1 型年份呈明显的 正距平分布,最大距平中心值超过 0.7℃(图 6g),在 P2 型年份大部分海域海温为明显的负距平,最大距 平中心值约为-0.6℃左右(图 6h)。P1 型和 P2 型 前期海温的这种特征在夏季(图 6a,6b)和秋季 (图 6d,6e)均较为明显,尤其在前期夏季最为明显, 秋季次之。表明当前期北大西洋(20°~65°N、0°~ 80°W)、赤道中东太平洋(4°S~4°N、120°~170°W) 和赤道南印度洋(5°~20°S、70°~110°E)地区海温 均偏高(低)时,西南地区东部冬季气温易出现前冷 (暖)后暖(冷)的 P1(P2)型异常转折(表 3),即当上 述区域前期均为正位相时,易发生 P1 型异常转折, 反之易发生 P2 型异常转折。与全球增暖变化一 致,海温的变化也具有明显的增暖特征,前文分析 P1 型主要出现在 2000 年以后, 而 P2 型主要出现在 2000年之前,相应 P1 型和 P2 型海温正、负距平的 变化在很大程度也反映了海温变化的增暖特征。因 此,本文对1961-2021年海温去除线性趋势后再对 典型年份进行合成分析(图略),可见上述关键区的 海温正、负距平特征依旧存在。这也可能是 P1 型 主要出现在 2000 年之前, P1 型主要出现在 2000 年 以后的可能原因之一,其年代际信号也是预测需要 重点关注一个因子。



图 6 P1 和 P2 型年份前期夏季、秋季和夏秋季平均前期海温(等值线,单位:C)和 距平(填色)及相应的偏差(P1-P2)合成图

Fig. 6 Average pre-seasonal sea surface temperature (contour, unit: °C), their anomalies (colored) for years in P1 and P2 types, and the composite analysis of corresponding difference (P1-P2)

表 3 北大西洋、赤道中东太平洋和赤道 南印度洋区域平均海温距平(单位:℃) Table 3 Average sea surface temperature

anomalies for the North Atlantic, equatorial

central-eastern Pacific, and equatorial

South Indian Ocean regions (unit: $^{\circ}C$)

时段	区域	P1 型	P2 型
	北大西洋	0.11	-0.57
夏季	赤道中东太平洋	0.11	-0.44
	赤道南印度洋	0.05	-0.47
	北大西洋	0.01	-0.47
秋季	赤道中东太平洋	0.06	-0.42
	赤道南印度洋	0.06	-0.30
夏、秋季	北大西洋	0.06	-0.52
	赤道中东太平洋	0.08	-0.43
	赤道南印度洋	0.06	-0.38

在海温影响冬季大气环流发生调整的机理方 面,已有研究认为北大西洋海温异常时会激发欧亚 型中纬度异常的遥相关波列(Gambo et al,1987; Li,2004;Liu et al,2014),且这种波列的反位相波列 与北大西洋热通量的季内变化密切关联(乔少博等, 2015)。其可能的物理过程为:北大西洋海温及热通 量受上游大气环流异常影响,出现了季节内转向,这 种变化又通过北大西洋下传,影响欧亚地区中高纬 度大气环流波列,造成其在前后冬出现季节调整从 而影响了东亚冬季气温的季节异常转折(祁莉和泮 琬楠,2021)。相关研究认为北大西洋海温偏高与北 大西洋由负转正的湍流热通量相对应,此时会激发 西西伯利亚、东亚上空的遥相关波列由"+-"向"-+"波列转变,东亚则易出现前冷后暖,反之则出现 前暖后冷的特征。从本文的分析同样可以看出,西 南地区东部冬季气温发生季节内反位相异常转折 时,北大西洋海温和大气环流的变化与这种变化特 征一致,只是海温的这种特征在前期夏季和秋季同 样存在,对冬季气温的预测有很好的指示意义。

针对赤道太平洋海温对冬季气温的影响,以往的研究认为,恩索事件可导致东亚冬季气温的季节 内波动(Moron and Plaut,2003;Geng et al,2017; 祁莉和泮琬楠,2021),认为宽窄恩索事件可能是影 响东亚冬季气温前后反位相的原因之一,即在厄尔 尼诺年,经向度较宽的海温有利于冬季气温出现前 暖后冷的转向,而较窄时则利于冬季气温出现前冷 后暖的转向。当拉尼娜事件发生时,情况却与厄尔 尼诺年相反。从前面的分析可知,对于西南地区东 部冬季气温,这种关系同样存在,且前期海温也有这 种变化关系,即在前期夏、秋季恩索监测关键区赤道 东太平洋海温出现小范围正异常时,冬季气温易出现前冷后暖的转折,而出现负异常时,冬季气温则出现相反的变化,这种关系在前期夏季表现得尤其明显。可以说前期夏、秋季海温是影响冬季气温的重要前兆信号之一。

