

福建省冬季持续低温事件多尺度特征及影响因子

池艳珍¹ 郑伟鹏^{2,3} 王彦明¹ 何芬⁴ 鲍瑞娟⁵

1 厦门市海峡气象开放重点实验室 厦门 361012

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 北京 100029

3 中国科学院大学地球与行星科学学院 北京 100049

4 福建省气候中心 福州 350001

5 福建省灾害天气重点实验室 福州 350001

摘要 利用 1960–2020 年福建省 66 个国家气象站逐日观测资料、太平洋年代际振荡 (PDO) 和厄尔尼诺和南方涛动 (ENSO) 月指数以及美国气象环境预报中心和国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 逐日再分析数据, 采用功率谱分析、小波分解、合成分析等方法, 讨论了福建省冬季持续低温事件的多尺度特征及影响因子, 结果表明: (1) 1961–2020 年福建省冬季共出现 114 次持续低温事件, 20 世纪 80 年代中期以前为持续低温多发期, 其后为少发期, 持续低温的强度亦呈现前强后弱的分布; 持续时间以 5~11 天居多, 最长可达 40 天。(2) 福建冬季低温指数存在显著的 10–20 天和 30–60 天低频周期, 年际尺度上以 2~8 年为显著周期。(3) 福建冬季持续低温事件和 PDO、ENSO、热带大气季节内振荡及冷空气活动密切相关; PDO 和 ENSO 为冷位相时, 有利于持续低温的出现和持续时间偏长; 当热带对流位于海洋大陆至西太平洋时, 福建省冬季易出现持续低温事件; 强盛的西伯利亚高压的存在, 使得偏北气流可贯穿至华南南部, 引发持续低温事件的发生。(4) 对比不同持续时长低温事件的冷空气影响路径, “偏短型”、“中等型”和“偏长型”事件分别以西路、东路和中路路径为主要特征。

关键词 持续低温, 冬季, 福建, 多尺度特征

文章编号:

中图分类号 P463

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9825.2204.21188

收稿日期 2021-09-28 网络出版日期

作者简介 池艳珍, 女, 1972 年出生, 正高工, 主要从事气候监测预测业务及研究。E-mail: cyz0605@126.com

通讯作者 郑伟鹏, E-mail: zhengwp@mail.iap.ac.cn

资助项目 中国气象局创新发展专项 CXFZ2021Z034, 福建省自然科学基金 2021J01465, 厦门市社会发展领域指导项目 3502Z20214ZD4012

Funded by Special Projects for Innovation and Development of Chinese Meteorological Administration (Grant CXFZ2021Z034), Natural Science Foundation of Fujian (Grant 2021J01465), Social Development Guidance Program of Xiamen (Grant 3502Z20214ZD4012)

Multi-scale Features and Impact factors of Winter Persistent Cold Events in Fujian Province

CHI Yanzhen¹ ZHENG Weipeng^{2,3} WANG Yanming¹ HE Fen⁴ BAO Ruijuan⁵

1 Xiamen Key Laboratory of Strait Meteorology, Xiamen 361012, China

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Fujian Climate Center Fuzhou 350001, China

5 Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350001, China

Abstract Based on the daily observation data of 66 weather stations in Fujian Province from 1960 to 2020, the PDO monthly index, the ENSO monthly index and the NCEP/NCAR daily reanalysis data, the multi-scale features and impact factors are discussed by using the power spectrum analysis, wavelet decomposition, correlation and composition analysis. The results reveal: (1) there were 114 persistent cold events during 1961 to 2020. These events occurred frequently with stronger mean intensity before the mid 80's of 20st century, however, decreased significantly with weaker mean intensity after that period. The prevalent duration was 5~11 days even up to 40 days. (2) the winter cold index exists significant 10-20-day and 30-60-day low frequency periods also 2-8 years in interannual scale. (3) the persistent cold events in winter are closely related to the ENSO events, the atmospheric intraseasonal oscillations and the cold air activities. PDO and ENSO in the negative phases were favorable for the occurrence and duration of persistent cold events. When the tropical convection prevailed in the maritime continent and the western Pacific Ocean, the persistent cold event occurred frequently. Furthermore, the cold northerly airflow guided by the strong Siberian High could reach the southern region of South China, that triggered the persistent cold event in Fujian province. (4) By comparing the persistent cold events with different durations, the “short”, “medium” and “long” events are characterized by the west, east and middle cold air paths, respectively.

Key words: Persistent cold events, Winter, Fujian Province, Multi-scale features

1 引言

在全球气候变暖的背景下，近年来极端天气气候事件的发生频率呈上升趋势，台风、暴雨洪涝、低温、高温等灾害造成的影响程度越来越重。2008年1月中旬至2月上旬，我国南方经历了罕见的持续时间长、影响范围广、危害程度重的低温雨雪冰冻灾害，多数地区为五十年一遇，部分为百年一遇，对交通、能源供应、电力传输、通信设施、农业生产、生态系统和人民生活造成了严重影响，引起了国内外政府部门、防灾减灾机构和科学界高度的关注和研究热潮。研究表明乌拉尔山和西伯利亚地区阻塞高压的稳定维持是2008年初南方持续性冰冻雨雪天气事件的一个重要原因(陶

诗言和卫捷, 2008; 丁一汇等, 2008; Wen et al., 2009; Zhou et al., 2009; Sun and Zhao, 2010; Bueh et al., 2011)。研究还揭示赤道中东太平洋的强拉尼娜(La Niña)事件西传导致的海洋大陆的季节内外强迫加热和大气季节内振荡(MJO)现象在此次持续性冰冻雨雪天气事件中的重要作用(付建建等, 2008; 王允等, 2008; Hong and Li, 2009; 马宁等, 2011)。

围绕大范围持续低温事件变化特征及其成因, 学者们从多时空尺度开展了大量研究。研究表明, 东亚冬季风具有显著的年代际变化特征, 在 1976–1987 年期间相对强劲, 在 20 世纪 80 年代后期显著减弱, 2004 年以后东亚冬季风的强度有所恢复, 导致 2004–2012 年间东亚许多地区频繁出现严寒天气, 并出现了一些异常寒冷的冬季(IPCC AR6 WGI, 2021)。韩永秋等(2021)分析了中国冬半年极端低温事件与东亚冬季风的关系, 指出冬半年极端低温事件总体呈明显的减少趋势, 且在 1986 年前后存在明显突变现象。彭京备和孙淑清(2017)认为在南方持续性低温事件中地表风场距平的南北变化反相特征与冬季风分布特征相一致。不少研究从天气系统演变、对流层和平流层相互作用等视角探讨了大范围持续低温事件的影响机理, Peng and Bueh(2011, 2012)指出欧亚大陆大型斜脊是引发大范围持续性低温事件的关键环流系统, 布和朝鲁等(2018)利用分块位涡倾向方法分析了大型斜脊斜槽系统的动力学特征。施宁和布和朝鲁(2015)研究了大范围持续性极端低温事件的平流层前兆信号, 指出巴伦支海附近的平流层中低层位势涡度(potential vorticity, 简称 PV) 异常有利于该地区对流层中上层 300hPa 正高度异常的维持, 从而影响对流层环流异常。吴嘉蕙和任荣彩(2021)进一步揭示了冬季全国性持续低温事件过程中的平流层—对流层相互作用, 即冷空气在中西伯利亚堆积、冷空气爆发以及衰亡三个阶段中, 平流层极涡强度经历减弱、恢复并维持及再次减弱, 与对流层乌拉尔山向东一直延伸至勒拿河的大型斜脊的建立、维持和崩溃相关联。

低温冷害作为福建省的主要气象灾害之一, 常对农业、交通等造成严重影响。1975 年 12 月中旬福建省遭受了罕见大范围雨雪冰冻, 全省 52 个县市降雪, 最大积雪深度达 32 厘米, 各地冻害严重(中国气象灾害大典·福建卷, 2007)。2008 年 1 月底至 2 月初, 福建省西北部同样遭受了罕见的持续低温雨雪冰冻灾害, 多地工矿企业因供电、交通中断而停产; 山区电网因电力线路覆冰及高山毛竹树木覆冰倾压相继出现输电线路跳闸; 道路结冰, 高速公路封闭, 造成直接经济损失 53.6 亿元。2016 年 1 月 21~26 日, 福建省出现大范围低温阴雨(雪)天气, 31 站达寒潮标准, 6 站极端最低气温刷新纪录, 导致春茶、香蕉、枇杷、龙眼等经济作物和蔬菜冻害严重。

