

2022 年春季中国南方极端低温的可能机制分析

卢楚莹^{1,2}, 祁莉^{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 极端低温事件往往给居民生活、农作物生长等造成严重影响, 因此对极端低温事件成因的分析十分重要。本文利用 1980-2022 年 CN05.1 气温观测数据和 ERA5 再分析数据, 分析了 2022 年 5 月发生在中国南方 (20°N-30°N, 100°E-122°E) 极端低温事件的时空分布特征, 揭示了影响此次极端低温事件的环流背景和可能因子。结果表明, 此次极端低温事件强度大, 与 1980-2022 年 5 月平均态相比, 气温偏低超过 3 个标准差, 低温持续时间长达 31 天, 影响范围超过 150 万平方千米, 为 1980 年以来最强的一次极端低温事件。进一步分析发现, 在对流层中层欧亚中高纬存在显著波列, 中国南方上空为异常低压控制, 使得中高纬冷空气深入南下。与此同时, 赤道中东太平洋上 La Niña 的重新发展使对流抑制中心偏西偏强, 其激发的 Rossby 波在菲律宾以东形成一个异常反气旋环流, 该异常反气旋西侧的南风将海洋上的暖湿气流向中国南方输送, 与冷空气汇合, 产生对流, 显著减少了地表净短波辐射, 使气温更加偏低。因此, 2022 年 5 月中国南方极端低温是与冷空气活动相关的环流和菲律宾反气旋共同作用的结果, 以这两个因子构建拟合方程, 所再现的气温可达到-2 个标准差。

关键词 极端低温, 异常反气旋, La Niña

文章编号 2024075B

中图分类号

文献标识码

Doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

Analysis of potential mechanism of extreme low temperature in South China during the spring of 2022

Lu Chuying^{1,2}, Qi Li^{1,2*}

1 State Key Laboratory of Climate System Prediction and Risk Management/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

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

Abstract Extreme low temperature events often lead to significant impacts on residents' lives and crop growth. Therefore, it is important to analyze the causes of extreme low temperature events. Based on the temperature observation data of CN05.1 and reanalysis data of ERA5

收稿日期: 2024-07-11; 网络预出版日期:

作者简介 卢楚莹, 女, 2000 年出生, 硕士研究生, 主要从事季风和海—陆—气相互作用研究。Email: 1162867317@qq.com

通讯作者 祁莉, 女, 1981 年出生, 教授, 主要从事季风和海—陆—气相互作用研究。E-mail: qili@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2022YFF0801602

Funded by National Key Research and Development Program on Monitoring (Grant 2022YFF0801602)

during the period of 1980-2022, this study focuses on the spatial and temporal distribution characteristics of the extreme low temperature event that occurred in the South China (20°N-30°N, 100°E-122°E) in May 2022 and reveals the circulation background and possible factors affecting this event. The analysis reveals that the intensity of this extremely low temperature event is strong, the temperature is lower than 3 standard deviations compared with the average state of May 1980-2022. Besides, the cold lasted as long as 31 days and affected more than 1.5 million square kilometers. Therefore, it was the strongest extreme low temperature event since 1980. Further analysis shows that there was a significant wave train in the middle troposphere over the middle and high latitudes of Eurasia, and also an anomalous low pressure over South China, which made the cold air in the middle and high latitudes move deep south. At the same time, the re-intensified La Niña in the equatorial Middle East Pacific made the convective suppression center more westerly and stronger, and the related Rossby wave formed an anomalous anticyclone in the east of the Philippines. Then the southerly wind on the west side of this anticyclone transported warm and humid air from the ocean to South China, converged with the cold air to generate convection which significantly reduced the surface net shortwave radiation and made the temperature lower. Therefore, the extremely low temperature event in South China in May 2022 is the result of the joint action of the circulation related to cold air activity and the Philippine anticyclone. Using these two factors to construct the fitting equation, the reproduced temperature can reach -2 standard deviation.

Keywords: Extreme low temperature, Anomalous anticyclone, La Niña

1 引言

在全球变暖的背景下气候变化加剧, 其中, 极端低温事件的频繁发生对人体健康及农作物的生长等都具有严重的影响 (Liu et al., 2006; 吴绍洪和尹云鹤, 2012; Screen et al., 2015; Sisco et al., 2017)。前人对于极端低温事件的研究多集中于冬季 (Jeong et al., 2006; Zhou et al., 2008; Zhang et al., 2011; 王晓娟等, 2012; 秦明月和李双林, 2020; 张弛等, 2021), 而春季作为农作物播种和生长的关键时期, 极端低温的发生将导致农作物生长时间延长甚至死亡, 减少农作物产量, 进而造成严重的经济损失 (孙杭生和徐芑, 2009)。

在 2022 年 5 月, 中国南方地区 (20°N-30°N, 100°E-122°E) 发生了一次非常强的极端低温事件, 此次低温事件影响范围广, 覆盖了四川、广东、广西、浙江等多个省份, 与 1980-2022 年 5 月的气候态相比气温明显偏低, 部分地区气温偏低达到 3°C 以上, 低温持续时间也达到 31 天, 是一次破纪录的持续性极端低温。因此, 对此次极端低温的可能形成原因的分析是十分必要的, 这将有助于我们进一步理解极端天气的形成, 也可对极端温度的预报预测提供帮助。

中国南方地区地处热带和副热带, 大量研究表明它的气温变化与 ENSO (El Niño-Southern Oscillation) 密切相关 (陶诗言和张庆云, 1998; Alexander et al., 2002; Yang et al., 2007; 何溪澄等, 2008; Zhang et al., 2016)。ENSO 可以通过西北太平洋上的异常反气旋/气旋影响中国气温 (Wang et al., 2000)。在 El Niño 年冬季, 中国东部气温易偏暖, La Niña 年气温则相反 (李崇银, 1989; Zhang et al., 1996), 因此, ENSO 显著影响中国冬季的极端低温事件 (Chen et al., 2013), 其影响范围主要位于中国东南部, La Niña 年有利于中国东南部地区冬季极端低温事件的发生。ENSO 对中国气温的影响还可以持续到次年, El Niño 次年除夏季外全国大部分地区以偏暖为主, 春季西南地区偏暖程度明显加

强（刘永强和丁一汇，1995）。除了太平洋，北大西洋位于东亚地区的上游，其三极型海温异常可以激发波列影响东亚地区的大气环流，从而使中国发生气候异常（张霏燕和徐海明，2011；梁静等，2023）。

与此同时，东亚冬季风（郭其，1994；Gong et al., 2001；Liu et al., 2021）、乌拉尔阻塞高压（Wang et al., 2017）、东亚大槽（王遵娅和丁一汇，2006；黄小梅等，2013）、西伯利亚高压（Gong and Ho, 2002；Zhang et al., 2012；Liu and Zhu, 2020；李言蹊和陈海山，2021）和高空急流（Gong and Ho, 2003；Yang et al., 2004）等环流系统均可以通过影响中高纬地区的冷空气，使中国气温偏低。以外，北极涛动（Arctic Oscillation, AO）和北大西洋涛动（North Atlantic Oscillation, NAO）也可以对北半球多个地区的天气、气候产生影响（龚道溢和王绍武，2003；丁园园等，2010；Lim and Kim, 2012），它们可以通过影响西伯利亚高压和高空急流等环流系统进而影响中国气温（武柄义和黄荣辉，1999；Wu and Wang, 2002；朱红霞等，2019）。AO负位相有利于乌拉尔山阻塞高压和东亚大槽的发展和维持，使冷空气向南爆发（Wang et al., 2017），因此，AO与中国东北地区春季极端低温事件存在显著的负相关关系（王冀等，2007；尹姍等，2013；Wang et al., 2022）。NAO则可以影响中国南方春季的气温和降水（邵太华和张耀存，2011；Zhou et al., 2013）。

在全球变暖加剧的背景下，20世纪中期以来中国东部极端高温事件显著增加，极端低温事件则在明显减少（Wang et al., 2012；Zhou et al., 2016；Yin et al., 2017）。但是，近些年来中国东部极端低温事件在春季的频次和强度却有所增加（王晓娟等，2012；艾雅雯等，2020），并且中国极端低温事件的变率在春、秋两季最大（任福民和翟盘茂，1998）。在此背景下，2022年5月在中国南方地区发生了极端偏强的极端低温事件，因此，十分有必要分析此次极端低温事件的时空特征及其发生的可能原因，为中国极端低温的预报提供有效思路。

2 资料与方法

2.1 资料

本文所使用的资料有：（1）CN05.1 格点化观测数据集提供的逐日和逐月平均气温和平均降水，空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ （吴佳和高学杰，2013）；（2）欧洲中心天气预报中心（ERA5）提供的逐小时再分析资料，所选具体要素为：水平风场、垂直风场、位势高度场、温度场等，水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ （Hersbach et al., 2020）；（3）英国 Hadley 中心提供的全球逐月海表温度资料（HadISST1.1），水平分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ （Rayner, 2003）；（4）NOAA 提供的全球逐月向外长波辐射（Outgoing Longwave Radiation, OLR）资料（Liebmann B and Smith C A, 1996），分辨率分别为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。文中所选气候态为 1980-2022 年平均，为了去除天气尺度的影响，所有日数据都进行了七天滑动平均。所有数据均去除了全球变暖的趋势。

