



云南寒潮的气候特征及其不同路径的大气环流差异

杨超^{1,2}, 杨素雨^{1,2**}, 陶云³, 晏红明³

[1. 云南省气象台, 云南昆明 650034; 2. 中国气象局横断山区(低纬高原)灾害性天气研究中心, 云南昆明 650034; 3. 云南省气象台, 云南昆明 650034]

摘要:利用云南省125个气象站1981—2021年逐日平均气温和最低气温的资料,分析了云南省寒潮天气的气候变化特征及大气环流特征.结果表明:①1981—2021年云南寒潮频次总体呈减少趋势,12月至次年1月为寒潮多发期,云南寒潮类型以低温寒潮为主;②当极涡偏强、贝加尔湖阻塞高压偏强、东亚大槽和南支槽偏强、西太平洋副热带高压偏弱偏南及东亚地面冷高压偏强时,云南寒潮频次偏多;③造成云南寒潮的3条路径中,东北路径和偏东路径占比达到90%以上.西北路径寒潮发生最少,通常伴随着大幅的最低气温下降,常造成云南重霜冻天气,大部分的西北路径寒潮发生在东部路径寒潮的中后期;④云南西北路径寒潮相较东部路径寒潮地面冷高压位置偏西偏强,南支槽偏东,高空冷平流偏强,低纬度西风带风速偏弱,青藏高原东南侧下沉气流偏强.

关键词:云南寒潮;气候特征;大气环流特征;年际变化

中图分类号:P458.1 **文献标志码:**A **文章编号:**0258-7971(2023)06-1272-09

寒潮是影响中国最主要的灾害性天气,寒潮带来剧烈的降温和大风,并伴有雨、雪、霜冻等天气,给国民经济和人民生活财产造成严重的损失^[1-2].早在20世纪50年代,李宪之^[3]就对东亚寒潮进行了分型;陶诗言^[4]对影响中国大陆冷空气的源地和路径进行了研究.至20世纪80年代,仇永炎等^[5-6]、章基嘉等^[7]和刘怡等^[8]对寒潮中期预报方法进行了一系列探索.近年来,王遵娅等^[9]、魏凤英^[10]、钱维宏等^[11]和康志明等^[12]发现在气候变暖背景下中国寒潮的频次和强度呈减少趋势,郭其蕴^[13]、武炳义等^[14]、陈海山等^[15]、梁苏洁等^[16]和叶丹等^[17]对中国寒潮活动异常的成因进行了研究.

云南省位于我国西南边陲,地处低纬度高原地区,地形复杂、气候多样,寒潮伴随的低温雨雪霜冻等灾害是云南省冬半年主要的气象灾害之一^[18].云南气象工作者对影响云南的寒潮天气进行了一些研究,张云瑾等^[19]对影响云南的强冷空

气特点进行了分析,指出云南存在锋面附近的雨雪天气和造成重霜冻的晴好天气两种寒潮天气过程.张腾飞等^[20]分析了云南省的4次降雪寒潮个例的环流形势以及水汽的来源;海云莎等^[21]研究了云南寒潮的时空分布特征和变化规律;许美玲等^[22]分析了云南强冷空气的活动特征并对云南寒潮的天气形势进行了研究;姚愚等^[23]发现影响云南的冷空气活动呈减少趋势;陶云等^[24-25]对寒潮与昆明准静止锋的气候关联性以及寒潮降雪过程的环流型进行了研究.上述研究成果斐然,但对于云南寒潮频次异常和不同路径下寒潮的大气环流特征研究不多.本文利用1981—2021年云南省125站逐日气温资料及欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的ERA5再分析资料,分析云南41a的寒潮的气候变化特征,并对寒潮频次异常年份的大气环流异常、不同路径下寒潮的环流

收稿日期:2022-11-29; 接受日期:2023-04-23; 网络出版日期:2023-06-29

基金项目:国家自然科学基金(U1902209);中国气象局复盘专项(FPZJ2023-119);云南省气象局创新团队项目(2022CX01);云南省气象局自筹项目(CS202202).

作者简介:杨超(1988-),男,云南人,工程师,主要研究短期天气预报. E-mail: superchad@sina.com.

**通信作者:杨素雨(1980-),女,云南人,研究员级高级工程师,主要研究天气预报和数值模式产品评估释用. E-mail: 14532893@qq.com.

形势进行研究.

1 资料、标准和方法

1.1 资料和方法 采用云南省 125 个国家级气象站 1981—2021 年逐日平均气温、最低气温、日照时数等资料, 欧洲中期天气预报中心 ERA5 数据集 1981—2021 年逐时 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 再分析资料的风场、温度场、海平面气压场、高度场等变量场. 气候平均取 1991—2020 年共 30 a 的资料, 运用数理统计方法中的相关分析、 t -检验、一元回归分析进行统计分析.

1.2 云南全省性寒潮标准 按照 2022 年云南省气象局科技与预报处发布的《云南省气象灾害预警标准(省级)》中的全省寒潮标准, 标准如下: 云南省预计未来 3 天内某日, 3 个及以上州(市)大部地区(2/3 以上站点)日平均气温将下降 6°C 以上且最低气温 $\leq 4^\circ\text{C}$; 或者日平均气温将下降到 6°C 以下, 且最低气温 $\leq 4^\circ\text{C}$, 记为一次全省性寒潮. 寒潮发生次数统计按照 24 h 进行计次统计, 连续数日达到全省性寒潮标准, 记为多次寒潮过程.