与全国多数地区一致, 福建的低温灾害自 2004 年起趋于严重, 而持续低温的灾害和影响往往更突显。研究持续低温灾害的成因、致灾事件和变化趋势, 加强持续低温灾害的监测、预测、预警和风险评估, 为决策部门和公众提供科学的服务信息, 对合理调整和布局生产生活、趋利避害具有重要的意义。本文通过分析福建省近 60 年冬季持续低温事件的发生频次、强度和持续时间等多尺度演

变特征及其海洋和大气影响因子，为开展持续低温预报方法研究和业务服务提供技术支撑。

2 资料与方法

2.1 资料

(1) 本文选取了福建省 66 个国家气象站 1960-2020 年逐日平均气温和最低气温，该资料为经过质量审核的器测记录；

(2) 太平洋年代际振荡(PDO)指数的获取网址为：<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/> [2021-12-23]；

(3) 厄尔尼诺和南方涛动(ENSO)指数由国家气候中心“百项气候系统指数集”中提取。同时使用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)自1950年以来的海洋尼诺指数(ONI)指数：

https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php [2021-12-23]；

(4) 热带大气季节内振荡(MJO)指数(Wheeler and Hendon, 2004)的获取网址为：
<http://www.bom.gov.au/climate/mjo/> [2021-12-23]；

(5) 大气变量采用了美国气象环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)的Reanalysis 1 逐日 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 格点资料(Kalnay et al., 1996)，起止时间为1960年1月1日~2020年12月31日。

其中资料(2)和资料(3)为月资料。

2.2 定义与分析方法

(1) 本文所指冬季定义为前一年12月至当年2月，如1961年冬季指1960年12月1日~1961年2月28日。

(2) 冬季持续低温事件：寒潮及强冷空气的影响主要体现在平均气温和最低气温剧降，因此研制逐日低温指数时主要考虑平均气温距平和日极端最低气温两项，前者主要考虑降温范围及强度，后者结合福建农业和经济作物生长及受冻的极端低温阈值(-3℃、0℃、3℃和10℃)，构建逐日低温指数如下：

$$dwzs = \sum_{i=1}^{N1} a_i * Ta_i + \sum_{j=1}^{N2} b_j * Tn_j \quad (1)$$

其中，N1为日平均气温距平等级数，N2为日极端最低气温等级数，分别取为6和4； T_a 为当日各个等级气温距平的相应站数， T_n 为当日各个等级极端最低气温的相应站数，a和b分别为上述两项因子对应等级的权重，详见庄瑶等(2015)。

在此基础上，定义冬季低温日阈值取为多年冬季逐日低温指数的0.5倍均方差，持续5天达到

该阈值以上即为出现一次持续低温事件，若两次持续低温事件间隔 1 天，视为同一个事件。基于该定义的逐日低温指数、冬季平均低温指数、持续低温事件总强度和平均强度均为无量纲变量。该指数充分考虑了持续低温事件的空间范围、过程强弱及致灾影响，并已经应用于福建省冬季持续低温事件实时监测评估和 10-30 天延期预报业务服务。

(3) 揭示持续低温事件低频特征时，采用了功率谱分析和小波分解方法，讨论海洋和大气影响因子时，采用了相关分析、合成分析和统计检验等方法，详见魏凤英(2009)。

3 冬季持续低温事件的多尺度特征

3.1 频次

根据冬季持续低温事件的定义，确定1961-2020年冬季福建省共出现114次持续低温事件(图1a)，平均每年1.9次，均方差为1.3。福建冬季持续低温频次呈现显著的年际振荡特征，年频数最多为4次，出现在1967、1970、1974、1977、1986、1996 和2014 年共7年；11年未出现持续低温事件，出现3次共14年，出现2次共16年，其余12年出现1次，这与历史文献（如《福建省志·气象志》和《中国气象灾害大典·福建卷》）收录的典型低温致灾事件相吻合。冬季持续低温事件年频次呈现较明显的减少趋势，20世纪80年代中期以前为多发期，其后为少发期，其中2015~2020年出现6次持续性低温事件，年均1次，减少趋势更为突显。

图1a还给出了1961-2020年冬季福建省平均气温的演变，与持续低温事件频次呈显著的负相关，相关系数为-0.65，即发生持续低温事件越频繁，该年冬季平均气温越低。在全球变暖背景下，福建冬季平均气温上升趋势明显，特别是20世纪90年代后期起尤为显著，以2017和2020年13.1℃居最高、2019年12.9℃位列第二，突变的时间发生在20世纪80年代后期（图1b），这与王遵娅等（2004）的研究结论相吻合。

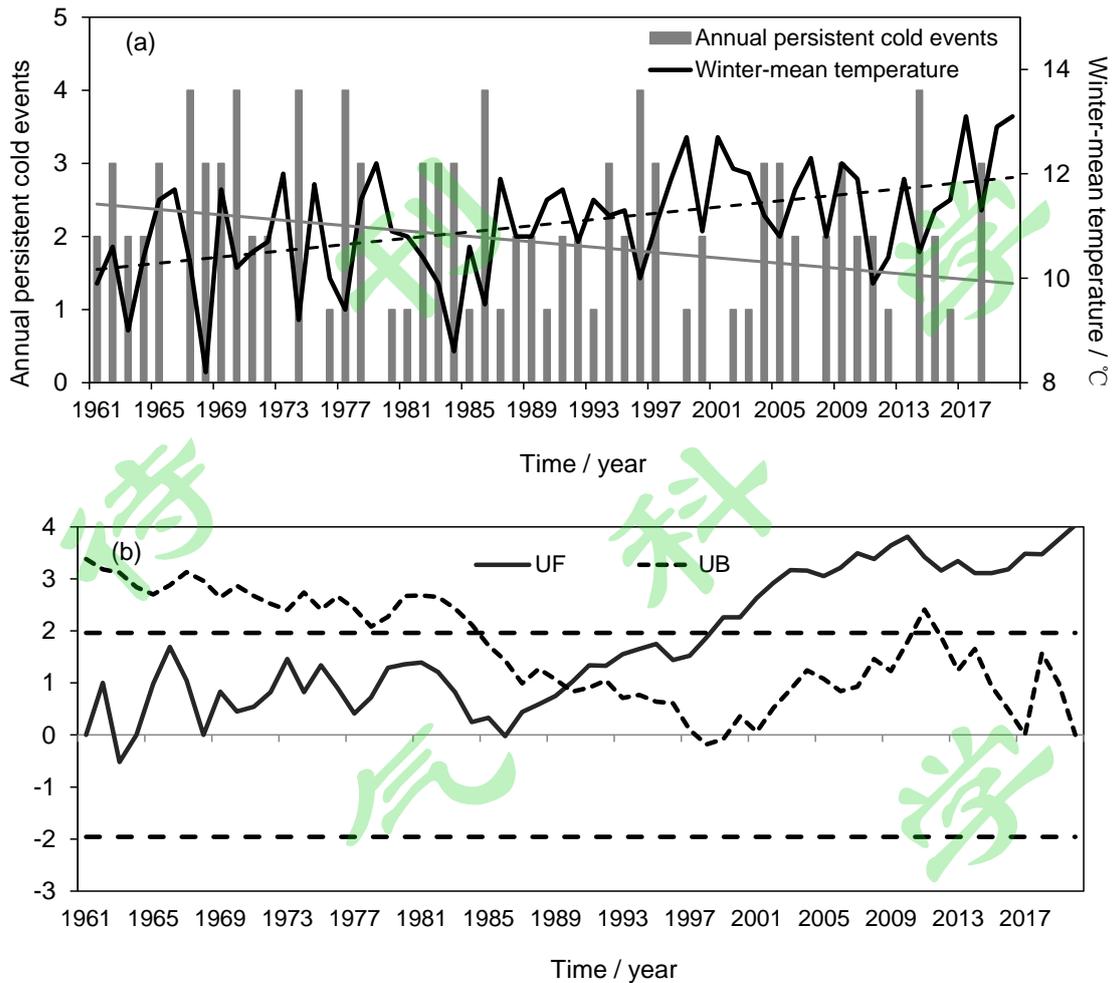


图1 (a) 1961-2020年冬季持续低温频次(柱状)、平均气温(曲线, °C)和(b)冬季平均气温的Mann-Kendal趋势检验
 Fig.1 (a) Annual persistent cold events frequency (column), winter-mean temperature (line, °C) and (b) Mann-Kendall test of winter-mean temperature in Fujian province from 1961 to 2020