文中使用 Niño 3.4 指数量化 ENSO 强度，即 $5^{\circ}\text{N}-5^{\circ}\text{S}$, $120^{\circ}\text{W}-170^{\circ}\text{W}$ 区域平均的海表温度异常（Barnston et al., 1997）。La Niña 事件的选取标准参考了美国国家气候预测中心（NOAA CPC）对 ENSO 事件的定义，将经过 3 个月滑动平均的 Niño 3.4 指数小于等于 -0.5°C 且持续 5 个月以上定义为一次 La Niña 事件，共选出了 16 次 La Niña 事件（1983，1984，1988，1995，1998，1999，2000，2005，2007，2008，2010，2011，2016，2017，2020，2021）。

2.2 温度方程诊断

温度的变化受温度平流项、垂直运动项和非绝热加热项的影响。为了分析此次极端低温事件的可能影响因子，本文对 P 坐标系下的温度方程进行诊断（Yanai et al., 1973）：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -V \cdot \nabla T + \omega \sigma + \frac{Q}{C_p} \quad (1)$$

$$\sigma = -\frac{\partial T}{\partial p} + \frac{RT}{C_p P} \quad (2)$$

$$Q = Q_{nlwrf} + Q_{nswrf} + Q_{lhfl} + Q_{shfl} \quad (3)$$

将变量分解为平均场和异常场：

$$X = \bar{X} + X' \quad (4)$$

对（1）式右边各项分解为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & (-\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} - \bar{u}' \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} - \bar{u} \frac{\partial T'}{\partial x} - \bar{u}' \frac{\partial T'}{\partial x}) + (-\bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} - \bar{v}' \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} - \bar{v} \frac{\partial T'}{\partial y} - \bar{v}' \frac{\partial T'}{\partial y}) \\ & + (-\frac{\partial \bar{T}}{\partial p} + \frac{R\bar{T}}{C_p P})\bar{\omega} + (-\frac{\partial \bar{T}}{\partial p} + \frac{R\bar{T}}{C_p P})\omega' + (-\frac{\partial T'}{\partial p} + \frac{RT'}{C_p P})\bar{\omega} + (-\frac{\partial T'}{\partial p} + \frac{RT'}{C_p P})\omega' \\ & + \frac{\bar{Q} + Q'}{C_p} \end{aligned} \quad (5)$$

其中， $\bar{X}$ 表示各项变量的气候平均态（1980-2022 年平均）， X' 表示各项变量相对于气候态的扰动场， u 、 v 、 t 和 ω 各项分别为纬向风、经向风、温度和垂直速度项， σ 为静力稳定度， C_p 表示定压比热容， R 表示气体常数。 Q_{nlwrf} 、 Q_{nswrf} 、 Q_{lhfl} 和 Q_{shfl} 分别表示地表净长波辐射、净短波辐射、潜热通量和感热通量。

本文使用了诊断分析、相关分析、回归分析和 t 检验等方法。此外，本文还将关键影响环流系统与中国南方气温建立拟合曲线，通过多元一次线性回归方法，确定各影响系统的权重系数。

3 2022 年 5 月中国南方极端低温事件的时空特征

图 1a 给出了 2022 年 5 月中国气温距平的空间分布图，与 1980-2022 年 5 月的气候态相比，整个中国东部地区气温呈现明显的负距平，其中温度负距平大值区位于中国南方（图 1a 中的黑色方框，20°N-30°N，100°E-122°E）。此次低温事件强度大，整个中国南方地区气温偏低 2℃，部分地区气温偏低可达 3℃以上。表 1 给出了中国南方地区在 1980-2022 年中最强的五次低温事件，并以低温事件中达到的最低温度距平进行排序，通过与其他低温事件对比可以发现，在 2022 年的低温事件中温度距平达到 -2℃以上，是排名第二的 1999 年的两倍，也是 1980 年以来唯一气温超过 -2 个标准差的低温事件。

从 5 月平均的气温（图 2a）来看，2022 年 5 月气温为历年以来最低，与气候态相比已经达到 -3 个标准差。并且从中国南方地区 1980-2022 年 5 月气温的 EOF 分析结果来看（图 3），此次极端低温的空间分布（图 1a）与 EOF 第一模态的空间模态（图 3a）十分接近，时间系数 PC1（图 3b）在 2022 年达到 2 以上，为 1980-2022 年的最大值。

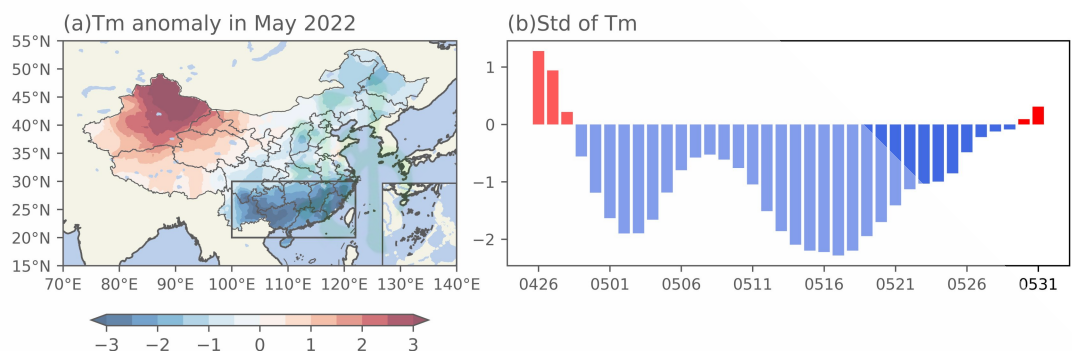


图 1 2022 年 (a) 5 月平均温度距平 (阴影, $^{\circ}\text{C}$) 的空间分布以及 (b) 中国南方区域 (图 a 中黑色方框区域, 20°N - 30°N , 100°E - 122°E) 平均温度 (柱状) 的逐日标准化序列

Fig. 1 (a) Mean temperature anomaly in May 2022 (shading, unit: $^{\circ}\text{C}$) and (b) the daily standardized series of the mean temperature (bar) in South China (black box in figure 1a, 20°N - 30°N , 100°E - 122°E).

表 1 中国南方 5 月低温事件排序

Table. 1 Ranking of low temperature events in May in South China

序号	时间	温度距平 (单位: $^{\circ}\text{C}$)	持续时间 (单位: 天)	起止日期	影响范围 (降温超过 2°C , 单位: 万平方千米)
1	2022	-2.26	31	4.28-5.29	150
2	1999	-1.14	28	4.27-5.13 5.21-5.31	5
3	1981	-1.10	21	5.11-5.31	0
4	1990	-1.02	19	5.13-5.31	15
5	1984	-0.90	15	5.14-5.28	0

注: 1. 本表按中国南方在低温事件中达到的最低温度距平进行排序。2. 1999 年 5.14-5.20 期间气温短暂回升, 使得该年低温过程被分为 4.27-5.13 和 5.21-5.31 两段, 但两段的累加天数仍少于 2022 年低端低温事件。

除了强度最大, 此次事件中低温的持续时间也是最长的。根据 2022 年 5 月中国南方区域平均的逐日气温的演变 (图 1b), 此次低温事件长达 31 天。与其他年份相比 (图 2b), 2022 年 5 月的低温事件持续时间最长, 比强度排名第二的 1999 年长 3 天 (表 1), 日气温偏低也更显著, 超过 -1 个标准差的低温天气也达到了 10 天以上。在影响范围上, 2022 年 5 月的低温事件中, 气温偏低超过 2°C 的面积达到 150 万平方千米 (表 1), 影响范围远超过其他的低温事件。综上所述, 2022 年 5 月的低温事件是中国南方地区 1980 年以来强度最大、持续事件最长、影响范围最广的一次极端低温事件。

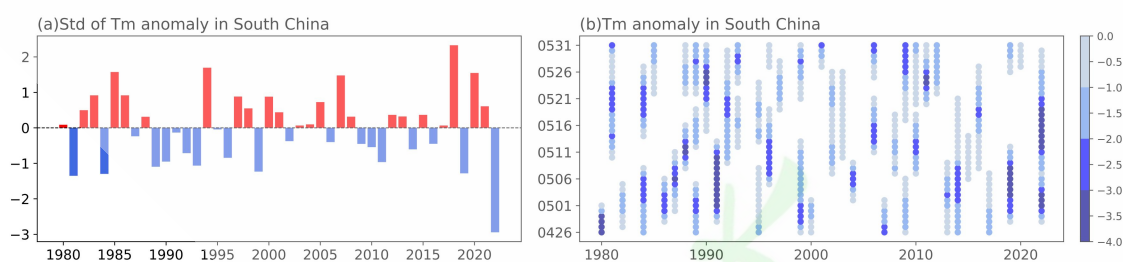


图 2 1980-2022 年中国南方区域平均的 (a) 5 月气温 (柱状) 标准化序列以及 (b) 日平均气温低于气候态 (1980-2022 年平均) 的低温事件 (去除持续时间小于 5 天的事件) 散点图, 散点颜色表示该日气温距平, 单位: $^{\circ}\text{C}$

Fig. 2 (a) Standardized series of monthly mean temperature (bar) in South China during May 1980-2022 and (b) scatter plot of low temperature events (excluding events with duration less than 5 days) with daily mean temperature below the climate state (1980-2022). The scatter color indicates the daily temperature anomaly, unit: °C.