根据上述标准, 统计冬半年(11 月至次年 4 月)云南全省性寒潮出现的频次, 并根据影响云南冷空气活动的特点对寒潮过程进行分类. 分类原则为凡满足日平均气温变化标准称为降温寒潮, 满足低温标准为低温寒潮. 从强度来看, 大部分满足低温标准的冷空气强度更强; 但从日常天气预报业务出发, 同时满足 2 个标准的寒潮记为降温寒潮更能体现出天气状态的转折, 本文将同时满足降温寒潮类标准和低温寒潮类标准的天气, 记为降温寒潮类.

1.3 寒潮路径统计标准 《云南预报员手册》^[22]指出, 冷空气从北方南下进入云南大致有 3 条路径: 第 1 条是东北路径, 冷空气从河西走廊翻过秦岭达

到四川盆地或贵州后, 从滇东北进入. 第 2 条是偏东路径, 冷空气主力偏东进入华南一带, 产生回流天气, 从滇东南进入. 第 3 条是西北路径, 高空西北气流携带冷平流直接翻过青藏高原, 冷空气从高原东南部越过横断山脉进入云南, 其特点是以高空冷平流和下沉气流为主, 无锋面.

本文结合《云南预报员手册》^[22], 寒潮路径的统计标准如下: 寒潮发生时, 滇东及以东的区域($103^\circ \sim 108^\circ\text{E}$, $22^\circ \sim 30^\circ\text{N}$) 850 hPa 及地面以东北气流为主导, 且锋面自东北向西南移动, 定义为东北路径寒潮; 滇东及以东的区域 850 hPa 及地面以偏东或东南气流为主导, 且锋面自东向西移动, 定义为偏东路径寒潮; 850 hPa 及地面无明显锋面, 500 hPa 有明显高空冷槽及冷平流, 定义为西北路径寒潮.

2 云南寒潮天气的气候变化特征

2.1 寒潮过程年际变化特征 图 1 是云南寒潮发生频次历年变化图. 分析图 1 可见, 云南寒潮频次具有明显的年际、年代际变化特征. 1981—2021 年, 共出现全省性寒潮 381 次, 平均为 9.3 次/a, 其中 1983 年寒潮出现频次最多, 为 27 次, 其次是 1993 年, 出现 24 次, 寒潮出现频次最少为 1988、2003 年和 2017 年, 皆为 2 次. 分析趋势变化发现, 频次线性趋势倾向值为 -0.1198 次/a, 相关系数为 -0.24 , 通过了 0.1 的显著性检验, 说明云南寒潮频次近 41 a 有显著减少的趋势. 从寒潮频次距平变化上看, 云南寒潮有 3 年大于 10 次/a 的正距平, 分别为 1983、1992 年和 1993 年; 最大为 1983 年, 距平为 17.5 次. 20 世纪 80 年代至 90 年代初为寒潮多发年代, 以正距平为主, 1993—2021 年以后云南寒潮较少发生, 以负距平为主, 为 18 a 负距平和 10 a 正距平.

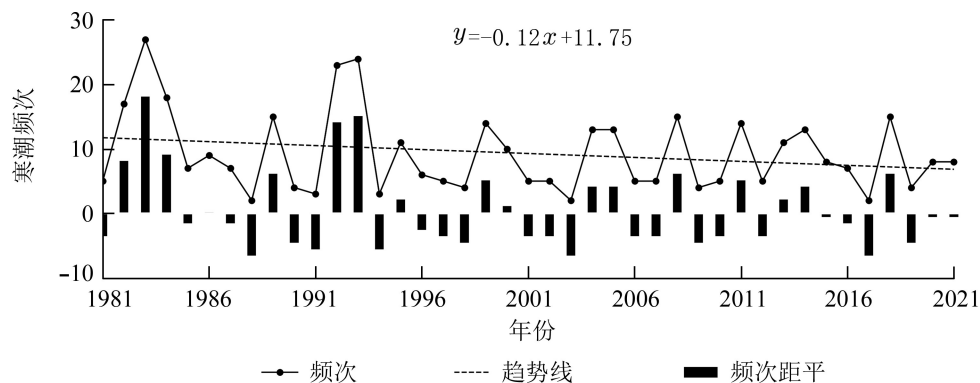


图 1 1981—2021 年云南寒潮年际变化

Fig. 1 Interannual variations of the cold wave from 1981 to 2021 in Yunnan

利用国家气候中心提供的 1981—2020 年 88 项环流特征指数资料, 计算得出北极涛动指数 (Arctic Oscillation, AO) 近 41 a 呈现为上升趋势. 钱维宏等^[1]发现随着气候变暖, AO 指数在 1960—2002 年呈上升趋势, 而 AO 指数的上升会影响中国中高纬度寒潮事件的减少, 这也就是云南寒潮频次呈减少趋势的原因.

2.2 寒潮频次月变化特征 图 2 为 1981—2021 年云南寒潮天气出现频次的年变化, 41 a 中共出现 381 次全省性寒潮天气. 其中, 出现最多的月份为 1 月, 出现 176 次, 月均 4.3 次; 其次是 12 月, 出现 116 次, 月均 2.8 次; 分别占总频次的 46.2% 和 30.4%. 另外, 2 月出现 62 次, 占总频次的 16.3%; 3 月出现 18 次, 占总频次的 4.7%; 11 月出现 9 次, 占总频次的 2.4%; 最少的月份是 4 月, 无全省性寒潮过程出现. 可见, 云南寒潮主要出现在冬季的 12 月和 1 月.