在我国冬季气温前期印度洋海温关系的相关研 究方面,谭桂容和王腾飞(2014)认为前期热带印度 洋关键区海温异常与我国冬季气温关联的环流系统 有密切的关系,即前期夏季西印度洋海温偏高时,冬 季西伯利亚高压将偏强,有利于冬季风偏强和中国 冬季气温偏低,反之亦然,但对于印度洋海温与我国 冬季气温发生季节内转折之间的关系分析研究相对 较少。从上文分析发现,西南地区冬季气温出现 P1 或 P2 型反位相转折,与前期赤道东印度洋地区海 温的异常相对应,即当前期夏、秋季赤道东印度洋地 区海温异常偏暖时,西南地区东部易出现 P1 型转 折,而当该区域海温出现异常偏冷时,则易出现相反 的 P2 型转折。

5 结论和讨论

本文利用西南地区东部台站观测和 ERA5 再 分析等资料,分析了该地区冬季气温异常转折特征 及其成因,主要得到以下几点结论:

(1)1961 年以来,前冷后暖的 P1 型年份主要出 现在 2000 年以后,前暖后冷的 P2 型年份主要在 20 世纪 70 年代;进入 21 世纪 10 年代后,未出现过 P2 型变化,以 P1 型变化为主。

(2)在 P1 型年份,大气环流呈现乌拉尔山阻塞 高压偏强,贝加尔湖和东亚大槽偏强、偏北,高原高 度场偏高及西太副高偏强等特征;在 P2 型年份,乌 拉尔山阻塞高压不明显,贝加尔湖和东亚大槽亦无 明显偏强,高原高度场显著偏低,西太副高偏弱。高 原高度场为影响该地区冬季气温最为关键的环流系 统,甚至超过了乌拉尔山阻塞高压的影响。

(3)对流层上层西风急流等系统通过影响东亚 冬季风,进而影响该地区冬季气温及季内变化。在 季内变化过程中,在 P1 型年份,西风急流总体较 P2 型年份偏北,强度呈由强转弱的变化;P2 型年份基 本与之相反。

(4)中高纬西伯利亚一蒙古地区的蒙古高压是 影响该地区冬季气温发生 P1 型和 P2 型异常转折 的主要系统。当蒙古高压在冬季呈显著前强后弱异 常变化时,易出现 P1 型异常转折,与之相反,易出现 P2 型异常转折。

(5)该地区冬季气温季内发生异常转折时,与前 期北大西洋(20°~65°N、0°~80°W)、赤道中东太平 洋(4°S~4°N、120°~170°W)和赤道南印度洋(5°~ 20°S、70°~120°E)地区海温关系紧密,当前期夏季 和秋季均偏高(低)时,冬季气温易出现前冷(暖)后 暖(冷)的 P1(P2)型季节内异常转折。

本文针对西南地区东部冬季气温季内反位相异 常转折,分析了导致这种异常的大气环流及海洋外 源影响信号,但西南地区冬季气温的异常变化可能 还受到海洋以外,如海冰、积雪等其他外源因子的影 响且影响过程复杂多变,其确切的机理尚有许多不 确定性,还需要在今后的研究中不断进行深入分析, 为气候预测业务提供更加科学的参考。

参考文献

- 丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等,2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨 雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J]. 气象学报, 66(5):808-825. Ding Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al, 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming[J]. Acta Meteor Sin, 66(5):808-825(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).
- 简云韬,简茂球,杨崧,2017.前、后冬的东亚冬季风年际变异及其与 东亚降水的关系[J]. 热带气象学报,33(4):519-529. Jian Y T, Jian M Q, Yang S, 2017. Interannual variation of East Asian winter monsoon in early and late winter and its relationship with East Asian precipitation[J]. J Trop Meteor, 33(4):519-529(in Chinese).
- 蒋兴文,李跃清,2010. 西南地区冬季气候异常的时空变化特征及其 影响因子[J]. 地理学报,65(11):1325-1335. Jiang X W,Li Y Q, 2010. The spatio-temporal variation of winter climate anomalies in southwestern China and the possible influencing factors[J]. Acta Geogr Sin,65(11):1325-1335(in Chinese).
- 康丽华,陈文,魏科,2006. 我国冬季气温年代际变化及其与大气环流 异常变化的关系[J]. 气候与环境研究,11(3):330-339. Kang L H, Chen W, Wei K, 2006. The interdecadal variation of winter temperature in China and its relation to the anomalies in atmospheric general circulation[J]. Climatic Environ Res,11(3):330-339(in Chinese).

李想, 王永光, 2023. 2022/2023 年冬季北半球大气环流特征及对我

国天气气候的影响[J]. 气象,49(7):881-891. Li X, Wang Y G, 2023. Atmospheric circulation characteristics of Northern Hemisphere in winter 2022/2023 and its impact on weather and climate of China[J]. Meteor Mon,49(7):881-891(in Chinese).