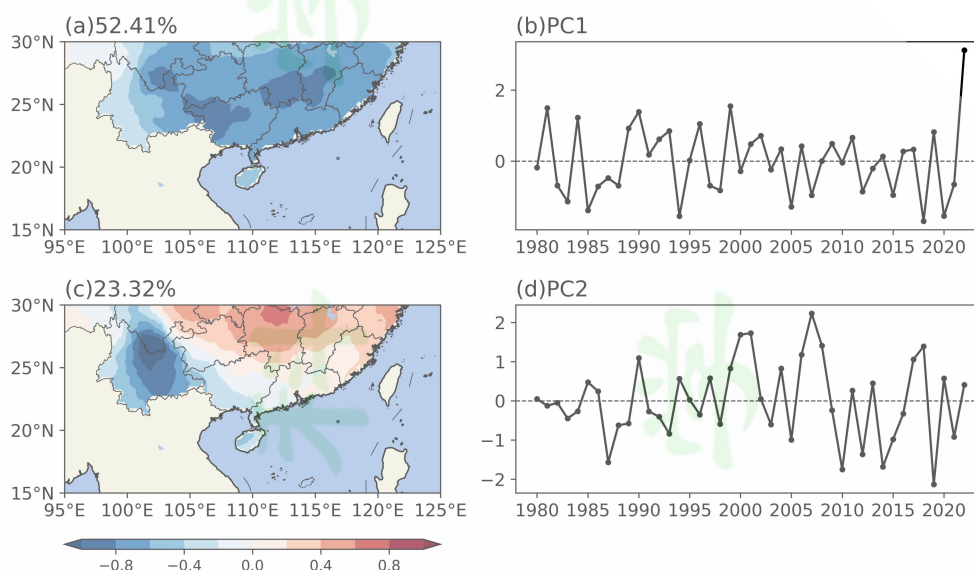


图 3 1980-2022 年 5 月中国南方平均气温 EOF 分解的 (a, b) 第一模态和 (c, d) 第二模态的 (a, c) 空间场和 (b, d) PC 序列

Fig. 3 (a, c) Spatial distribution and (b, d) PC series of (a, b) the first mode and (c, d) the second mode of EOF decomposition of average temperature in May in South China from 1980 to 2022.

4 此次低温事件的可能原因

上文分析表明 2022 年 5 月发生在中国南方地区的低温过程为该地区 1980 年以来最极端的低温事件，那么，是什么因子造成了如此极端的低温？对 2022 年 5 月中国南方地区 850hPa 气温进行温度方程诊断，如图 4 所示，图中只给了公式 (5) 右侧与异常项有关的各项数值，略去了气候态各项，即 $-\bar{u}\partial\bar{u}/\partial x$ 、 $-\bar{v}\partial\bar{v}/\partial y$ 、 $(-\partial\bar{T}/\partial p + R\bar{T}/C_p P)\bar{\omega}$ 和辐射项各项的气候平均值。从诊断的结果来看（图 4），大部分的扰动项均有利于低温事件的产生，其中与经向风扰动有关的两项（ $-v'\partial\bar{T}/\partial y$ 和 $-v'\partial T'/\partial y$ ）与净短波辐射异常项（ Q_{nswrf}' ）是此次低温事件的主要贡献者。

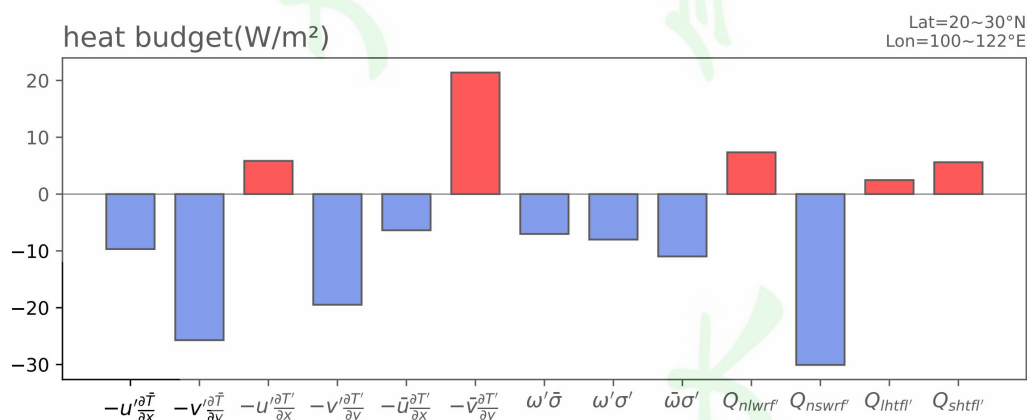


图 4 对 2022 年 5 月中国南方地区 850hPa 气温进行温度方程诊断的各项分布，单位：W/m²

Fig. 4 The distributions of temperature equation budget of 850 hPa in South China in May 2022, unit: W/m².

图 5 给出了 $-v'\partial\bar{T}/\partial y$ 、 $-v'\partial T'/\partial y$ 和 Q_{nswrf} 三项在 2022 年 5 月平均的空间分布及其在中国南方的逐日演变。在空间场上，三项均在中国南方地区表现为明显负异常，其中， $-v'\partial\bar{T}/\partial y$ 在西南地区有明显的异常大值中心（图 5a），中心值超过 -120W/m^2 ，与气温异常大值中心位置相同；而 $-v'\partial T'/\partial y$ 对低温的贡献主要位于南部沿海地区（图 5b），净短波辐射负异常则较均匀的涵盖了整个南方地区（图 5c），这一项与降水密切相关。三项在 2022 年 5 月的逐日变化（图 5d）与气温随时间的变化（图 1b）趋势一致，均在 5 月 10 日-18 日之间达到低点。因此， $-v'\partial\bar{T}/\partial y$ 、 $-v'\partial T'/\partial y$ 和 Q_{nswrf} 是造成此次低温的主要原因。 $-v'\partial\bar{T}/\partial y$ 和 $-v'\partial T'/\partial y$ 与偏强的北风带来的冷空气有关， Q_{nswrf} 则与降水密切相关，降水造成云层偏多，减少地表的净短波辐射。

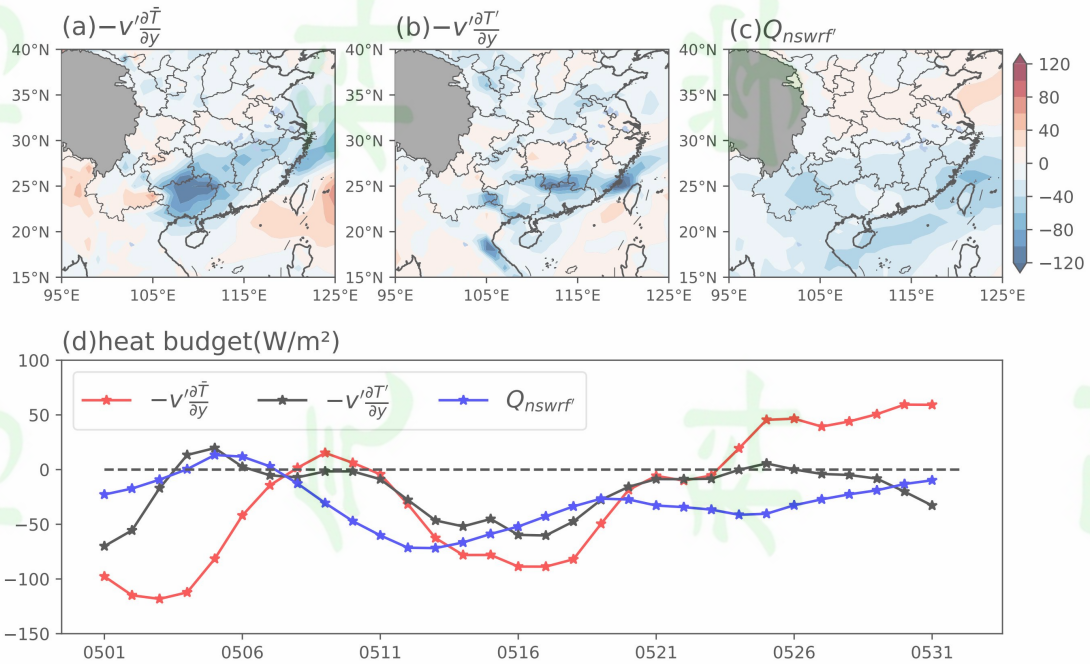


图 5 温度方程诊断中 (a) $-v'\partial\bar{T}/\partial y$ 、(b) $-v'\partial T'/\partial y$ 、(c) Q_{nswrf} 在 2022 年 5 月的空间分布图及 (d) 三项在中国南方区域平均的逐日演变，红线、黑线和蓝线分别表示 $-v'\partial\bar{T}/\partial y$ 项、 $-v'\partial T'/\partial y$ 项和 Q_{nswrf} 项，单位： W/m^2

Fig. 5 The spatial distributions of (a) $-v'\partial\bar{T}/\partial y$, (b) $-v'\partial T'/\partial y$ and (c) Q_{nswrf} in the temperature equation budget in May 2022 and (d) the daily evolution of the average of three items in South China, the red line, black line and blue line respectively represent $-v'\partial\bar{T}/\partial y$, $-v'\partial T'/\partial y$ and Q_{nswrf} , unit: W/m^2 .

a 中高纬波列的作用

上述温度方程诊断表明与经向风异常相关的 $-v'\partial\bar{T}/\partial y$ 项和 $-v'\partial T'/\partial y$ 项为本次低温的贡献大值项，本次极端低温与冷空气活动密切相关。图 6a 给出了 2022 年 5 月的 500 hPa 环流场，欧亚中高纬盛行明显的经向环流，有一组异常波列横跨欧亚大陆，这有利于中高纬的冷空气向中国南方地区输送（张庆云和陶诗言，1998）。其中，欧洲东部地区上空为异常气旋，西伯利亚地区上空为一个强大的异常反气旋。并且，中国南方地区气温与 500 hPa 位势高度场的相关系数（图 6b）也显示欧洲东部地区为显著的负相关中心（h1: 35°N - 65°N , 30°E - 70°E ），西伯利亚地区为显著的正相关中心（h2: 35°N - 65°N , 70°E - 120°E ），这表