2.3 云南省各类寒潮的变化特征 根据影响云南

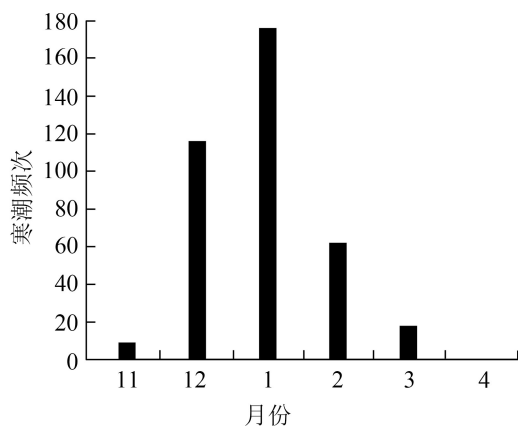


图 2 1981—2021 年云南寒潮月变化

Fig. 2 Monthly variations of cold wave from 1981 to 2021 in Yunnan

的冷空气活动特征, 将云南的寒潮主要分为降温寒潮和低温寒潮. 通过 1981—2021 年各类寒潮的频次分析, 可见云南的寒潮主要以低温寒潮为主, 381 次寒潮中共出现低温寒潮 301 次, 占 79%; 降温寒潮 80 次, 占 21%. 从两类寒潮频次的演变图可看出 (图 3), 低温寒潮的变化与总寒潮 (图 1) 的变化相似, 出现较多的仍是 20 世纪 80 年代及 90 年代初, 线性趋势倾向值为 -0.121 次/a, 相关系数为 -0.25 , 通过了 0.1 的显著性检验, 说明低温寒潮过程近 41 a 总趋势具有显著减少的趋势.

对于降温寒潮, 平均仅出现不到 2 次/a. 在很多年份没有出现, 例如 1981、1987、1998、2003、2017 年和 2019 年.

由于云南地处低纬高原, 独特的地理位置及地形地貌削弱冷空气的影响, 一般强度的冷空气难以达到降温寒潮标准, 以低温寒潮为主. 姚愚等^[23]的研究表明, 影响云南的 3 类冷空气趋势减少最显著的是一般冷空气, 强冷空气次之, 寒潮冷空气减少并不显著, 于是就出现两类寒潮频次和趋势呈现出上述差异的现象.

2.4 寒潮频次异常年的环流特征分析 根据图 1 挑选出的寒潮频次异常年, 取偏多年 (1983 年和 1993 年) 和偏少年 (1988、2003 年和 2017 年) 冬半年对海平面气压场、500 hPa 高度场、700 hPa 风场和气温场进行合成分析.

在云南寒潮偏多年和偏少年的海平面气压差值图上 [图 4(a)], 新地岛以南到西西伯利亚为一个异常负中心, 东亚到西南太平洋均为正海平面气压控制, 说明这一带地区冷高压活动频繁, 东亚地区的冷空气活动异常频繁, 影响云南致使寒潮频次偏多.

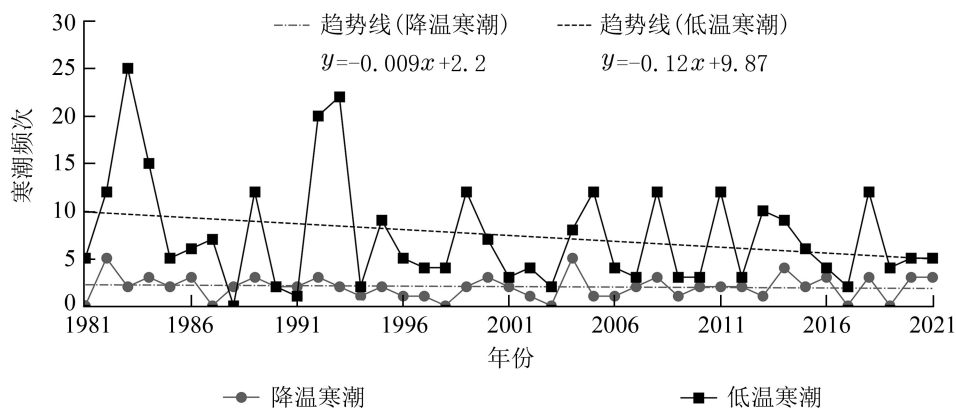


图 3 1981—2021 年云南降温寒潮和低温寒潮频次变化

Fig. 3 Variations of two type cold wave from 1981 to 2021 in Yunnan

在寒潮偏多和偏少年的 500 hPa 高度场差值图上 [图 4(b)], 中高纬度地区呈负—正—负的带状分布, 负中心位于巴伦支海到新地岛南部一直延伸至西西伯利亚地区, 说明云南寒潮偏多年极涡较偏少年偏南, 强度也偏强. 正异常中心位于贝加尔湖附近, 说明寒潮偏多年贝加尔湖阻塞高压较偏少年偏强, 阻塞高压的异常偏强同样有利于中高纬度冷空气堆积加强后南下, 致使东亚地区冷空气活动异常偏强. 中低纬度(10°~45°N)的地区为负值带状分布, 负值中心位于日本岛以东的洋面上, 这一区域(10°~45°N)的带状负值分布说明寒潮偏多年南支槽及东亚大槽较偏少年活动偏强, 西太平洋副高偏弱, 有利于冷空气的南下影响云南.

利用国家气候中心提供的 1981—2020 年环流特征指数资料, 计算得出西太平洋副高强度指数和西太平洋副高北界位置指数都与云南寒潮频次呈负相关关系, 相关系数分别为-0.25 和-0.27, 都通过了 0.1 的显著性检验. 与较偏少年相比, 寒潮偏多年西太平洋副高强度指数和西太平洋副高北界位置指数都更小, 说明西太平洋副热带高压强度偏弱位置偏南, 有利于北方冷空气向南入侵云南, 造成云南寒潮频次偏多.