- 马宁,李跃凤,琚建华,2011.2008 年初中国南方低温雨雪冰冻天气 的季节内振荡特征[J].高原气象,30(2):318-327. Ma N,Li Y F,Ju J H,2011. Intraseasonal oscillation characteristics of extreme cold, snowy and freezing rainy weather in southern China in early 2008[J]. Plateau Meteor,30(2):318-327(in Chinese).
- 马晓青,丁一汇,徐海明,等,2008.2004/2005 年冬季强寒潮事件与 大气低频波动关系的研究[J].大气科学,32(2):380-394. Ma X Q,Ding Y H,Xu H M,et al,2008. The relation between strong cold waves and low-frequency waves during the winter of 2004/ 2005[J]. Chin J Atmos Sci,32(2):380-394(in Chinese).
- 毛容,龚道溢,房巧敏,2007.冬季东亚中纬度西风急流对我国气候的 影响[J].应用气象学报,18(2):137-146. Mao R,Gong D Y, Fang Q M,2007. Influences of the East Asian jet stream on winter climate in China[J]. J Appl Meteor Sci,18(2):137-146(in Chinese).
- 祁莉,泮琬楠,2021.东亚气温前冬与后冬反相的变化特征及可能影响因子[J].大气科学,45(5):1039-1056.Qi L,Pan W N,2021.
 Variability of the phase reversal of the East Asia temperature from early to late winter and the possible influencing factors [J]. Chin J Atmos Sci,45(5):1039-1056(in Chinese).
- 乔少博,张志森,王晓娟,等,2015. 晚秋与后冬间欧亚遥相关型波列 反相现象探究[J]. 气象学报,73(4):711-724. Qiao S B,Zhang Z S,Wang X J,et al,2015. An investigation into the phase reversal of EU teleconnections from late autumn to the late winter[J]. Acta Meteorologica Sinica,73(4):711-724(in Chinese).
- 申红艳,温婷婷,封国林,等,2021.中国冬季气温季节内变率特征及 环流分析[J]. 气象,47(3):327-336. Shen H Y, Wen T T, Feng G L, et al, 2021. Characteristics and circulation analysis of intraseasonal variability of winter temperature in China[J]. Meteor Mon,47(3):327-336(in Chinese).
- 孙健,李栋梁,邵鹏程,等,2019. 中国冬季气温月际变化特征及其对 大气环流异常的响应[J]. 气象学报,77(5):885-897. Sun J,Li D L,Shao P C, et al, 2019. Inter-monthly variation of winter air temperature in China and its relation with atmospheric circulation anomalies[J]. Acta Meteor Sin, 77(5):885-897(in Chinese).
- 谭桂容,王腾飞,2014.2011/2012 年冬季中国气温异常的成因及前 兆信号[J].大气科学学报,37(1):65-74. Tan G R, Wang T F, 2014. Causes and precursors of the winter temperature anomaly in China in 2011/2012[J]. Trans Atmos Sci, 37(1):65-74(in Chinese).
- 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 D, He J H, Qi L, et al, 2015. Temperature characteristics of Eurasia in autumn and winter and its causes under global warming mitigation

[J]. J Meteor Sci, 35(5): 534-542(in Chinese).