明位于中国区域上游的这两个环流系统可以影响冷空气的活动，进而影响中国南方气温。同时，中国南方气温也与其局地的 500 hPa 位势高度（h3：15°N-35°N，100°E-130°E）呈现明显的负相关，相关系数可以达到-0.462。

如果仅以欧亚中纬度两个关键区（即 h1 和 h2）的 500 hPa 位势高度为因子构建指数，该指数和中国南方气温的相关系数为 0.461。然而，如果同时考虑中国南方上空局地异常低压（即 h3），以这三个区域位势高度异常为因子，并通过多元一次线性回归确定各个区域的系数，构建北方指数 NI：

$$NI = 0.24 \times h1 - 0.16 \times h2 + 0.60 \times h3 \quad (6)$$

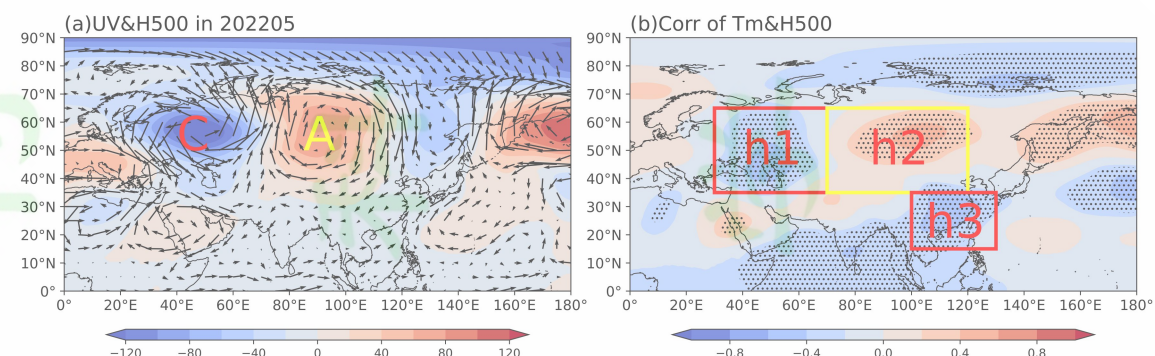


图 6 (a) 2022 年 5 月的位势高度异常场（阴影，gpm）和风场异常（箭头，m/s）。(b) 中国南方气温与同期 500 hPa 位势高度场的相关系数（阴影），打点表示通过 90% 的显著性检验。红色和黄色方框分别标出异常气旋和异常反气旋的位置，A 和 C 代表异常反气旋和异常气旋

Fig. 6 (a) The geopotential height anomalies (shading, gpm) and wind anomalies (vectors, m/s) in May 2022. (b) The correlation coefficient between the temperature in South China and the 500 hPa geopotential height in the same period (shading), dots indicate the regions are significant at the 90% confidence level. The red and yellow boxes indicate the locations of anomalous cyclones and anomalous anticyclones respectively, the A and C represent anomalous anticyclones and anomalous cyclones.

如图 7b 所示，北方指数 NI 与中国南方气温的相关性更显著，两者相关系数达到了 0.526（通过了 99% 的显著性检验）。北方指数 NI 与 5 月气温显著相关的区域（图 7a）也与 2022 年 5 月中国南方极端低温的区域基本一致。因此，与冷空气活动相关的环流，即欧亚中高纬的异常气旋和反气旋以及中国南方的局地异常气旋的接力作用，使得冷空气深入南下，偏强的北风异常造成 $-v'\partial\bar{T}/\partial y$ 项和 $-v'\partial T'/\partial y$ 项异常偏强（图 8），导致了本次中国南方极端低温的发生。

然而，从图 7b 的散点图看，虽然 NI 指数与中国南方 5 月气温的相关性良好，但 2022 年的观测气温明显偏离了两者的拟合曲线。以北方指数 NI 为因子建立拟合曲线，所再现的温度明显偏弱，只能达到-1 个标准差（图 7c），弱于观测的-3 个标准差。这表明，除了中高纬冷空气的影响以外，2022 年 5 月极端低温事件还有其他因子的贡献。

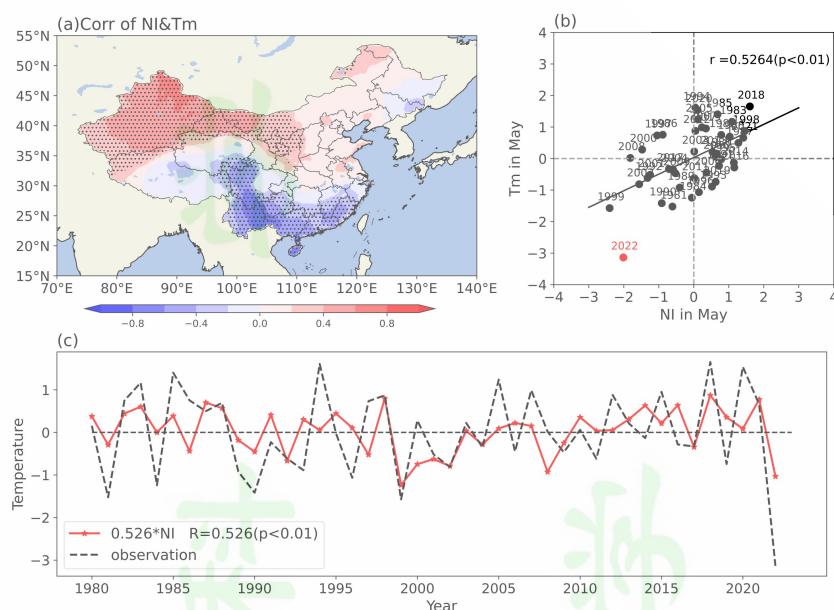


图 7 (a) 北方指数 NI 与同期 5 月气温的相关系数 (阴影), 打点表示通过 90% 的显著性检验。(b) 北方指数 NI 与 5 月中国南方气温的散点图。(c) 用北方指数 NI 拟合的中国南方气温 (红色实线) 和观测气温 (黑色虚线) 的标准化时间序列

Fig. 7 (a) The correlation coefficient (shading) between the NI Index and the temperature in the same period, the dots indicate the regions are significant at the 90% confidence level. (b) Scatter plot between the NI Index and standardized temperature in South China in May. (c) Standardized time series of observed temperature (dashed black line) and temperature in South China fitted with the NI index (solid red line).

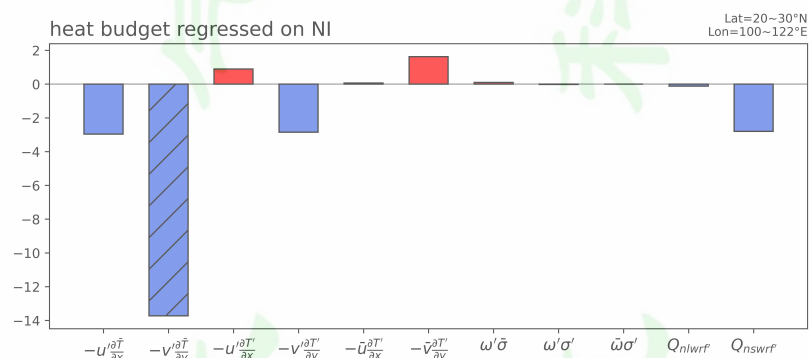


图 8 将北方指数 NI 回归到中国南方温度方程诊断的各项, 斜线为通过的 90% 显著性检验, 单位: W/m^2

Fig. 8 Regressed the distributions of the temperature equation budget in South China onto the NI Index, the diagonal lines are significant at the 90% confidence level, unit: W/m^2 .

b 低纬异常反气旋的作用

图 9a 给出了上文定义的北方指数 NI 回归的 850 hPa 环流场, 冷空气的活动同样在 850 hPa 中高纬地区形成一组异常波列, 欧洲东部的异常气旋和西伯利亚地区的异常反气旋发展强盛, 将冷空气从极地向中国输送。中国南方地区的异常气旋位置比 500 hPa 偏南, 中心位于南海上空, 该异常气旋北侧的偏北风可以接力中高纬南下的冷空气, 使冷空气继续南下并影响中国南方地区。在 2022 年 5 月的 850 hPa 的环流场上 (图 9b) 同时存在这三个异常环流, 位置也与图 9a 中几乎完全一致。然而, 对比图 9a 和 9b 可以发现, 在 2022 年 5 月菲律宾以东地区还存在一个十分显著的反气旋环流, 图 9a 中却并不存在, 这表明该菲律宾异常反气旋与上文定义的 NI 指数没有明显相关, 那么它对于 2022 年 5 月中国南方的