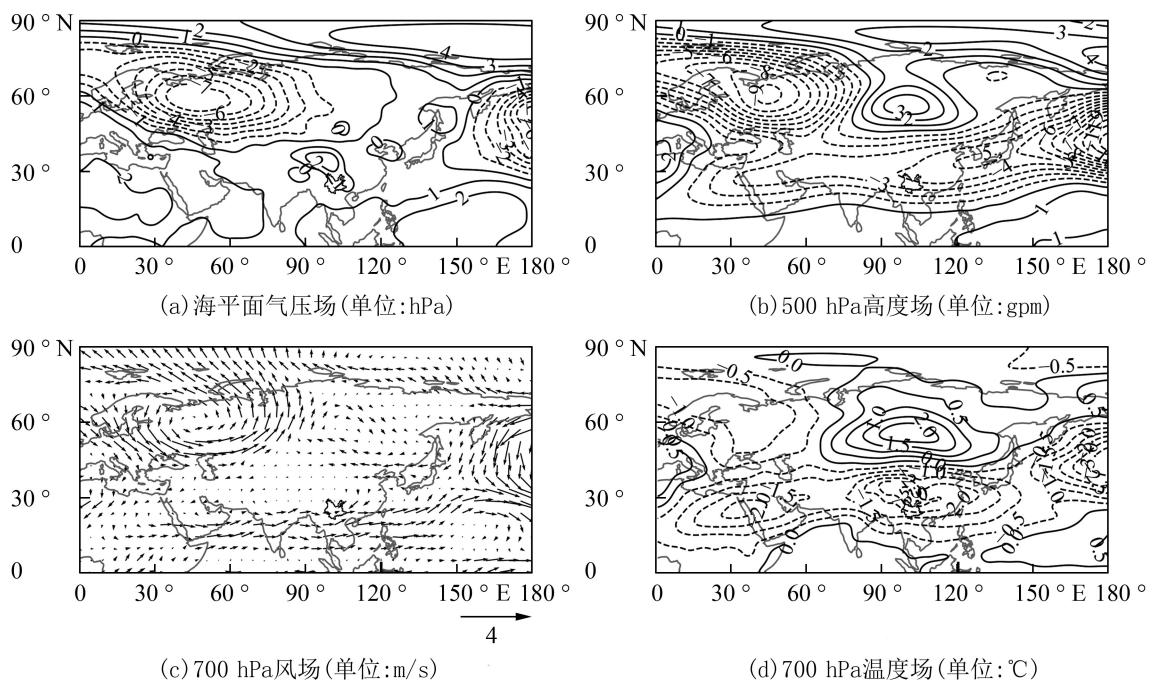
在寒潮偏多和偏少年的 700 hPa 风场差值图上 [图 4(c)], 东亚地区 30°N 附近有 1 支异常偏北

气流南下影响至云南东部地区; 相应地在 700 hPa 温度场差值图上 [图 4(d)], 东亚地区 30°N 有一异常

的负中心. 综上, 云南寒潮频次异常主要与极涡、贝加尔湖的高压脊、东亚大槽、南支槽、西太平洋副热带高压及东亚地面冷高压的活动异常有关. 当极涡偏强, 贝加尔湖阻塞高压偏强, 东亚大槽和南支槽偏强, 西太平洋副热带高压强度偏弱位置偏南, 东亚地面冷高压偏强时, 云南寒潮频次偏多. 反之亦然.

3 不同路径寒潮天气的特征与环流形势

3.1 全省性寒潮过程的冷空气路径变化 《云南省预报员手册》^[22] 中统计 1982—2008 年 3 条路径冷空气频次所占比例分别为 63%、28% 和 9%. 根据前文定义的寒潮路径统计标准, 统计获得了云南 1981—2021 年共 41 a 中 3 条冷空气路径寒潮的频率. 其中, 东北路径冷空气频次为 217 次, 占 57%; 偏东路径 128 次, 占 33.6%; 西北路径 36 次, 占 9.4%. 东北路径的冷空气是影响云南寒潮的主要路径, 影响次数最多, 西北路径的冷空气影响次数最少. 这与过去云南气象工作者的统计结果一致^[22], 但东北路径在近 41 a 占比下降, 而偏东路径的占比增加, 即近年来偏东路径的冷空气造成的全省性寒潮过程增加, 东北路径相对减少, 这可能与近年来



要素差值为正异常年冬半年平均值减去负异常年冬半年平均值.

图 4 云南寒潮正负异常年各气象要素差值

Fig. 4 Difference of meteorological elements in positive and negative abnormal years of cold wave in Yunnan

一般强度冷空气较强冷空气活动减少的趋势更加明显有关,强冷空气的地面冷高压南下的速度更快,更可能以偏东回流的形式入侵云南.

图 5 是 1981—2021 年云南 3 条冷空气路径影响下的寒潮频次年变化及其趋势. 由图 5 可见,从线性趋势上看,1981—2021 年,3 条冷空气路径影响下的寒潮发生频次倾向系数都小于 0,与时间的

相关系数也都小于 0,说明 3 条冷空气路径下,寒潮频次随时间都呈下降趋势. 其中,寒潮频次的线性趋势倾向值东北路径为 $b_1=-0.031$; 偏东路径为 $b_2=-0.066$; 西北路径为 $b_3=-0.033$,且频次与时间的相关系数 $r_3=-0.261$,通过了 0.1 显著性检验,说明西北路径寒潮过程近 41 a 总趋势具有显著减少的趋势.