3.2 强度

分析 114 次冬季持续低温事件的总强度和平均强度 (图 2), 发现持续低温事件的总强度和平均强度亦存在显著的振荡特征, 114 次持续低温事件的平均总强度和平均强度分别为 527.3 和 50.5。大多数持续低温事件的总强度越大, 其平均强度越强, 但 1974、1992 和 2000 年持续低温事件总强度不突出但平均强度异常强, 这和持续时间有关。受全球变暖的影响, 持续低温事件的总强度存在较明显的减弱趋势, 20 世纪 80 年代中期之前偏强、之后明显偏弱。平均强度减弱趋势较总强度略平缓且存在显著的年代际变化特征, 20 世纪 80 年代前偏强、80 年代至 90 年代初偏弱、随后又以偏强为主要特点。总强度和平均强度的变化趋势与庄瑶等 (2015) 的分析结论一致, 但近几年较强持续低温事件的出现使得减弱趋势一定程度上有所缓解。

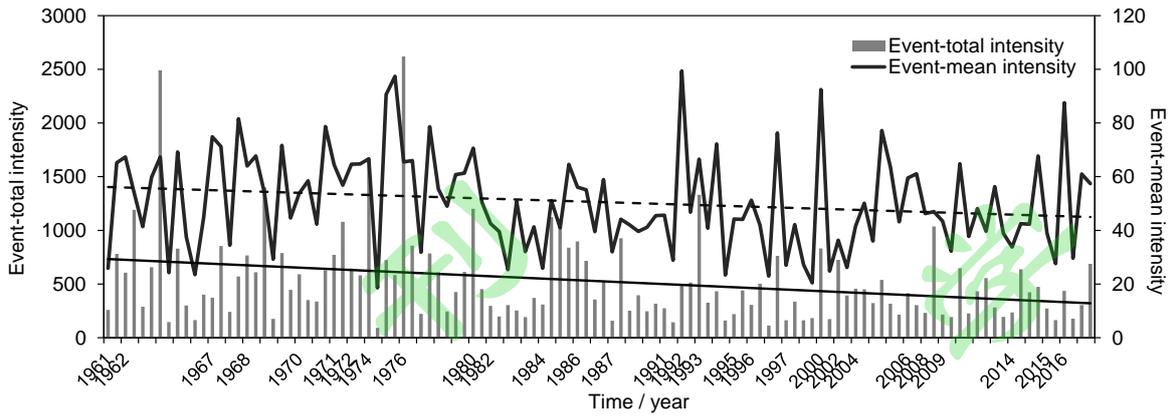


图2 114次福建冬季持续低温事件总强度（柱状）和平均强度（曲线）演变

Fig.2 Evolution of total (column) and average intensity (line) of winter persistent cold events

3.3 持续时间

114次持续低温事件的持续天数分布（图3）同样表现出显著的振荡特征，总体呈减少趋势，20世纪80年代之前持续时间较长，之后持续时间较短。平均持续时间为10.1天，均方差为6.2天，最长为1975年12月10日至1976年1月18日的持续低温事件，长达40天，其次是1962年12月30日至1963年2月4日的持续低温事件，长达37天。114次持续低温事件中，持续时间为5~7天和持续时间为8~14天各出现49次，持续时间为15~21天和持续时间22天以上的超长事件各出现8次，即86%的持续低温事件的持续时间在两周以内。

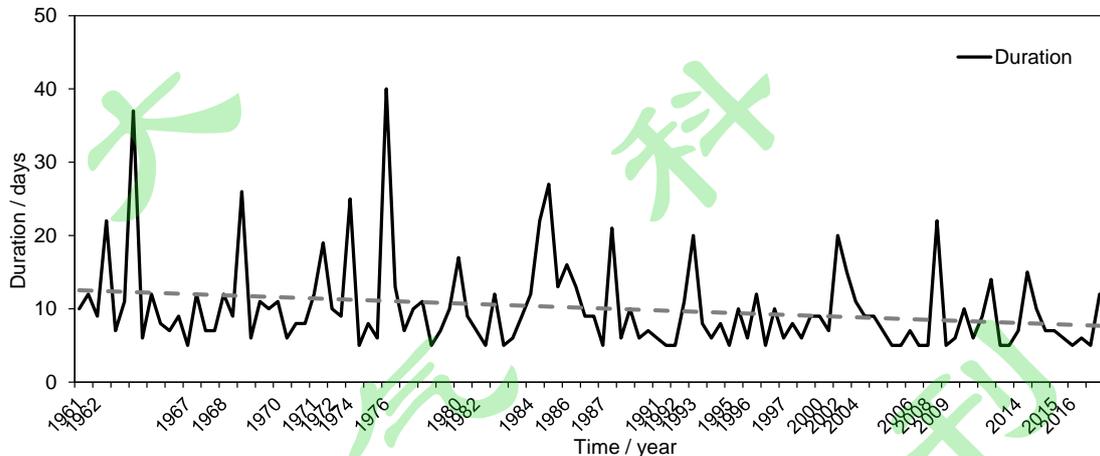


图3 114次福建冬季持续低温事件的持续天数演变（单位：天）

Fig.3 Evolution of the duration of winter persistent cold events (units: day)

3.4 低频特征

余汶樵和高庆九（2020）研究了偏东路径南下冷空气造成的南方低温事件中准双周振荡特征及低频环流特征，表明我国南方地区最低温度存在显著的10~20天振荡周期。对1961~2020年冬季逐日低温指数进行功率谱分解（图4a），分析福建冬季持续低温事件的低频特征。可以看到，福建冬季低温指数存在显著的10~20天和30~60天低频周期，与持续低温事件以14天以内居多相吻合。对2008年福建冬季逐日低温指数的小波分析（图4b）结果也表明2007年12月下旬~2008年2月存在显著的

10-20天和明显的30-60天低频周期，其中1月26日~2月16日的持续低温事件为10-20天和30-60天低频叠加结果，与马宁等（2011）的结论一致。

对1961~2020年冬季平均的低温指数进行小波分解，获取其年际变化特征（图4c）。结果发现，20世纪80年代中期以前具有显著的准2年和4-8年周期，尤其在20世纪70年代中后期准8年周期达到95%置信度水平，这可能与ENSO等海洋强信号相联系；20世纪80年代后期起，主要以准4年周期变化为主，冬季冷暖变化频率变快，且强度明显偏弱，这可能与大气环流发生年代际调整相联系，近年来准2-4年周期逐渐突显，对应2014~2018年持续低温事件的集中出现。

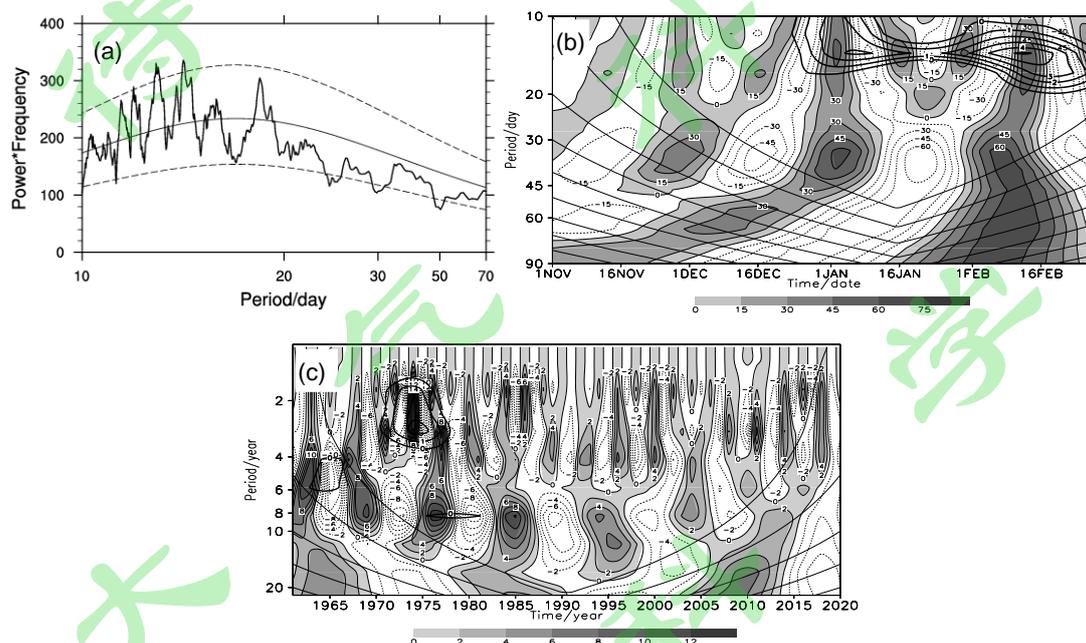


图4 (a) 1961-2020年福建冬季逐日低温指数的功率谱, (b) 2008年冬季逐日低温指数小波分解频谱图, (c) 同(b), 但为1961-2020年冬季平均低温指数