- 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 L,Gao G,Zhang Q, 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]. Meteor Mon, 34(4):95-100(in Chinese).
- 韦玮,王林,陈权亮,等,2014.我国前冬和后冬气温年际变化的特征 与联系[J].大气科学,38(3):524-536.Wei W,Wang L,Chen Q L,et al,2014. Interannual variations of early and late winter temperatures in China and their linkage[J]. Chin J Atmos Sci, 38(3):524-536(in Chinese).
- 韦玮,王林,陈权亮,等,2020.我国前冬和后冬的划分及其气温的年际变异[J].大气科学,44(1):122-137.Wei W,Wang L,Chen Q L,et al,2020.Definition of early and late winter and associated interannual variations of surface air temperature in China[J]. Chin J Atmos Sci,44(1):122-137(in Chinese).
- 武丰民,何金海,祁莉,2014. 北极海冰消融及其对欧亚冬季低温影响 的研究进展[J]. 地球科学进展,29(8):913-921. Wu F M, He J H, Qi L,2014. Arctic sea ice declining and its impact on the cold Eurasian winters: a review[J]. Adv Earth Sci,29(8):913-921(in Chinese).
- 吴古会,彭芳,崔庭,等,2012.2011年冬季贵州低温雨雪冰冻天气的 成因分析[J]. 气象,38(3):291-299. Wu G H,Peng F,Cui T, et al,2012. Analysis of Guizhou's rare freezing catastrophic weather in winter 2011[J]. Meteor Mon,38(3):291-299(in Chinese).
- 杨双艳,武炳义,张人禾,等,2014. 冬季欧亚中高纬大气低频振荡的 传播及其与欧亚遥相关型的关系[J]. 大气科学,38(1):121-132. Yang SY,Wu BY,Zhang RH,et al,2014. Propagation of low-frequency oscillation over Eurasian mid-high latitude in winter and its association with the Eurasian teleconnection pattern [J]. Chin J Atmos Sci,38(1):121-132(in Chinese).
- 杨素英,王谦谦,孙凤华,2005.中国东北南部冬季气温异常及其大气 环流特征变化[J].应用气象学报,16(3):334-344. Yang S Y, Wang Q Q,Sun F H,2005. The winter air temperature anomalies and the changes of the atmosphere circulation characteristics in southern Northeast China[J].J Appl Meteor Sci,16(3):334-344(in Chinese).
- 叶钊,罗孳孳,唐红玉,等,2011.西南地区冬季气温时空特征分析
 [J].西南大学学报(自然科学版),33(9):113-119.Ye Z,Luo Z
 Z,Tang H Y, et al,2011. Analysis of spatial-temporal features of winter temperature in southwestern China[J].J Southwest
 Univ (Nat Sci Ed),33(9):113-119(in Chinese).
- 赵平,张人禾,2006. 东亚-北太平洋偶极型气压场及其与东亚季风年 际变化的关系[J]. 大气科学,30(2):307-316. Zhao P, Zhang R H,2006. Relationship of interannual variation between an eastern Asia-Pacific dipole pressure pattern and East Asian monsoon [J]. Chin J Atmos Sci,30(2):307-316(in Chinese).

- 朱抱真,丁一汇,罗会邦,1990.关于东亚大气环流和季风的研究[J]. 气象学报,48(1):4-16. Zhu B Z, Ding Y H, Luo H B, 1990, A review of the atmospheric general circulation and monsoon in East Asia[J]. Acta Meteor Sin,48(1):4-16(in Chinese).
- 朱毓颖,江静,2013. 中国冬季持续性低温事件的低频特征以及中低 纬大气低频振荡对其的影响[J]. 热带气象学报,29(4):649-655. Zhu Y Y,Jiang J,2013. The intraseasonal characteristics of wintertime persistent cold anomaly in China and the role of low frequency oscillation in the low latitude and midlatitude[J]. J Trop Meteor,29(4):649-655(in Chinese).
- Gambo K,Lu L,Li W J,1987. Numerical simulation of Eurasian teleconnection pattern in atmospheric circulation during the Northern Hemisphere winter[J]. Adv Atmos Sci,4(4):385-394.
- Geng X,Zhang W J,Stuecker M F,et al,2017. Strong sub-seasonal wintertime cooling over East Asia and Northern Europe associated with super El Niño events[J]. Sci Rep,7(1):3770.
- Gong D Y, Wang S W, Zhu J H, 2001. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation [J]. Geophys Res Lett, 28(10): 2073-2076.
- IPCC, 2021. Summary for policymakers[M]// Masson-Delmotte V, Zhai P,Pirani A, et al. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge:Cambridge University Press: 3949.
- Jhun J G, Lee E J, 2004. A new east Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon[J]. J Climate,

17(4):711-726.

- Lau K M, Boyle J S, 1987. Tropical and extratropical forcing of the large-scale circulation: a diagnostic study[J]. Mon Wea Rev, 115 (2):400-428.
- Li J P, Zheng F, Sun C, et al, 2019. Pathways of influence of the Northern Hemisphere mid-high latitudes on East Asian climate: a review[J]. Adv Atmos Sci, 36(9):902-921.
- Li S L,2004. Impact of Northwest Atlantic SST anomalies on the circulation over the Ural Mountains during early winter[J]. J Meteor Soc Japan Ser II,82(4):971-988.
- Liu Y Y, Wang L, Zhou W, et al, 2014. Three Eurasian teleconnection patterns: spatial structures, temporal variability, and associated winter climate anomalies [J]. Climate Dyn, 42 (11/12): 2817-2839.
- Luo X, Zhang Y C, 2015. The linkage between upper-level jet streams over East Asia and East Asian winter monsoon variability[J]. J Climate, 28(22):9013-9028.
- Moron V, Plaut G, 2003. The impact of El Niño-southern oscillation upon weather regimes over Europe and the North Atlantic during boreal winter[J]. Int J Climatol, 23(4): 363-379.
- Outten S D, Esau I, 2012. A link between arctic sea ice and recent cooling trends over Eurasia[J]. Climatic Change, 110(3): 1069-1075.
- Serreze M C,Barry R G,2011. Processes and impacts of Arctic amplification: a research synthesis[J]. Global Planet Change,77(1/ 2):85-96.

(本文责编:何晓欢)