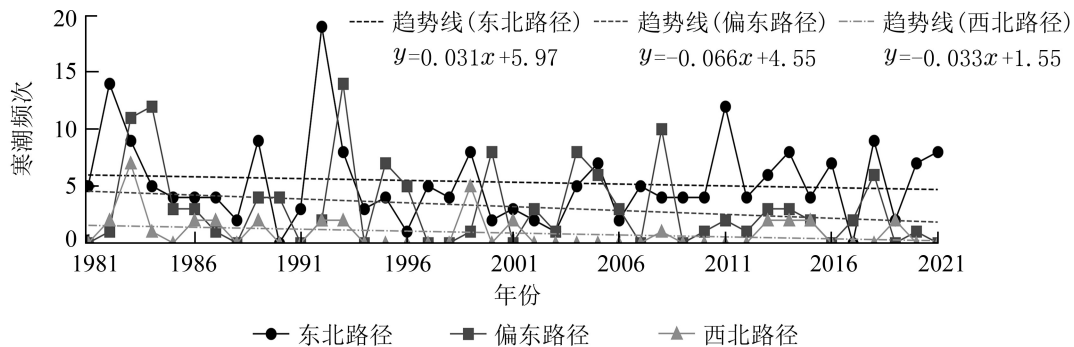


图 5 1981—2021 年云南 3 条冷空气路径影响下的寒潮频次变化

Fig. 5 Frequency changes of cold waves under the influence of three cold air paths from 1981 to 2021 in Yunnan

图 6 为 1981—2021 年 3 条冷空气路径影响下 11 月至次年 3 月寒潮频次的变化特征. 分析可见,东北路径和偏东路径寒潮在 1 月发生最多,分别为 120 次和 46 次;西北路径寒潮在 12 月发生最多,为 20 次. 东北路径和偏东路径寒潮发生频次较多的月份一致,为 12 月至次年 2 月,11 月和 3 月发生较少;西北路径寒潮发生频次较多的月份为 12 月至次年 1 月,11 月、2 月及 3 月较少.

其次为偏东路径冷空气,为 16.4%; 西北路径冷空气没有造成过降温寒潮,只造成低温寒潮,这是由于西北路径冷空气的特点是以高空冷平流和下沉气流为主,高空冷平流影响后天空状况基本为晴空少云,造成最低气温下降,但平均气温的降幅很难达到降温寒潮标准.

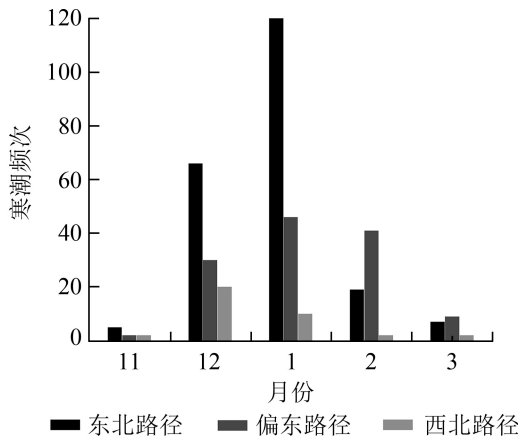


图 6 1981—2021 年云南 3 条冷空气路径影响下寒潮频次月变化

Fig. 6 Monthly variation of cold wave frequency under the influence of three cold air paths from 1981 to 2021 in Yunnan

图 7 为 1981—2021 年 3 条冷空气路径影响寒潮类型的特征图. 由 [图 7(a)] 的寒潮频次可见,东北路径冷空气造成降温寒潮的占比最高,为 27.2%,

综上,造成云南寒潮的路径主要是东北路径和偏东路径,且最强影响时段为冬季 12 月至次年 2 月,这与冬季风和西南地区东部地面冷高压在冬季 12 月至次年 1 月较强有密切关系; 11 月和 3 月 3 条冷空气路径造成的寒潮频次相对较少. 主要原因可能是一方面冷空气主体势力相对较弱,另一方面地面温度较高,北方冷高压南下变性较快,使得影响云南的冷空气偏弱,因此降温很难达到寒潮的标准.

3.2 云南省不同路径下寒潮的强度特征 由云南寒潮 3 条路径的强度特征图上 [图 7(b)、(c)] 可见,东北路径和偏东路径的强度特征相似,两者的环流形势也类似(图略),因此后文对路径的环流形势分析把东北路径和偏东路径合并为东部路径. 与东北路径相比,偏东路径造成的寒潮强度较强一些,寒潮站点的平均气温最低,为 2.68 °C,平均日照也最短,为 2.03 h. 西北路径寒潮站点的最低气温最低,达到 -2.26 °C,但平均气温和平均日照最高,分别为 3.56 °C 和 7.36 h,这与《云南省天气预报员手