Fig. 4 (a) Power spectra of the daily index for winter 1961-2020, (b) wavelet decomposition spectra of the daily index for winter 2008, (c) same as (b), but for the mean index for winter 1961-2020

3.5 监测评估指标

为满足持续低温事件实时监测预测和评估业务需求，采取百分位分类法，对1961年以来冬季逐日低温指数、持续低温事件总强度和平均强度、冬季平均低温强度及持续低温事件的持续时间等监测指标进行了划分（表1）。可见，日指数高于67.8、总强度高于692.6、平均强度高于61.2和冬季平均强度高于19.7都表明持续低温事件为偏强以上等级，持续时间超过12天达到偏长以上等级。表2给出前10次总强度显著偏强的典型持续低温事件的发生时间、持续天数和总强度，有9次发生在20世纪80年代中期以前，仅1993年发生在20世纪90年代之后；持续低温典型事件的持续时间有8次在20天以上、总强度均显著偏强。从平均强度来看（表3），前10次持续低温事件主要发生在20世纪60~70年代和20世纪90年代以后，极大值99.4出现在1991年12月27~31日，此次

事件最大降温幅度达 21℃，极端最低气温低至-12.8℃（29 日出现在福建建宁）。

综合上述评估指标，图 5 给出了基于冬季平均低温强度的 1961-2020 年冷暖程度评估情况。偏冷以上年份有 14 年出现在 20 世纪 80 年代中期之前，为持续低温事件多发期；20 世纪 80 年代中期后仅有 3 年为偏冷年，为持续低温事件少发年；而显著偏暖年份主要从 20 世纪 90 年代后期起出现，与全球气候变暖趋势一致。分析逐年持续低温事件的最长持续天数，发现 20 世纪 80 年代之前 12 个偏冷年份中有 7 年的最长持续天数达到显著偏长；1989 年后有 3 年冬季出现持续时间超过 20 天的低温事件，但持续事件频次偏少。

表 1 持续性低温事件监测评估指标

Table 1 Assessment criterion of persistent cold events

评估要素	等级名称	显著偏弱	偏弱	正常	偏强	显著偏强
逐日指数	区间值（天）	<=19.2	19.3-30.4	30.5-67.7	67.8-102.2	>102.2
	百分位数（%）	11	30	70	90	100
事件总强度	区间值（天）	<=175.7	175.8-297.9	<=629.5	<=1037.6	>1037.6
	百分位数（%）	10	31	70	91	100
事件平均强度	区间值（天）	<=27.0	27.1-41.1	41.2-61.1	61.2-72.1	>72.1
	百分位数（%）	10	30	70	90	100
冬季平均强度	区间值（天）	<=8.0	8.1-13.0	13.1-19.6	19.7-31.0	>31
	百分位数（%）	9	30	70	91	100
	等级名称	显著偏短	偏短	中等	偏长	显著偏长
持续时间	区间值（天）	5 天	6-8 天	9-11 天	12-19	≥20
	百分位数（%）	16	49	74	90	100

表 2 总强度前 10 次典型持续性低温事件

Table 2 Top 10 typical persistent cold events in total intensity

序号	发生时间	持续天数	总强度
1	1975.12.10~1976.01.18	40	2618.7
2	1962.12.30~1963.02.04	37	2490.4
3	1973.12.16~1974.01.09	25	1666.1
4	1968.01.31~1968.02.25	26	1399.9
5	1993.01.15~1993.02.03	20	1330.4
6	1980.01.30~1980.02.15	17	1200.5

7	1962. 01. 16~1962. 02. 06	22	1191. 1
8	1983. 12. 24~1984. 01. 14	22	1123. 8
9	1984. 01. 19~1984. 02. 14	27	1106. 7
10	1971. 01. 22~1971. 02. 09	19	1080. 5

表 3 平均强度前 10 次典型持续性低温事件

Table 3 Top 10 typical persistent cold events in event-mean intensity

序号	发生时间	持续天数	总强度	平均强度
1	1991. 12. 27~1991. 12. 31	5	497. 1	99. 4
2	1974. 02. 24~1974. 03. 01	6	584. 1	97. 3
3	1999. 12. 20~1999. 12. 28	9	832. 1	92. 5
4	1974. 02. 06~1974. 02. 13	8	724. 7	90. 6
5	2016. 01. 22~2016. 01. 26	5	437. 8	87. 6
6	1967. 02. 10~1967. 02. 16	7	570. 9	81. 6
7	1977. 01. 28~1977. 02. 06	10	786. 2	78. 6
8	2004. 12. 28~2005. 01. 03	7	540. 1	77. 2
9	1996. 02. 18~1996. 02. 27	10	762. 9	76. 3
10	1967. 01. 01~1967. 01. 05	5	374. 4	74. 9

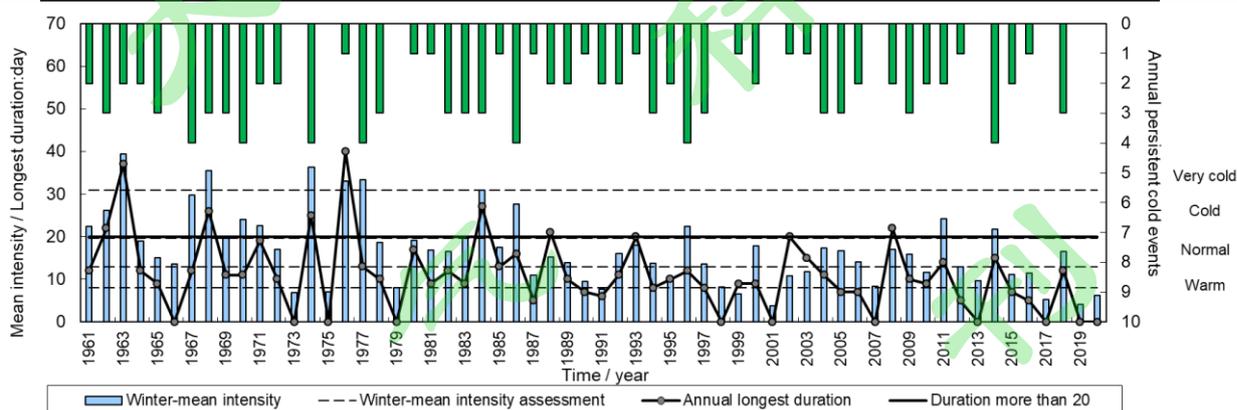


图 5 基于福建冬季低温平均强度的逐年冷暖程度演变（绿色柱状为逐年持续低温事件频数，蓝色柱状为冬季平均指数，折线为逐年最长持续天数，黑色虚线为冬季平均指数评估等级线，实线为异常偏长持续天数等级线）

Fig.5 Annual cold or warm winter evolution based on the mean intensity (green bars represent the frequency of persistent cold events, blue bars represent the winter mean index, broken lines represent the annual longest persistent days, black dashed lines represent the winter mean index rating lines, and solid lines represent the abnormal long duration)