极端低温是否存在贡献？

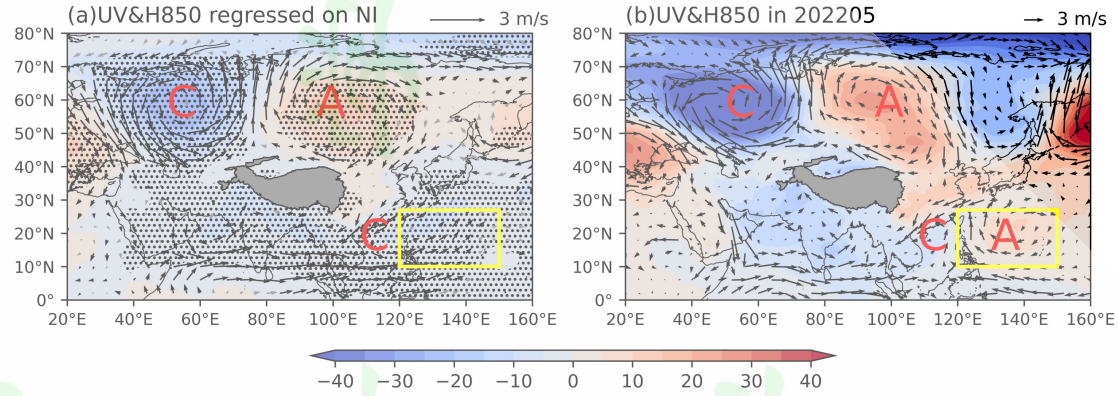


图 9 (a) 北方指数 NI 回归同期 5 月的 850 hPa 位势高度场 (阴影, gpm) 和风场 (箭头, m/s), 打点和黑色的箭头表示通过 90% 显著性检验和 (b) 2022 年 5 月观测的 850 hPa 位势高度场 (阴影, gpm) 和风场 (箭头, m/s)。黄色方框为菲律宾异常反气旋的位置, A 和 C 代表异常反气旋和异常气旋

Fig. 9 (a) Regressed 850 hPa geopotential height (shading, gpm) and wind anomalies (vectors, m/s) onto NI Index, the dots and black vectors indicate the regions are significant at the 90% confidence level. (b) The geopotential height anomalies (shading, gpm) and wind anomalies (vectors, m/s) in May 2022. The yellow boxes are the locations of Philippine anomalous anticyclones, the A and C represent anomalous anticyclones and anomalous cyclones.

以菲律宾异常反气旋区域平均 (图 9 中的黄色方框, 10°N-25°N, 120°E-150°E) 的 850 hPa 涡度异常定义为南方指数 (SI), SI 与 NI 的相关系数仅为 -0.19, SI 与中国南方地区气温的相关也仅为 0.215, 均未通过显著性检验。然而, 以 NI 和 SI 两个指数为因子构建拟合曲线, 再现的气温与观测气温的相关系数可以达到 0.618 (通过 99% 的显著性检验), 相较于仅考虑 NI 指数时中国南方气温的预报能力有了明显的提升。并且, 对于 2022 年的极端低温, 仅考虑 NI 指数时再现的气温仅为 -1 个标准差; 当同时考虑 NI 指数和 SI 指数时, 如图 10 所示, 再现的气温可达到 -2 个标准差。虽然和观测相比还存在一定的差距, 但与仅考虑 NI 相比, 对 2022 年 5 月极端低温的预报能力提升了近一倍。可见, 2022 年 5 月中国南方的极端低温是与冷空气活动相关的环流和菲律宾反气旋共同影响的结果, 需要同时考虑 NI 和 SI 的作用。

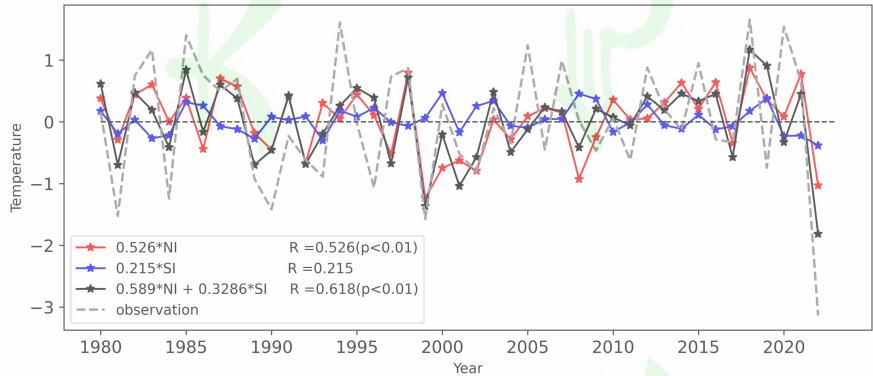


图 10 仅用北方指数 NI (红色实线)、仅用南方指数 SI (蓝色实线)、同时考虑北方指数 NI 和南方指数 SI (黑色实线) 拟合的中国南方气温以及观测气温 (灰色虚线) 的标准化时间序列

Fig. 10 Standardized time series of air temperature in South China fitted with only NI Index (solid red line), only SI Index (solid blue line), both NI Index and SI Index (solid black line) and observed temperature in South China (dashed grey line).

对于 NI 指数，其主要表征冷空气活动（图 11a），中高纬波列通过影响经向风异常，使得 $-v'\frac{\partial \bar{T}}{\partial y}$ 项在整个中国南方地区都表现为显著的负异常，大值中心位于西南地区。但其对净短波辐射项 Q_{nswrf} （图 11b）的影响较小，只在西南地区存在一定的负相关。而 SI 指数，即低纬的菲律宾异常反气旋，它与 $-v'\frac{\partial \bar{T}}{\partial y}$ 项在沿海地区为显著的正相关（图 11c），偏强的菲律宾反气旋带来海上的暖平流，对低温为负贡献，并且影响范围偏小；然而它显著影响了 Q_{nswrf} 项（图 11d），造成东南沿海的 Q_{nswrf} 项显著偏小。可见，菲律宾异常反气旋西侧的南风将海洋上的暖湿气流输送到中国南方地区，不仅带来了暖平流，还与中纬度南下的冷空气相遇，形成对流，造成中国南方上空云系偏多（图 12），显著减少了地表净短波辐射，从而使气温无法回升。

综上所述，2022 年 5 月中国南方的极端低温事件正是由这两组环流系统的共同作用造成的，以北方指数 NI 为表征的中高纬异常气旋、反气旋以及中国南方局地的异常气旋影响了中高纬冷空气活动，使偏强的冷空气深入南下影响中国南方地区，造成气温偏低。以南方指数 SI 为表征的低纬菲律宾异常反气旋将海洋上的暖湿气流输送到中国南方地区，与干冷空气在此处汇合，形成对流，造成南方上空云系偏多，显著减少了地表净短波辐射，使气温更加偏低。虽然菲律宾异常反气旋与中国南方 5 月气温的直接相关较弱，且并未通过显著性检验，但它对冷空气的叠加效应是 2022 年 5 月中国南方极端低温的一个重要成因。

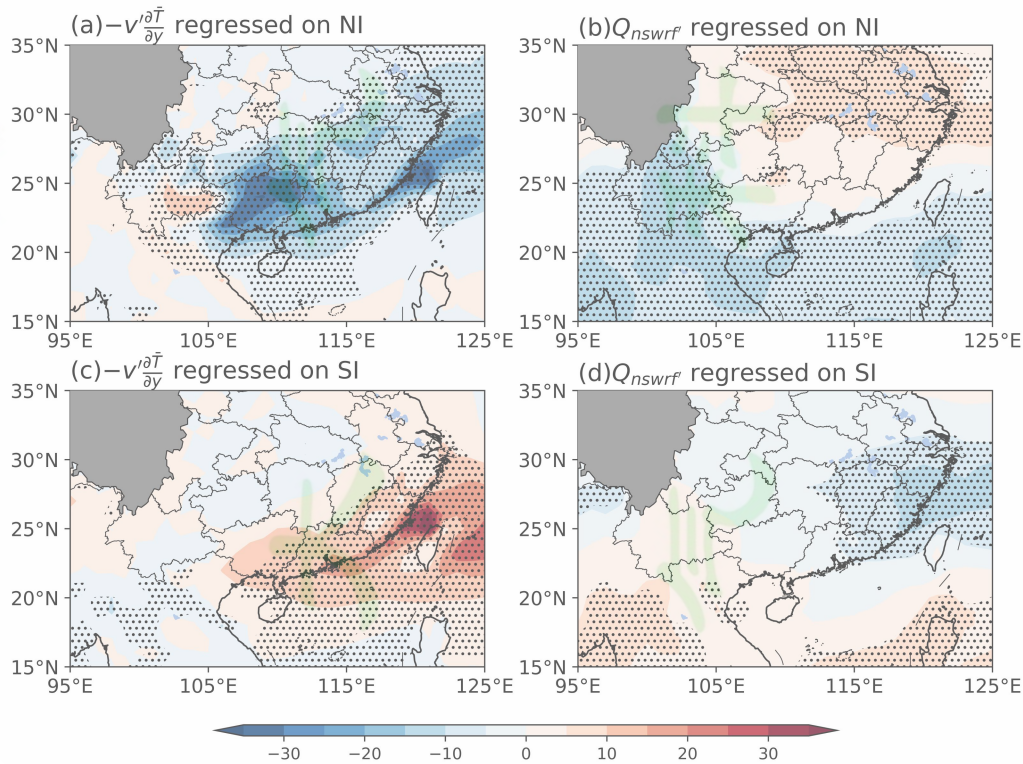


图 11 (a, b) 北方指数 NI 和 (c, d) 南方指数 SI 回归的 (a, c) $-v'\frac{\partial \bar{T}}{\partial y}$ 项和 (b, d) Q_{nswrf} 项的空间场（阴影， W/m^2 ），打点表示通过 90% 的显著性检验

Fig. 11 Regressed (a, c) $-v'\frac{\partial \bar{T}}{\partial y}$ (shading, W/m^2) and (b, d) Q_{nswrf} (shading, W/m^2) onto (a, b) the NI index and (c, d) the SI index, the dots indicate the regions are significant at the 90% confidence level.