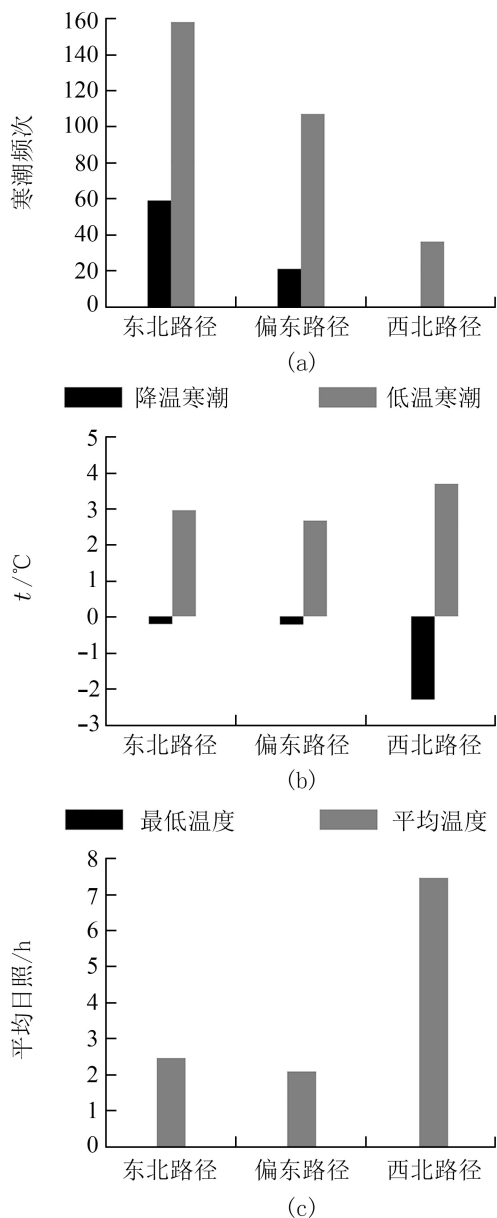


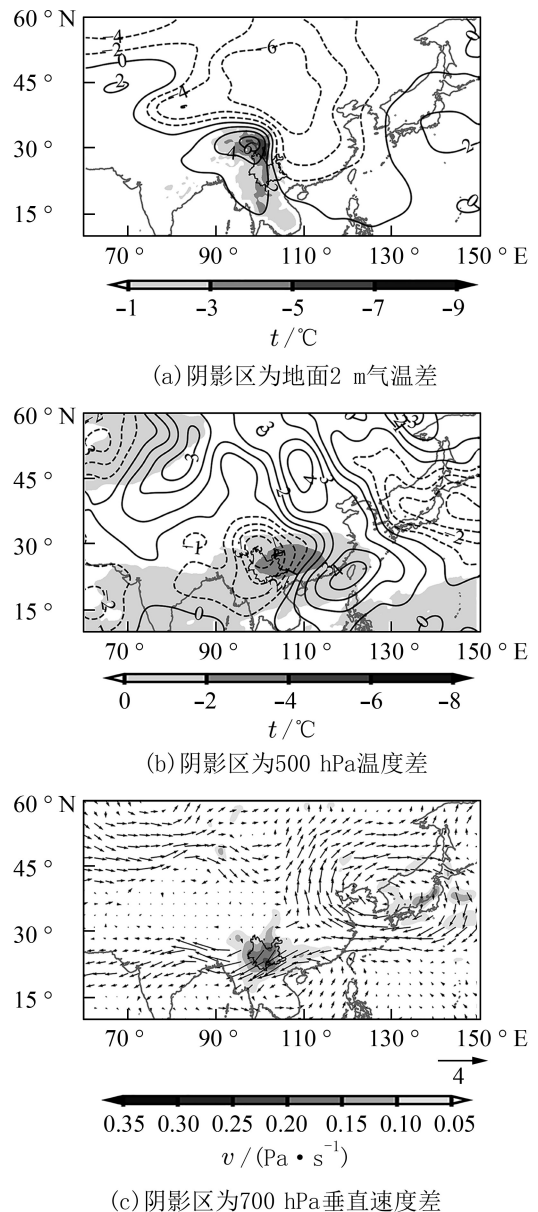
图 7 1981—2021 年云南 3 条冷空气路径影响下寒潮类型强度变化

Fig. 7 Changes in the intensity of cold wave types under the influence of three cold air paths from 1981 to 2021 in Yunnan

册》^[22]中对西北路径冷空气的描述基本一致,西北路径的冷空气特点是以高空冷平流和下沉气流为主,无锋面,常造成重霜冻天气.东部路径则主要造成降温 and 阴雨雪天气.

西北路径造成的云南寒潮 80% 以上发生在前一日东部路径已经造成云南寒潮的情况下,这是因为地面温度较高的情况下,一般的西北路径冷空气带来的高空冷平流和下沉气流难以使地面平均气温降幅和最低温度条件达到寒潮标准.因此,大部分的西北路径寒潮发生在东部路径寒潮的中后期.

3.3 各路径寒潮过程的环流特征 西北部路径寒潮海平面气压极大值相比东部路径更高,平均高 2.5 hPa,说明西北部路径寒潮的地面冷高压强度要比东部路径的强度更强,这是由于西北路径的冷空气强度如果不足就无法翻越青藏高原,这也是西北路径寒潮发生比例特别小的原因.在云南西北路径与东部路径寒潮气象要素差值图中(图 8),对比西



要素差值选取所有西部路径平均场减去所有东部路径平均场; (a) 等值线为海平面气压场差值, 单位: hPa; (b) 等值线为 500 hPa 风场差值, 单位: m·s⁻¹; (c) 等值线为 700 hPa 风场差值, 单位: m·s⁻¹.

图 8 云南西北路径寒潮与东部路径寒潮气象要素差值
Fig. 8 The difference of meteorological elements between the northwest path cold wave and the east path cold wave in Yunnan

北路径和东部路径的气象要素差异可以看出,西北路径寒潮和东部路径寒潮在海平面气压场差值图上[图 8(a)],低纬度 30°N 纬向呈现正—负—正的分布特征,在青藏高原东南部至云南西北部地区为 1 个正异常中心,而在相应的位置地面 2 m 温度差值为 1 个负异常中心,说明西北路径寒潮地面冷高压位置较东部路径偏西.华中至华南海平面气压场差值为负区域,说明地面冷高压强度偏弱.西北路径寒潮发生时,冷空气主体从青藏高原东南部(云南的西北部地区)开始自西北向东南方向影响云南地区,华中至华南地区没有明显的回流冷空气带来的锋面系统,在一致的西北气流和下沉气流影响下,造成可能产生重霜冻的晴好天气,正是西北路径寒潮发生时天空少云多日照的原因.