4 冬季持续低温事件的影响因子

4.1 海温

王岱等(2020)的研究表明, PDO的年代际序列与年代际滤波后的最低气温在全国大部分地区呈显著正相关, 即 PDO负位相时中国冬季最低气温偏低。从冬季PDO指数低于 -1.0°C 的16年冬季28次持续性低温事件850hPa温度合成场及其距平分布(图6)可以看到, 0°C 等温线位于福建北部, 8°C 等温线南压至华南沿海, 而距平场上 40°N 以南的大范围地区为显著的负温度距平区, 福建上空受负温度距平高值区控制, 有利于持续低温事件的出现和维持。

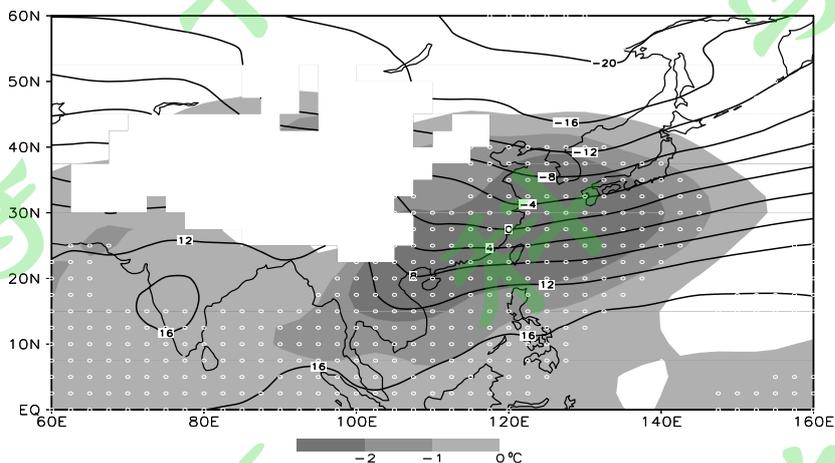


图6 冬季PDO指数低于 -1.0°C 的28次持续低温事件合成的850hPa温度场(等值线, 间隔 4°C)及其负异常(阴影, $^{\circ}\text{C}$, 空心圆为达到95%置信度水平)

Fig.6 Composite plot of the distributions of 850hPa temperature (contours, interval: 4°C) and negative anomalies (shadings, units: $^{\circ}\text{C}$) for the 28 persistent cold events with winter PDO index lower than -1.0°C (hollow circle indicates where the anomalies are above 95% confidence, units: $^{\circ}\text{C}$)

以一个均方差选取年频次的偏多(偏少)年, 偏多年为1967、1970、1974、1977、1986、1996和2014年共7年, 偏少年为1966、1973、1975、1979、1998、2001、2007、2013、2017和2019~2020年共11年。在偏多年中, 5年的冬季ONI指数为负值, 而偏少年中有7年为ONI正值。统计114次持续低温事件对应的ENSO各项指数分布, 发现66次发生在nino3.4指数负位相, 而85次出现在nino1+2指数的负位相。持续时间大于20天的事件绝大多数对应ONI负指数(10/11), 可见赤道中东太平洋冷海温异常的持续有利于持续低温事件的长时间维持。

冬季低温平均强度与同期nino3.4指数和nino1+2指数演变由图7a给出, 平均强度与nino指数存在显著的负相关(相关系数分别为 -0.36 和 -0.38), 即拉尼娜事件强度越强, 低温指数越大。逐年持续低温事件总强度与nino3.4和nino1+2指数相关系数分别为 -0.37 和 -0.41 , 均达到了99%的置信度水平。进一步分析冬季nino3.4指数低于 -1.5°C 的15次持续低温事件合成的500hPa位势高度场分布(图7b), 欧亚中高纬环流整体呈“北正南负”经向型分布, 东亚大槽偏强偏西, 我国大部地区为负位势高度距平控制, 福建上空为显著偏弱区, 有利于温度偏低和持续低温事件的发生。

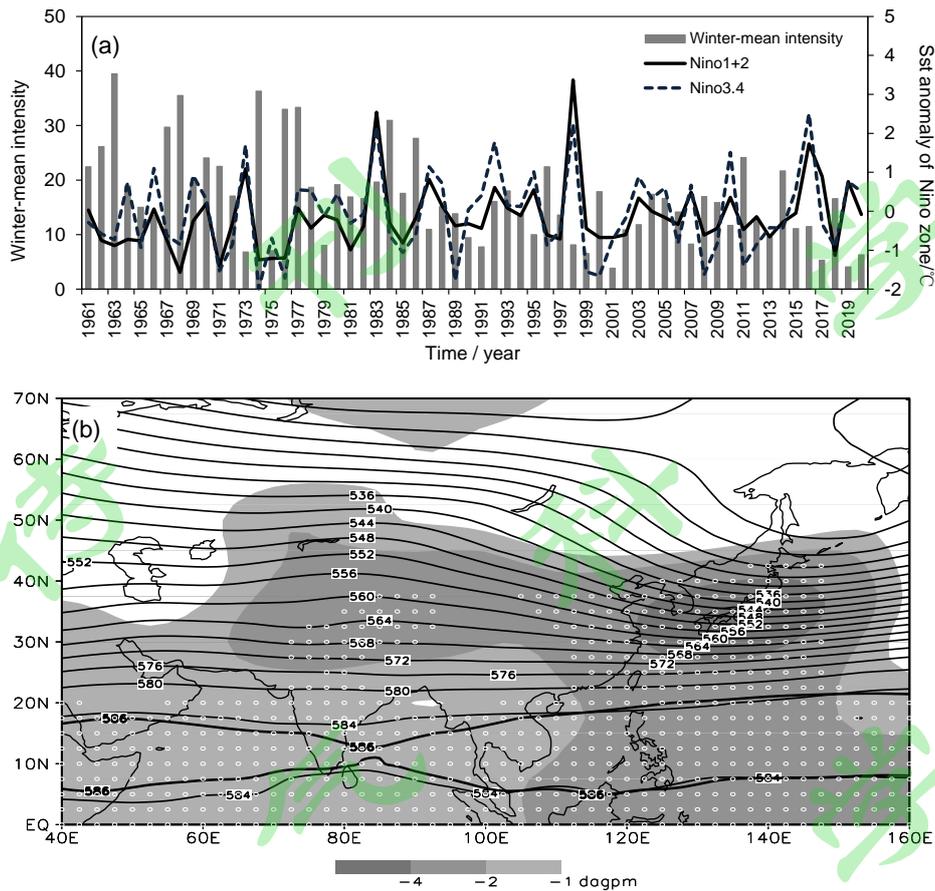


图 7 (a) 冬季低温指数平均强度 (柱状) 与同期 nino3.4 和 nino1+2 指数 (分别用虚线和实线表示, 单位: °C) 及 (b) 冬季 nino3.4 指数低于 -1.0°C 的 15 次持续低温事件合成的 500hPa 位势高度场 (阴影为负距平, 空心圆为达到 95% 置信度水平, 单位: dagpm)

Fig. 7 (a) Distribution of mean intensity of cold index (Column), Nino3.4 and Nino1+2 index (dotted and solid line respectively, units: °C) and (b) composite 500 hPa geopotential height field with winter Nino3.4 index below -1.0°C (negative anomaly shaded, hollow circle denotes 95% confidence, unit: dagpm)

4.2 MJ0

研究表明, 在 2008 年 1 月的南方持续低温雨雪冰冻事件中, 热带大气季内振荡 (MJ0) 活动扮演了重要的角色。张伟和江静 (2015) 讨论了 MJ0 对中国冬季持续低温事件的影响, 指出 MJ0 不同位相与不同范围的持续低温事件出现概率关系密切。统计 1980 年以来 72 次持续低温事件共 668 个低温日所对应的 MJ0 位相分布 (表 4), 当 MJ0 对流位于 5-7 位相时, 持续低温事件总日数居多, 并以第 7 位相为最多。从 1980 年以来 6 次持续 20 天以上的低温事件合成经向环流分布 (图 8) 可以看到, 10°N 以南的垂直上升运动增强, 其北侧 30°N 附近为异常的下沉气流, 即热带对流位于海洋大陆以东至西太平洋时, 对流激发的经向环流的下沉气流位于我国江南和华南, 导致福建地面偏北风异常加剧, 有利于持续低温事件出现和维持。

表 4 1980 年以来 72 次持续低温事件对应的逐日 MJO 位相频次

Table 4 Daily MJO-phase frequency corresponding to 72 persistent cold events since 1980