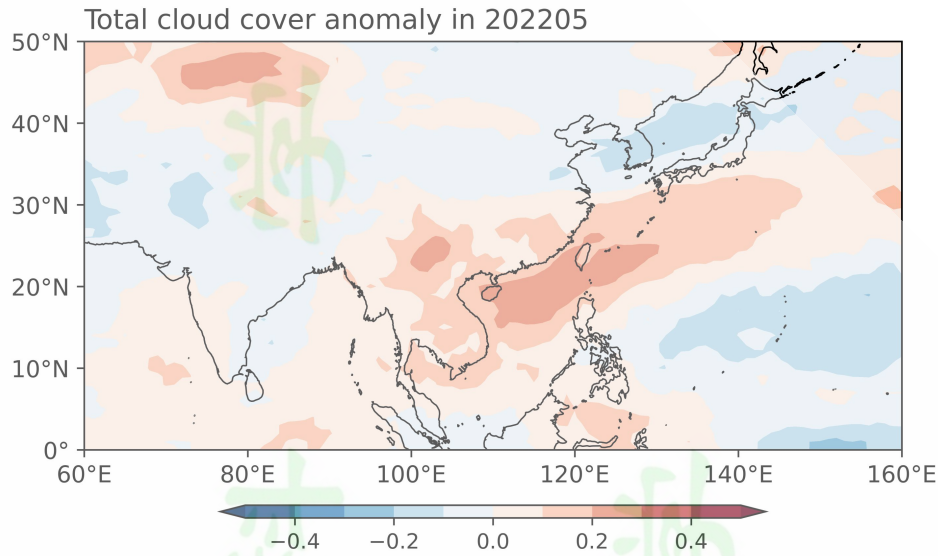


图 12 2022 年 5 月的总云量异常场
Fig. 12 The total cloud cover anomalies in May 2022.

值得注意的是，2022 年是 La Niña 衰减年，如图 13b 所示，统计分析已表明 La Niña 衰减年春季在西太平洋主要为异常气旋环流响应 (Huang and Wu, 1989; Feng et al., 2011)，那么 2022 年 5 月菲律宾地区为什么会形成异常反气旋？

在 2022 年 5 月赤道中、东太平洋均表现为明显的海温负异常，海温异常中心可以达到 -1.5°C (图 13c)，整个海温形态与 La Niña 次年 5 月海温的合成场相似 (图 13a)。但在 OLR 场上，2022 年 5 月赤道西太平洋地区为偏强的对流抑制中心 (图 13d)，与 La Niña 合成结果相比 (图 13b)，该对流抑制中心明显更加偏西偏强 (图 13b, f)，可以延伸至 140°E 附近。根据 Matsuno-Gill 响应，该区域的对流抑制中心可以激发一组 Rossby 波，从而在北半球菲律宾以东附近产生一个异常反气旋环流 (Gill, 1980; Wang et al., 2000)。

在 2022 年 5 月，赤道中东太平洋的海温异常无论是强度还是位置均与其余 La Niña 次年的 5 月没有明显的差异 (图 13e)，但与其相关的对流抑制中心却明显偏西至 140°E ，从而在菲律宾以东形成异常反气旋影响中国南方地区。这可能与 2022 年春季 La Niña 的冷海温异常再次加强有关。图 14a 和 14c 给出了 La Niña 年合成以及 2021-2022 年赤道地区海温异常的时间演变图，在通常情况下 La Niña 冷海温异常在冬季发展成熟，春季开始衰减，与之相关的对流抑制中心也随之衰减 (图 14b)。然而，在 2021-2022 年 La Niña 事件中，La Niña 冷海温异常虽然在 12 月后逐渐衰减，但是从 2 月起冷海温在赤道中太平洋 (Niño4 区) 又开始加强发展，并到 5 月达到盛期 (图 14c)。随着冷海温异常的再次发展，赤道地区的对流抑制中心也随之加强发展，并且西移至 140°E (图 14d)。因此，2022 年 5 月赤道地区偏西偏强的对流抑制中心可能与赤道中太平洋冷海温异常在春季的再发展有关。Huang 等 (2023) 也提出 2022 年夏季 La Niña 冷海温异常的再发展造成了 2022 年夏季长江流域的极端高温。

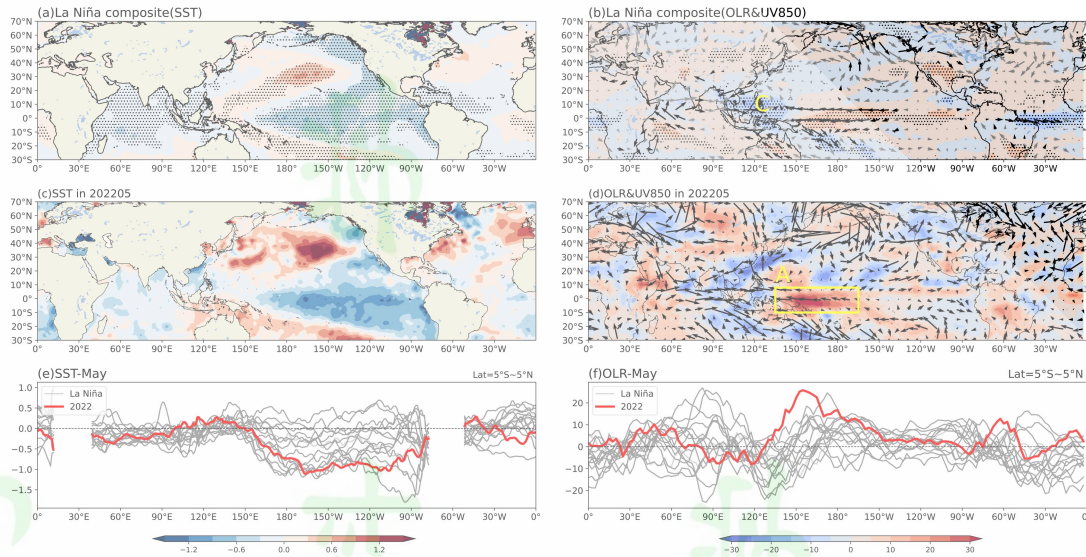


图 13 (a, b) La Niña 次年 5 月合成和 (c, d) 2022 年 5 月的 (a, c) 海温异常场 (阴影, $^{\circ}\text{C}$)、(b, d) OLR 场 (阴影, W/m^2) 和 850 hPa 风场 (箭头, m/s)，打点和黑色的箭头表示通过了 90% 显著性检验。黄色方框表示对流抑制中心的位置，A 和 C 表示异常反气旋和气旋。La Niña 次年 5 月赤道 ($5^{\circ}\text{S}-5^{\circ}\text{N}$) 平均的 (e) 海温异常 ($^{\circ}\text{C}$) 和 (f) OLR 异常 (W/m^2) 随经度的变化，红色实线为 2022 年 5 月，灰色实线为其余 La Niña 事件

Fig. 13 Composite anomalies of (a, c) SST (shading, $^{\circ}\text{C}$), (b, d) OLR (shading, W/m^2) and 850 hPa wind anomalies (vectors, m/s) (a, b) in May of the following year of La Niña and (c, d) in May 2022, the dots and black vectors indicate the regions are significant at the 90% confidence level. The yellow box indicates the location of the convection suppression center, the A and C represent anomalous anticyclones and anomalous cyclones. La Niña Equatorial ($5^{\circ}\text{S}-5^{\circ}\text{N}$) mean (e) SST anomalies ($^{\circ}\text{C}$) and (f) OLR anomalies (W/m^2) with longitude in May of the following year, with the red line for May 2022 and the gray line for the other La Niña events.

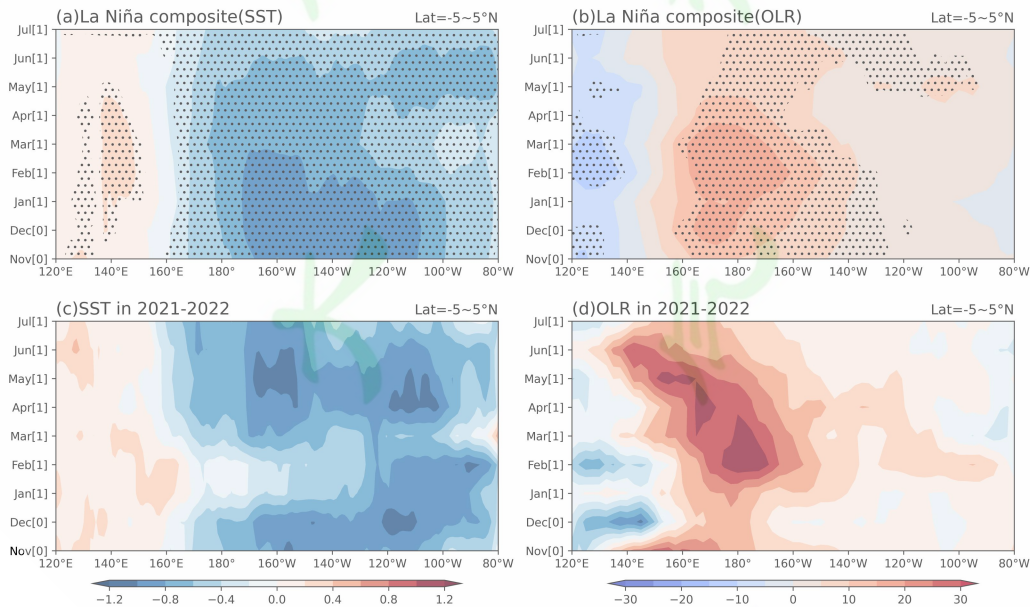


图 14 (a, b) La Niña 及次年春季合成和 (c, d) 2021-2022 年的 (a, c) 海温异常 (阴影, $^{\circ}\text{C}$)、(b, d) OLR 场 (阴影, W/m^2) 的时间-经度演变图，打点表示通过了 90% 显著性检验

Fig. 14 Time-longitude evolution of (a, c) SST (shading, $^{\circ}\text{C}$) and (b, d) OLR anomalies (shading, W/m^2) for (a, b) La Niña year and the following spring and (c, d) 2021-2022, the dots indicate the regions are at the 90% confidence level.