西北路径和东部路径在 500 hPa 经向风和温度场差值图上[图 8(b)],云南省为径向风负异常中心和 500 hPa 温度场负异常中心,华南地区东部至台湾岛为径向风正异常中心,说明西部路径较东部路径南支槽曲率更大;500 hPa 温度负异常中心说明西部路径较东部路径的高空冷平流更强.700 hPa 的风场和垂直速度场差值图[图 8(c)]中也可以看出,西部路径在低纬度 30°N 以南的西风风速偏弱,南支槽强度偏强,以下沉气流为主,强盛高空冷平流和下沉气流有利于加强高原东南部至云南西北部的地面冷高压;同时地面无明显锋面,天空转晴后带来强烈的辐射降温,两者叠加,致使日平均气温低于 6 °C,达到寒潮标准.

总之,云南省西北路径寒潮相较东部路径寒潮地面冷高压位置更加偏西偏强,南支槽偏强,高空冷平流偏强,低纬度西风带风速偏弱,青藏高原东南侧下沉气流偏强.

4 结论

(1)1981—2021 年云南寒潮年均发生 9.3 次,寒潮频次总体呈减少趋势,20 世纪 80 年代至 90 年代初为寒潮多发时期,90 年代中期至今为寒潮较少发生时期.上一年至次年 1 月为寒潮多发期.云南寒潮类型以低温寒潮为主,频次占比为 79%,降温寒潮频次占比为 21%.低温寒潮的趋势和总体寒潮趋势基本一致,寒潮频次呈显著减少的趋势.

(2)云南寒潮异常主要与极涡、贝加尔湖的高压脊、东亚大槽、南支槽、西太平洋副热带高压及东亚地面冷高压的活动异常有关;当极涡偏强,贝

加尔湖阻塞高压偏强,东亚大槽和南支槽偏强,西太平洋副热带高压偏弱偏南,东亚地面冷高压偏强时,云南寒潮频次偏多;反之亦然.

(3)造成云南寒潮的路径主要有东北路径、偏东路径和西北路径,东北路径和偏东路径占比达到 90% 以上.3 条冷空气路径下,寒潮频次随时间都呈下降趋势.东北路径和偏东路径寒潮在 1 月发生最多,西北路径寒潮在 12 月发生最多,为 20 次.东北路径冷空气造成降温寒潮的占比最高,西北路径冷空气只造成低温寒潮.东北路径和偏东路径寒潮的强度特征相似,主要是造成降温和阴雨雪天气,二者相较偏东路径造成的寒潮强度较强一些.西北路径寒潮的特点为最低气温最低,但平均气温和日照最高,以高空冷平流和下沉气流为主,常伴随重霜冻天气,大部分的西北路径寒潮发生在东部路径寒潮的中后期.

(4)云南西北路径寒潮的出现主要与地面冷高压的位置、南支槽强度、高空冷平流强度和高原东南侧的下沉气流强度有关.相较东部路径寒潮,西北路径寒潮出现时地面冷高压位置偏西偏强,500 hPa 南支槽位置偏东,高空冷平流偏强,低纬度西风带风速偏弱,青藏高原东南侧下沉气流偏强.

参考文献:

- [1] 刘传凤. 我国寒潮气候评价[J]. 气象, 1990, 16(12): 39-42.
Liu C F. The climate assessment of cold waves in China[J]. Meteorological Monthly, 1990, 16(12): 39-42.
- [2] 邓先瑞. 寒潮[M]. 北京: 商务印书馆, 1977.
Deng X R. Cold wave[M]. Beijing: The Commercial Press, 1977.
- [3] 李宪之. 东亚寒潮侵袭的研究. 中国近代科学论著从刊—气象学(1919—1949)[M]// 北京: 科学出版社, 1955: 35-117.
Li X Z. A study of cold waves in East Asia[M]// Offprint of scientific works in modern China-meteorology(1919-1949). Beijing: Science Press, 1955.
- [4] 陶诗言. 东亚冬季冷空气活动的研究[Z]// 短期预报手册, 中央气象局. 北京, 1957: 145-160.
Tao S Y. A study of activities of cold airs in East Asian winter[Z]//Chinese Meteorological Administration. Handbook of Short Term Forecast, Beijing, 1957: 145-160.
- [5] 仇永炎, 王为德. 寒潮中期预报研究进展[J]. 气象科技, 1983, 11(3): 9-15.
Qiu Y Y, Wang W D. Advances on the project for medium range forecast of cold wave[J]. Meteorological