Phase1	Phase2	Phase3	Phase4	Phase5	Phase6	Phase7	Phase8
46	72	82	56	96	99	137	80

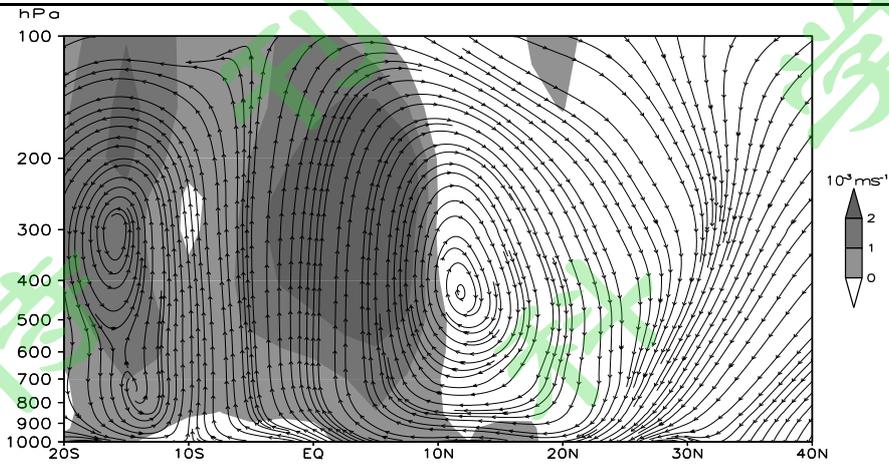


图 8 1980 年以来 6 次持续 20 天以上低温事件合成的 110°-120° E 平均经向环流
(垂直速度及其距平放大 1000 倍, 单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig.8 110°-120° E mean meridional circulation of 6 persistent cold events with duration more than 20 days since 1980(vertical velocity and its abnormality with 10^3 magnification, units: $m \cdot s^{-1}$)

4.3 冷空气

王晓娟等(2004)研究认为, 北极涛动(Arctic oscillation, 简称AO)的异常变化直接影响西伯利亚高压、阿留申低压、东亚地区极地东风以及东亚冬季风。福建省逐年冬季持续低温频次与AO的相关系数为-0.27, 达到了95%的置信度水平。统计114次持续低温事件的平均AO指数, 其中70次事件对应AO的负位相。

西伯利亚高压是冬季控制亚洲大陆近地面的最重要环流系统之一, 当西伯利亚高压强盛时, 南下冷空气活动增强。从1980年以来持续天数达到20天以上6次持续低温事件合成的海平面气压场(图9a)看到, 持续低温发生时, 西伯利亚高压范围偏大、强度偏强, 中心强度超过1040hPa, 此时东侧阿留申低压低于1000hPa, 气压梯度的加强, 导致冷空气南下, 显著影响福建甚至更低纬度地区。分析同期850hPa水平合成风场(图9b), 强盛的西北气流一直贯穿到30°N以南的江南、华南北部及东部大范围海域, 其后在25°N附近转为东北气流影响华南南部直至南海, 福建上空特别是西北部为显著的偏北风控制。持续的偏北风叠加北风异常, 有利于持续低温事件的强度增强和长时间维持。

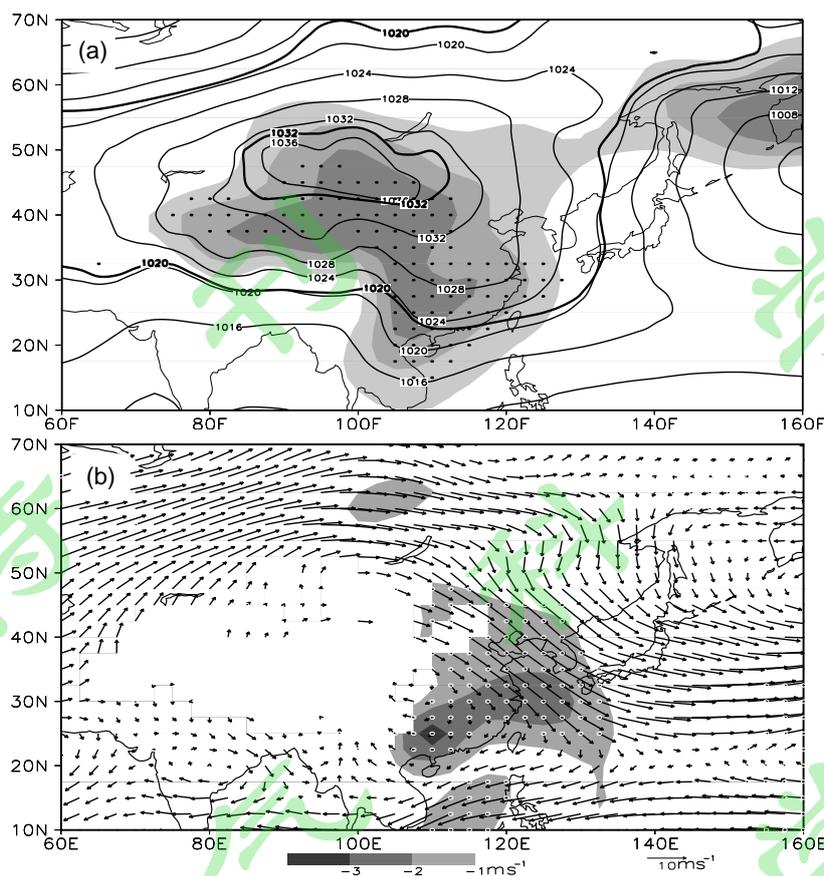


图9 1980年以来持续20天以上的6次低温事件合成的海平面气压场 (a, 阴影为距平, hPa) 和850hPa水平风场 (b, 阴影为经向风距平, $m \cdot s^{-1}$), 圆点表示达到90%置信度水平

Fig.9 Composite sea level pressure (a, positive anomalies are shaded, hPa) and 850hPa horizontal wind (b, negative meridional wind anomalies are shaded, $m \cdot s^{-1}$) of 6 persistent cold events with duration more than 20 days since 1980, with the circles indicating 90% confidence.

4.4 不同持续时长低温事件的环流特征

为进一步了解持续时间长、中、短的低温事件的关键环流是否存在显著差异, 根据图3和表1的评估标准, 选取了1961年以来持续时间显著偏短、中等和显著偏长且平均强度偏强以上的各7次持续低温事件, 分别简称“偏短型”、“中等型”和“偏长型”。图10给出了上述3类持续低温事件前7日至开始日合成的海平面气压场及500hPa位势高度场分布演变。在持续低温事件开始前9~10天(图略), 我国中东部经历了一次冷空气过程影响, 冷高压中心强度在1030~1035hPa之间, 总体路径偏东。前7天(图10a、b、c), 欧亚中高纬呈现“两槽一脊”分布, 亚洲脊区位于西伯利亚至贝加尔湖并向东北发展, 东亚大槽偏东, “偏短型”在新西伯利亚附近出现短波槽, 南侧为负高度距平控制; 冷空气开始再次积聚, “中等型”地面高压中心较其他两型偏东、强度略弱。