5 总结与讨论

在全球变暖的背景下, 极端低温事件频繁发生, 显著影响农作物生长, 减少农作物产量, 进而造成严重的经济损失。本文基于 1980-2022 年 CN05.1 逐日气温观测资料分析了 2022 年 5 月中国南方极端低温的时空特征, 进一步利用 ERA5 等再分析资料, 通过诊断分析、相关分析、回归分析等方法分析了此次极端低温事件的环流特征和可能机制, 研究结果表明:

(1) 2022 年 5 月中国南方地区发生了一次破纪录的极端低温事件, 此次低温事件的影响范围广, 涉及广东、广西、福建、浙江等多个省份, 温度距平偏低 2°C 的覆盖面积达到 150 万平方千米; 持续时间长, 低温事件持续长达 31 天; 与 1980-2022 年气候态相比, 气温偏低超过了 3 个标准差, 日气温最低可达 -4°C 以上。此次低温事件是中国南方地区 1980 年以来强度最大、持续事件最长、影响范围最广的一次极端低温事件。

(2) 2022 年 5 月中国南方地区的极端低温事件与中高纬地区位于欧洲东部的异常气旋、西伯利亚地区的异常反气旋和中国南方地区局地的异常气旋密切相关, 它们三者通过接力作用使得冷空气南下, 偏强的北风异常造成 $-v'\partial\bar{T}/\partial y$ 项异常偏强, 导致了此次中国南方气温偏低。但仅考虑冷空气因子 (NI 指数), 所再现的 2022 年 5 月气温仅能达到 -1 个标准差, 远弱于观测 (-3 个标准差)。进一步分析发现, 低纬的菲律宾异常反气旋西侧的南风可以通过输送海洋上的暖湿气流产生降水, 显著减少地面的净短波辐射, 从而加剧中国南方的低温, 2022 年 5 月的极端低温事件正是与冷空气活动相关的环流和菲律宾反气旋共同作用的结果。以这两个因子构建气温拟合曲线, 再现的气温可达到 -2 个标准差, 是仅考虑冷空气因子的 2 倍。

(3) 2022 年 5 月低纬的菲律宾异常反气旋的形成与 2022 年春季再次发展的 La Niña 密切相关。赤道中太平洋冷海温异常在 2021 年 12 月后衰减, 但在 2022 年 2 月后重新发展, 使赤道西太平洋产生明显偏强偏西的对流抑制中心, 从而激发一组 Rossby 波, 在菲律宾以东地区形成了异常反气旋, 加强了此次中国南方的极端低温。

本文根据 NI 和 SI 两个指数构建拟合方程, 较成功地再现了中国南方地区 2022 年 5 月的异常低温, 可达到 -2 个标准差, 已预报出了此次低温过程的极端性。然而, 再现的气温与观测气温 (-3 个标准差) 还有一定的距离。从此次极端低温事件的温度方程诊断分析中 (图 4) 可以看到, 非线性项 $-v'\partial T'/\partial y$ 项的贡献也十分显著, 与贡献大值项 $-v'\partial\bar{T}/\partial y$ 项相近。因此, 极端低温的预报还需要考虑非线性项的贡献, 这将在未来的工作中进一步开展。

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 Yawen, Sun Jianqi, Han Shuangze, et al. 2020. Spatial and Temporal Features of Spring Extreme Low Temperature Events in China during 1961-2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(6): 1305-1319.
- Alexander M A, Bladé I, Newman M, et al. 2002. The Atmospheric Bridge: The Influence of ENSO Teleconnections on Air-Sea Interaction over the Global Oceans[J]. Journal of Climate. 15(6): 2205-2230.

411 Barnston A G, Chelliah M, Goldenberg S B. 1997. Documentation of a highly ENSO-related
 412 SST region in the equatorial Pacific: research note[J]. *Atmos-Ocean*, 35: 367-383.

413 Chen S F, Chen W, Wei Ke. 2013. Recent Trends in Winter Temperature Extremes in Eastern
 414 China and their Relationship with the Arctic Oscillation and ENSO[J]. *Advances in*
 415 *Atmospheric Sciences*, 30(06): 1712-1724.

416 丁园圆, 缪启龙, 王勇. 2010. 中国北方冬季极端温度的变化及其与 AO 相关分析[J]. *干旱*
 417 *区资源与环境*, 024(5): 95-101. Ding Yuanyuan, Miao Qilong, Wang Yong. 2010.
 418 Variations of the winter extreme temperatures over Northern China and their relationships
 419 with the Arctic Oscillation[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment (in*
 420 *Chinese)*, 024(5): 95-101.

421 Feng J, Chen W, Tam C Y, et al. 2011. Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on
 422 China rainfall in the decaying phases[J]. *International Journal of Climatology*, 31(14):
 423 2091-2101.

424 Gill A E. 2010. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation[J]. *Quarterly Journal*
 425 *of the Royal Meteorological Society*, 106: 447-462.

426 Gong D Y, Ho C H. 2002. The Siberian high and climate change over middle to high latitude
 427 Asia[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 72(1-2):1-9.

428 Gong D Y, Ho C H. 2003. Arctic Oscillation signals in East Asian summer monsoon[J]. *Journal*
 429 *of Geophysical Research-Atmospheres*, 108(D2): 4066.

430 Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2001. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation[J].
 431 *Geophysical Research Letters*, 28(10): 2073-2076.

432 龚道溢, 王绍武. 2003. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响[J]. *地理学报*, 58(04):
 433 559-568. Gong Daoyo, Wang Shaowu. 2003. Influence of Arctic Oscillation on Winter
 434 Climate over China[J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 58(04): 559-568.

435 郭其蕴. 1994. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系[J]. *应用气象学报*, 5(002):
 436 218-225. Guo Qiyun. 1994. Relationship between the variations of East Asian Winter
 437 Monsoon and temperature anomalies in China[J]. *Journal of Applied Meteorological*
 438 *Science (in Chinese)*, 5(002): 218-225.

439 何溪澄, 丁一汇, 何金海. 2008. 东亚冬季风对 ENSO 事件的响应特征[J]. *大气科学*, 32(02):
 440 335-344. He Xicheng, Ding Yihui, He Jinhai. 2008. Response Characteristics of the East
 441 Asian Winter Monsoon to ENSO Events[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in*
 442 *Chinese)*, 32(02):335-344.

443 Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal*
 444 *of the Royal Meteorological Society*, 146(730): 1999-2049.

445 Huang H J, Zhu Z W, Li J. 2024. Disentangling the unprecedented Yangtze River Basin extreme
 446 high temperatures in summer 2022: Combined impacts of the re-intensified La Niña and
 447 strong positive NAO[J]. *Journal of Climate*, 37(3): 927-942.

448 Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and
 449 its mechanism[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 6(1): 21-32.

450 黄小梅, 管兆勇, 戴竹君, 等. 2013. 冬季东亚大槽强度年际变化及其与中国气候联系的再
 451 分析[J]. *气象学报*, 71(03): 416-428. Huang Xiaomei, Guan Zhaoyong, Dai Zhujun, et al.
 452 2013. A further look at the interannual variations of East Asian trough intensity and their
 453 impacts on winter climate of China[J]. *Acta Meteorological Sinica (in Chinese)*, 71(03):
 454 416-428.

455 Jeong J H, Kim B M, Ho C H, et al. 2006. Stratospheric origin of cold surge occurrence in East

Asia[J]. *Geophysical Research Letters*, 33(14): L14710.

李崇银. 1989. El Niño 事件与中国东部气温异常[J]. *热带气象学报*, 35(3): 210-219. Li Chongyin. 1989. El Niño events and the temperature anomalies in eastern China[J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 35(3): 416-428.

梁静, 孙建奇, 洪海旭, 等. 2023. 春季北大西洋三极型海温模态与中国东部极端低温事件频次年际变化关系的年代际增强[J]. *大气科学*, 47(4): 1050–1064. Liang Jing, Sun Jianqi, Hong Haixu, et al. 2023. Interdecadal Enhancement of the Interannual Variation Relationship between Spring North Atlantic Tripolar Sea Surface Temperature Mode and Extreme Cold Event Frequency in Eastern China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 47(4): 1050–1064.

李言蹊, 陈海山. 2021. 冬季亚洲中纬度极端低温事件与巴伦支—喀拉海异常增暖的关系及联系机制[J]. *大气科学*, 45(4): 889–900. Li Yanxi, Chen Haishan. 2021. The Relationship between Winter Extremely Low Temperature Events in Mid-latitude Asia and Abnormal Warming over Barents-Kara Seas and Associated Mechanism[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 45(4): 889–900.

Liebmann B, Smith C A. 1996. Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(6): 1275-1277.

Lim K, Kim D. 2016. Comparison of the impact of the Arctic Oscillation and Eurasian teleconnection on interannual variation in East Asian winter temperatures and monsoon[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(1/2): 267-279.

Liu B Q, Zhu C W. 2020. Diverse impacts of the Siberian high on surface air temperature in Northeast China during boreal winter[J]. *International Journal of Climatology*, 40(1): 594-603.