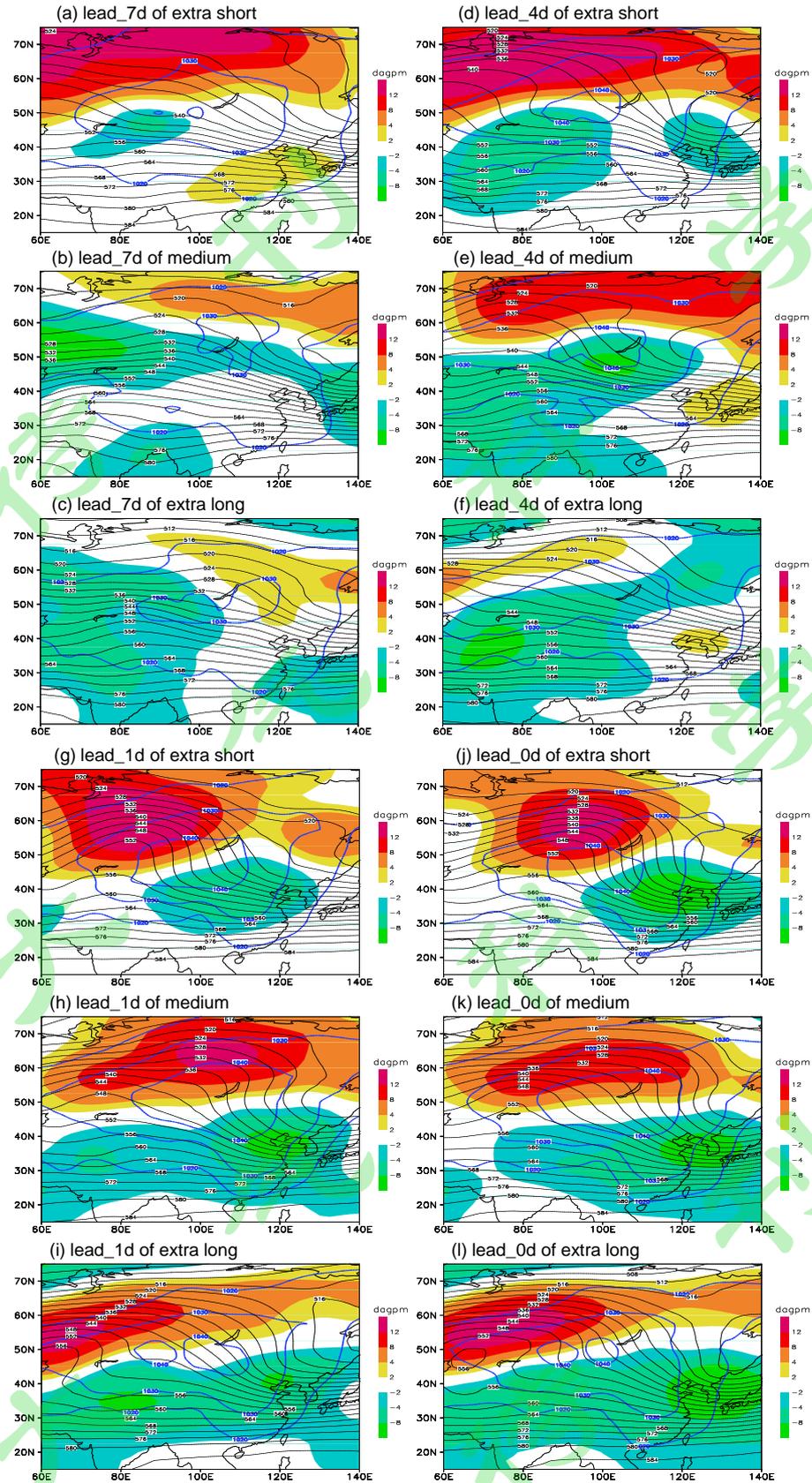


图 10 平均强度偏强以上的不同持续时间低温事件环流合成 (图中黑色实线为 500hPa 位势高度场, 间隔 4dagpm, 阴影为其距平; 蓝色虚线为海平面气压场 1020、1030 和 1040hPa 特征线)

Fig. 10 Composite circulations of persistent cold events with stronger mean intensity (the black bold lines are 500hpa geopotential height at the interval of 4dagpm, with the anomalies are shaded; the blue dashed lines are sea level pressure at 1020, 1030 and 1040hpa.)

前4天(图10d、e、f), 乌拉尔山东侧脊区向东发展, “偏短型”正位势高度距平达12dagpm以上, 贝加尔湖—巴尔喀什湖一带出现横槽, 槽前南侧的负位势高度距平有利于横槽加深发展; 地面冷高压控制新西伯利亚以东地区, 中心强度达到1045hPa, 其他两型冷高压强度增强较慢, 且“中等型”高压中心位置仍较偏东。前2-3天(图略), 高空脊区持续向东北发展, 而“偏短型”的横槽加强南压东伸堆积冷空气, 中心强度近1050hPa, 且1045hPa等压线南下进入新疆北部, 冷空气前端开始影响我国; “中等型”在巴尔喀什湖西侧形成槽区, 地面冷高压强度中心超过1047.5hPa, 并在强盛西北气流引导下不断向南扩散, 沿东路经蒙古进入我国东北和华北地区; “偏长型”与“中等型”较为相似, 冷空气沿脊前槽后的偏北气流南下。前1天(图10g、h、i), 位势高度距平场上亚洲中高纬呈典型的“北正南负”特征, “偏短型”横槽转竖, 冷空气主体进入我国西北地区; “中等型”冷空气继续南下到达华南沿海, 水平流场上具有较明显东路回流特征(图略); “偏长型”冷空气主体沿新疆、青海至河套以东一路南压, 1030hPa线覆盖了新疆和青海大部。持续低温事件开始日(图10j、k、l), 冷空气迅速贯穿至华南甚至南海区域, 1020hPa南压到达华南沿海, 同时“偏长型”高度场上, 贝加尔湖—巴尔喀什湖一带横槽已经建立, 为下一次冷空气影响提供了条件。

综上所述, “偏短型”持续低温事件存在典型的横槽转竖特征, 引导冷空气迅速南下, 与2016年1月下旬及2018年1月上旬的强冷空气影响情况极为相似(江琪等, 2016; 刘超等, 2018); “中等型”持续低温事件的冷空气路径则明显偏东; 对于“偏长型”持续低温事件, 冷空气影响主要呈现中路入侵特征。

5 结论和讨论

(1) 1961-2020年冬季福建省共出现114次持续低温事件, 平均每年1.9次。20世纪80年代中期以前为持续低温事件多发期, 其后为少发期; 持续低温事件的强度呈现前强后弱的分布特点; 持续时间以5~11天居多, 最长可达40天。

(2) 福建冬季低温指数存在显著的10-20天和30-60天低频周期, 年际尺度上以2-8年为显著周期。

(3) 采取百分位分类法, 确定了福建冬季逐日低温指数、持续低温事件总强度和平均强度、冬季平均低温强度及持续时间等监测评估指标。对1961-2020年福建冬季持续低温事件进行冷暖评估, 20世纪80年代中期之前, 持续低温事件多发期有14年为偏冷年; 20世纪80年代后期起的持续低温事件少发期仅3年为偏冷年。

(4) 福建冬季持续低温事件和PDO、ENSO、MJO及欧亚中高纬度冷空气活动密切相关: PDO和ENSO的冷位相有利于持续低温事件的发生和维持; 当热带对流位于海洋大陆至西太平洋时, 对流激

发的经向环流的下沉气流位于江南和华南，导致福建地区为异常的偏北风控制，易出现持续低温事件；AO 负位相有利于福建冬季持续低温事件偏多，强盛的西伯利亚高压的存在，使得偏北气流可贯穿至华南南部，引导冷空气不断南下，引发持续低温事件的发生。

(5) 不同持续时长低温事件的中低层合成环流的主要区别在于冷空气南下影响路径不同，“偏短型”事件存在显著的横槽转竖特征，以偏西路径为主，“中等型”事件的冷空气影响为典型的偏东路径，有较明显的东路回流特点，而“偏长型”事件则以中路为主要影响特点。

本文初步探讨了海温异常和大气环流因子对福建冬季持续低温事件的影响，所得到的结论仍比较初浅。首先，冷空气的来源及路径对于持续低温事件的频次和强度、影响范围及致灾强度至关重要，特别是持续时间长达 20 天以上的低温事件往往由多次冷空气持续影响所致，影响过程更为复杂，需要通过更加细致的工作进行归类总结。其次，北极海冰和海表温度异常可能对 2008 和 2018 年两次全国范围持续低温事件的发生时间、强度及维持发生重要影响（秦明月和李双林，2020），对于福建范围的持续低温事件，这些因子的影响又有何独特性？此外，不同区域海洋异常状况的差异性、南半球大气活动的异常等都有可能影响福建冬季持续低温事件的时空分布及其致灾程度，其影响过程和影响机理尚不清楚，有待今后通过更多的典型持续低温事件的深入分析来加以探究。

参考文献 (References)

- Bueh C, Shi N, Xie Z W. 2011. Large-scale circulation anomalies associated with persistent low temperature over southern China in January 2008 [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 12 (3): 273–280. doi:10.1002/asl.333
- 布和朝鲁, 彭京备, 谢作威, 等. 2018. 冬季大范围持续性极端低温事件与欧亚大陆大型斜脊槽系统研究进展[J]. *大气科学*, 42(3): 656–676.
- Bueh Cholaw, Peng Jingbei, Xie Zuwei, et al. 2018. Recent progresses on the studies of wintertime extensive and persistent extreme cold events in China and large-scale tilted ridges and troughs over the Eurasian Continent [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 42 (3): 656–676. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17249
- 丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 等. 2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J]. *气象学报*, 66(5): 808–825. Ding Yihui, Wang Zunya, Song Yafang, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming[J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66 (5): 808–825.
- 付建建, 李双林, 王彦明. 2008. 前期海洋热状况异常影响 2008 年 1 月雪灾形成的初步研究[J]. *气候与环境研究*, 13(4): 478–490. Fu Jianjian, Li Shuanglin, Wang Yanmin. 2008. Influence of prior thermal state of global oceans on the formation of the disastrous snow storm in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13(4): 478–490. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.12
- 福建省地方志编纂委员会. 1996. 福建省志·气象志[M]. 北京: 方志出版社. Fujian Provincial Committee for compilation of local chronicles. 1996. Fujian provincial meteorological records [M]. Beijing: Fangzhi Publishing House.
- 韩永秋, 周连童, 黄荣辉. 2021. 中国冬半年极端低温事件的时空特征及其与东亚冬季风的关系[J]. *气候与环境研究*, 26(1): 1–17. Han Yongqiu, Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2021. Characteristics of the extreme low temperature events in China during boreal winter and its relationship to East Asian winter monsoon [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 26 (1): 1–17. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19018
- Hong C. C., Li T. 2008. The Extreme cold anomaly over Southeast Asia in February 2008: Roles of ISO and ENSO [J]. *J. Climate*, 22: 3786–3800.
- 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 [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekç, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- 江琪, 马学款, 王飞. 2016. 2016 年 1 月大气环流和天气分析[J]. *气象*, 42(4): 514–520. Jiang Qi, Ma Xuekuan, Wang Fei. 2016. Analysis of the January 2016 atmospheric circulation and weather [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 42(4): 514–520.
- Kalnay, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–470.
- 刘超, 江琪, 桂海林. 2018. 2018 年 1 月大气环流和天气分析[J]. *气象*, 42(4): 590–596. Liu Chao, Jiang Qi, Gui Hailin. 2018. Analysis of the January 2018 atmospheric circulation and weather [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 44(4): 590–596.
- 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 Ning, Li Yuefeng, Ju Jianhua. 2011. Intraseasonal oscillation characteristics of extreme cold snowy and freezing rainy weather in southern China in early 2008 [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 30(2): 318–327.
- Peng J B, Bueh C. 2011. The definition and classification of extensive and persistent extreme cold events in China [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 4 (5): 281–286. doi:10.1080/16742834.2011.11446943
- Peng, J B, Bueh C. 2012. Precursory signals of extensive and persistent extreme cold events in China [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 5: 252–257. doi: 10.1080/16742834.2012.11446999
- 彭京备, 孙淑清. 2017. 我国南方持续性低温与东亚冬季风“北弱南强”模态的关系[J]. *大气科学*, 41(4): 691–701. Peng Jingbei, Sun Shuqing. 2017. The relationship between persistent cold spell in southern China and the variation mode of East Asian winter monsoon with opposite signs in the North and South [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 41 (4): 691–701. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1612.16145
- 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. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19154
- 施宁, 布和朝鲁. 2015. 中国大范围持续性极端低温事件的一类平流层前兆信号[J]. *大气科学*, 39(1): 210–220. Shi Ning, Bueh Cholaw. 2015. A specific stratospheric precursory signal for the extensive and persistent extreme cold events in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 39 (1): 210–220.
- 宋德众, 蔡诗树. 2007. 中国气象灾害大典·(福建卷) [M]. 北京: 气象出版社. Song D Z, Cai S S. 2007. China meteorological disaster collection

- (Fujian volume)[M]. Beijing: [Meteorological Press](#).
- Sun J, Zhao S. 2010. The impacts of multiscale weather systems on freezing rain and snowstorms over southern China [J]. [Weather and Forecasting](#), 25(2): 388-407.
- 陶诗言, 卫捷. 2008. 2008年1月我国南方严重冰雪灾害过程分析[J]. [气候与环境研究](#), 13(4): 337-350. Tao Shiyan, Wei Jie. 2008. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the southern China[J]. [Climatic and Environmental Research](#) (in Chinese), 13(4):337-350.
- 王岱, 孙银川, 游庆龙. 2020. 太平洋年代际振荡对中国冬季最低气温年代际变化的贡献[J]. [气候变化研究进展](#), 16(1):70-77. Wang Dai, Sun Yinchuang, You Qinlong. 2020. Contribution of Pacific Decadal Oscillation to interdecadal variability of winter minimum temperature in China [J]. [Climate Change Research](#) (in Chinese), 16(1): 70-77.
- 王晓娟, 方之芳. 2004. 中国地面气温年际和年代际变化及其与北冰洋涛动指数的关系[J]. [高原气象](#), 23:80-88. Wang Xiaojuan, Fang Zhifang. 2004. Surface air temperature in China and its relation to Arctic oscillation index [J]. [Plateau Meteorology](#) (in Chinese), 23(sp):80-88.
- 王允, 张庆云, 彭京备. 2008. 东亚冬季环流季节内振荡与2008年初南方大雪关系[J]. [气候与环境研究](#), 13(4):459-467. Wang Yun, Zhang Qingyun, Peng Jingbei. 2008. Relationship between the intraseasonal oscillation of East Asian monsoon circulation and the heavy snow over southern China in boreal winter of 2007/2008[J]. [Climatic and Environmental Research](#) (in Chinese), 13(4):459-467.
- 王遵亲, 丁一汇, 何金海, 等. 2004. 近50年来中国气候变化特征的再分析[J]. [气象学报](#), 62(2):228-236. Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2004. An updating analysis of the climate change in recent 50 years[J]. [Acta Meteorologica Sinica](#) (in Chinese), 62(2):228-236.
- 魏凤英. 2009. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: [气象出版社](#). Wei Fengying. 2009. Diagnostic and prediction techniques of modern climate statistics [M]. Beijing: [Meteorological Press](#).
- Wen M, Yang S, Kumar A. 2009. An analysis of the large-scale climate anomalies associated with the snowstorms affecting China in January 2008[J]. [Mon Wea Rev.](#), 137(3):1111-1131.
- Wheeler, M. C, Hendon H. H. 2004. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction [J]. [Mon. Wea. Rev.](#), 132:1917-1932.
- 吴嘉惠, 任荣彩. 2021. 冬季全国性持续低温事件过程中的平流层-对流层相互作用[J]. [大气科学](#), 45(3):558-572. Wu Jiahui, Ren Rongcai. 2021. Stratosphere-Troposphere interactions during nationwide extensive and persistent extreme cold events in boreal winter [J]. [Chinese Journal of Atmospheric Sciences](#) (in Chinese), 45(3): 558-572. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.20125
- 余汶楠, 高庆九. 2020. 1996年冬季一次南方低温事件的低频特征分析及诊断[J]. [大气科学](#), 44(2):257-268. Yu Wenqiang, Gao Qingjiu. 2020. Analysis and diagnosis of low-frequency characteristics in a low temperature event in southern China in the winter of 1996 [J]. [Chinese Journal of Atmospheric Sciences](#) (in Chinese), 44(2): 257-268. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1909.18190
- 张伟, 江静. 2015. 热带大气季内振荡对中国冬季持续低温事件的影响[J]. [气象科学](#), 35(4):422-429. Zhang Wei, Jiang Jing. 2015. Influence of Madden-Julian oscillation on winter persistent cold events in China [J]. [Journal of the Meteorological Sciences](#) (in Chinese), 35(4): 422-429. doi: 10.3969/2014jms.0042
- 庄瑶, 鲍瑞娟, 郑荣玉. 2015. 福建省冬季持续性低温变化特征分析[J]. [海峡科学](#), 4: 23-26. Zhuang Yao, Bao Ruijuan, Zheng Rongyu. 2015. Characteristics of persistent low temperature in winter in Fujian province [J]. [Strait Science](#) (in Chinese), 4:23-26.
- Zhou W, Chan J C, Chen W, et al. 2009. Synoptic-scale controls of persistent low temperature and icy weather over southern China in January 2008[J]. [Mon. Wea. Rev.](#), 137(11):3978-3991.