Liu Q, Chen G X, Wang L, et al. 2021. Southward cold air mass flux associated with the East Asian winter monsoon: diversity and impacts[J]. *Journal of Climate*, 34(8): 3239-3254.

Liu X D, Yin Z Y, Shao X M, et al. 2006. Temporal trends and variability of daily maximum and minimum, extreme temperature events, and growing season length over the eastern and central Tibetan Plateau during 1961-2003[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(D19): D19109.

刘永强, 丁一汇. 1995. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响[J]. *大气科学*, 19(02): 200-208. Liu Yongqiang, Ding Yihui. 1995. Reappraisal of the Influence of ENSO Events on Seasonal Precipitation and Temperature in China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 19(02): 200-208.

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 Mingyue, Li Shuanglin. 2020. Comparison of Persistent Cold Events in China during January-February of 2018 and 2008[J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 25(6): 601–615.

Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late Nineteenth Century[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 108(D14): 4407.

任福民, 翟盘茂. 1998. 1951-1990 年中国极端气温变化分析[J]. *大气科学*, 22(2): 217-227. Ren Fumin, Zhai Panmao. 1998. Study on Changes of China's Extreme Temperatures During 1951-1990[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 22(2): 217-227.

邵太华, 张耀存. 2012. 冬季北大西洋涛动对中国春季降水异常的影响[J]. *高原气象*, 31(5):

1225-1233. Shao Taihua, Zhang Yaocun. 2012. Influence of Winter North Atlantic Oscillation on Spring Precipitation in China[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31(5): 1225-1233.

Screen J A, Deser C, Sun L. 2015. Reduced risk of North American cold extremes due to continued Arctic sea ice loss[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 96: 1489-1503.

Sisco M R, Bosetti V, Weber E U. 2017. When do extreme weather events generate attention to climate change?[J]. Climatic Change, 143(1-2): 227-241.

孙杭生, 徐芑. 2009. 影响我国农业生产的气象灾害分析[J]. 边疆经济与文化, (04): 1-3. Sun Hangsheng, Xu Peng. 2009. Analyze the Influence of our Agricultural Production's Weather Disaster[J], (04): 1-3.

陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应[J]. 大气科学, 22(04): 399-407. Tao Shiyan, Zhang Qinyun. 1998. Response of the Asian Winter and Summer Monsoon to ENSO Events[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22(04): 399-407.

Thompson D W J, Wallace J M. 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields[J]. Geophysical Research Letters, 25(9): 1297-1300.

Trenberth K E, Caron J M. 2000. The Southern Oscillation revisited: Sea level pressures, surface temperatures, and precipitation[J]. Journal of Climate, 13(24): 4358-4365.

Wallace J M, Rasmusson E M, Mitchell T P, et al. 1998. On the structure and evolution of ENSO-related climate variability in the tropical Pacific: Lessons from TOGA[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 103(C7): 14241-14259.

Wang B, Wu R, Fu X. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate?[J]. Journal of Climate, 13(9): 1517-1536.

Wang H J, Sun J Q, Chen H P, et al. 2012. Extreme Climate in China: Facts, Simulation and Projection[J]. Meteorologische Zeitschrift, 21(3): 279-304.

Wang H, Zheng F, Diao Y N, et al. 2022. The synergistic effect of the preceding winter Northern Hemisphere annular mode and spring tropical North Atlantic SST on spring extreme cold events in the mid-high latitudes of East Asia[J]. Climate Dynamics, 59: 3175-3191.

Wang Z Y, Yang S, Zhou B T. 2017. Preceding features and relationship with possible affecting factors of persistent and extensive icing events in China[J]. International Journal of Climatology, 37: 4105-4118.

王冀, 江志红, 张海东, 等. 2007. 1957-2000 年东北地区春季极端气温变化及其与北极涛动的关系[J]. 气候变化研究进展, 3(1): 41-45. Wang Ji, Jiang Zhihong, Zhang Haidong, et al. 2007. Variations of Spring Extreme Temperature Indexes in Northeast China and Their Relationships with the Arctic Oscillation[J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3(1): 41-45.

王晓娟, 龚志强, 任福民, 等. 2012. 1960-2009 年中国冬季区域性极端低温事件的时空特征[J]. 气候变化研究进展, 8(1): 8-15. Wang Xiaojuan, Gong Zhiqiang, Ren Fumin, et al. 2012. Spatial/Temporal Characteristics of China Regional Extreme Low Temperature Events in Winter During 1960-2009[J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 8(1): 8-15.

武柄义, 黄荣辉. 1999. 冬季北大西洋涛动极端异常变化与东亚冬季风[J]. 大气科学, 23(6): 641-651. Wu Bingyi, Huang Ronghui. 1999. Effects of the Extremes in the North Atlantic

545 Oscillation on East Asia Winter Monsoon[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in
546 Chinese), 23(6): 641-651.

547 Wu B Y, Wang J. 2002. Impacts of winter Arctic Oscillation on Siberian High the East Asian
548 winter monsoon[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 19(2): 297-320.

549 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他资料的对比[J]. 地球物
550 理学报, 56(04): 1102-1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset
551 over China region and comparison with the other datasets[J]. Chinese Journal of
552 Geophysics (in Chinese), 56(4): 1102-1111.

553 吴绍洪, 尹云鹤. 2012. 极端事件对人类系统的影响[J]. 气候变化研究进展, 8(02): 99-102.
554 Wu Shaohong, Yin Yunhe. 2012. Impacts of Climate Extremes on Human Systems[J].
555 Advances in Climate Change Research (in Chinese), 8(02): 99-102.

556 Yanai M, Esbensen S, Chu J H. 1973. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters
557 from large-scale heat and moisture budgets[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 30(4):
558 611-627.

559 Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al. 2007. Impact of Indian Ocean SST basin mode on the Asian
560 summer monsoon[J]. Geophysical Research Letters, 34(2): L02708.

561 Yang S, Lau K M, Yoo S H, et al. 2004. Upstream Subtropical Signals Preceding the Asian
562 Summer Monsoon Circulation[J]. Journal of Climate, 17(21): 4213-4229.

563 Yin H, Sun Y, Wan H, et al. 2017. Detection of anthropogenic influence on the intensity of
564 extreme temperatures in China[J]. International Journal of Climatology, 37(3): 1229-1237.

565 尹姗, 冯娟, 李建平. 2013. 前冬北半球环状模对春季中国东部北方地区极端低温的影响[J].
566 气象学报, 71(1): 96-108. Yin Shan, Feng Juan, Li Jianping. 2013. Influences of the
567 preceding winter Northern Hemisphere annular mode on the spring extreme low
568 temperature events in the north of eastern China[J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese),
569 71(1): 96-108.

570 张弛, 沈新勇, 张玲, 等. 2021. 一次寒潮过程中冷堆增强的动力原因分析[J]. 高原气象,
571 40(2): 394-402. Zhang Chi, Shen Xinyong, Zhang Ling, et al. 2021. The Dynamical Cause
572 of Cold Dome's Intensification in a Cold Wave Process[J]. Plateau Meteorology (in
573 Chinese), 40(2): 394-402.

574 张霏燕, 徐海明. 2013. 东北春季极端低温的变化特征及其与大西洋海温的关系[J]. 大气科
575 学学报, 34(5): 574-582. Zhang Feiyan, Xu Haiming. 2013. Spatial /temporal variations of
576 spring extreme low temperature in Northeast China and its relationship with SSTA in
577 Atlantic Ocean[J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(5): 574-582.

578 张庆云, 陶诗言. 1998. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响[J]. 气象学报, 56(02):
579 72-84. Zhang Qinyun, Tao Shiyan. 1998. Influence of Asian mid-high latitude circulation on
580 East Asian summer rainfall[J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 56(02): 72-84.

581 Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian Monsoon: A
582 diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events [J]. Journal of the Meteorological Society of
583 Japan, 74(1): 49-62.

584 Zhang W J, Li H Y, Stuecker M F, et al. 2016. A new understanding of El Niño's impact over
585 East Asia: Dominance of the ENSO combination mode[J]. Journal of Climate, 29(12):
586 4347-4359.

587 Zhang X D, Lu C H, Guan Z Y. 2012. Weakened cyclones, intensified anticyclones and recent
588 extreme cold winter weather events in Eurasia[J]. Environmental Research Letters, 7(4):
589 044044.

590 Zhang Z J, Qian W H. 2011. Databases on regional extreme low temperature events in China[J].
 591 Advance in Atmosphere Science, 28 (2): 338-351.

592 Zhou B T, Xu Y, Wu J, et al. 2016. Changes in temperature and precipitation extreme indices
 593 over China: Analysis of a high-resolution grid dataset[J]. International Journal of
 594 Climatology, 36: 1051-1066.

595 Zhou M Z, Wang H J, Yang S, et al. 2013. Influence of springtime North Atlantic oscillation on
 596 crops yields in Northeast China [J]. Climate Dynamics, 41(11-12): 3317-3324.

597 Zhou W, Chan J C L, Chen W, et al. 2009. Synoptic-scale controls of persistent low temperature
 598 and icy weather over southern China in January 2008[J]. Monthly Weather Review, 137(11):
 599 3978-3991.

600 朱红霞, 陈文, 冯涛, 等. 2019. 冬季西伯利亚高压的主要年际变化模态及其对东亚气温的
 601 影响[J]. 高原气象, 38(4): 685-692. Zhu Hongxia, Chen Wen, Feng Tao, et al. 2019.
 602 Interannual Variations of Siberian High during Boreal Winter and Its Influence on East
 603 Asian Temperature[J]. Plateau Meteorology, 38(4): 685-692.