- Science and Technology, 1983, 11(3): 9-15.
- [6] 仇永炎, 刘景秀. 寒潮中期预报研究成果简介[J]. 气象学报, 1985, 43(2): 253.
- Qiu Y Y, Liu J X. A brief report of medium-range forecast of cold wave in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1985, 43(2): 253.
- [7] 章基嘉, 彭永清, 王鼎良. 球谐函数展开在寒潮中期预报上的应用[J]. 南京气象学院学报, 1985, 5(1): 9-14.
- Zhang J J, Peng Y Q, Wang D L. The application of Fourier and spherical harmonics to medium-range forecasting of cold waves[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1985, 5(1): 9-14.
- [8] 刘怡, 仇永炎. 用轨迹法研究寒潮个例[J]. 气象学报, 1992, 50(1): 62-73.
- Liu Y, Qiu Y Y. A case study of cold wave in East Asia using trajectory techniques[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1992, 50(1): 62-73.
- [9] 王遵娅, 丁一汇. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因[J]. 大气科学, 2006, 30(6): 1 068-1 076.
- Wang Z Y, Ding Y H. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(6): 1 068-1 076.
- [10] 魏凤英. 气候变暖背景下我国寒潮灾害的变化特征[J]. 自然科学进展, 2008, 18(3): 289-295. DOI: 10.3321/j.issn:1002-008X.2008.03.007.
- Wei F Y. Change of the cold wave frequency of China in global warming[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(3): 289-295.
- [11] 钱维宏, 张玮玮. 我国近 46 年来的寒潮时空变化与冬季增暖[J]. 大气科学, 2007, 31(6): 1 266-1 278.
- Qian W H, Zhang W W. Changes in cold wave events and warm winter in China during the last 46 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(6): 1 266-1 278.
- [12] 康志明, 金荣花, 张玮玮. 1951—2006 年期间我国寒潮活动特征分析[J]. 高原气象, 2010, 29(2): 420-428.
- Kang Z M, Jin R H, Zhang W W. Characteristic analysis of cold wave in China during the period of 1951-2006[J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(2): 420-428.
- [13] 郭其蕴. 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, 1994, 5(2): 218-255.
- Guo Q Y. Relationship between the variations of East Asian winter monsoon and temperature anomalies in China[J]. Journal of Applied Meteorology Sciences, 1994, 5(2): 218-255.
- [14] 武炳义, 黄荣辉. 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, 1999, 23(6): 641-651.
- Wu B Y, Huang R H. Effects of the extremes in the North Atlantic oscillation on East Asia winter monsoon[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1999, 23(6): 641-651.
- [15] 陈海山, 孙照渤. 一个反映中国冬季气温异常的指标东—亚区域西风指数[J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(4): 458-466.
- Chen H S, Sun Z B. An index of China winter temperature anomaly: East Asian regional westerly index[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2001, 24(4): 458-466.
- [16] 梁苏洁, 丁一汇, 赵南, 等. 近 50 年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究[J]. 大气科学, 2014, 38(5): 974-992.
- Liang S J, Ding Y H, Zhao N, et al. Analysis of the interdecadal changes of the wintertime surface air temperature over mainland China and regional atmospheric circulation characteristics during 1960-2013[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014, 38(5): 974-992.
- [17] 叶丹, 张耀存. 冬季东亚副热带急流和温带急流协同变化与我国冷空气活动的关系[J]. 大气科学, 2014, 38(1): 146-158. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13110.
- Ye D, Zhang Y C. Association of concurrent variation between the East Asian polar front and subtropical jets with winter cold air activity in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014, 38(1): 146-158.
- [18] 秦剑, 琚建华, 解明恩, 等. 低纬高原天气气候[M]. 北京: 气象出版社, 1997.
- Qin J, Ju J H, Xie M E, et al. Weather and climate in the low latitude plateau[M]. Beijing: China Meteorology Press, 1997.
- [19] 张云瑾, 方召盟, 肖瑶. 云南强冷空气过程的特点[J]. 云南大学学报(自然科学版), 1991, 13(2): 176-182.
- Zhang Y J, Fang Z M, Xiao Y. The features of the processes of strong cold air in Yunnan[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 1991, 13(2): 176-182.
- [20] 张腾飞, 鲁亚斌, 张杰, 等. 2000 年以来云南 4 次强降雪过程的对比分析[J]. 应用气象学报, 2007, 18(1): 64-72. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2007.01.009.
- Zhang T F, Lu Y B, Zhang J, et al. Contrast analysis of heavy snow events in Yunnan since 2000[J]. Journal of Applied Meteorological Sciences, 2007, 18(1): 64-72.
- [21] 海云莎, 田永丽, 陈新梅. 云南寒潮时空特征及变化分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2011, 35(S1): 147-152.
- Hai Y S, Tian Y L, Chen X M. Analysis on spatial distribution and temporal variation of cold wave in Yunnan[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences

- Edition), 2011, 35(S1): 147-152.
- [22] 许美玲, 段旭, 杞明辉, 等. 云南省天气预报员手册[M]. 北京: 气象出版社, 2011: 179-193.
- Xu M L, Duan X, Qi M H, et al. Handbook of weather forecasters in Yunnan Province[M]. Beijing: China Meteorology Press, 2011: 179-193.
- [23] 姚愚, 陶云, 邢冬, 等. 1961—2014 年冬半年云南冷空气活动气候特征分析[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 122-129.
- Yao Y, Tao Y, Xing D, et al. Climatic characteristic analysis on cold air activities in winter half year from 1961 to 2014 over Yunnan[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(1): 122-129.
- [24] 陶云, 段旭, 姚愚, 等. 云南寒潮与昆明准静止锋的气候关联性分析[J]. 灾害学, 2018, 33(2): 99-105.
- Tao Y, Duan X, Yao Y, et al. The climate correlation analysis between the cold wave in Yunnan and Kunming Quasi-Stationary Front[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(2): 99-105.
- [25] 陶云, 陈艳, 段长春, 等. 云南省 1981—2013 年降雪过程气候特征及环流型分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2018, 40(6): 1 171-1 180. DOI: [10.7540/j.ynu.20180319](https://doi.org/10.7540/j.ynu.20180319).
- Tao Y, Chen Y, Duan C C, et al. The climatic characteristics of snowfall processes and the circulation patterns from 1981 to 2013[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2018, 40(6): 1 171-1 180.

Analysis of climatic characteristics of cold waves and atmospheric circulations along different routes in Yunnan

YANG Chao^{1,2}, YANG Su-yu^{1,2**}, TAO Yun³, YAN Hong-ming³

(1. Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034, Yunnan, China;

2. Research Center for Disastrous Weather over Hengduan Mountains & Low-Latitude Plateau, China Meteorological Administration, Kunming 650034, Yunnan, China;

3. Yunnan Provincial Meteorological Administration, Kunming 650034, Yunnan, China)

Abstract: The climatic change characteristics of cold waves and atmospheric circulations in Yunnan are analyzed, based on the daily mean temperatures and minimum temperatures of 125 meteorological observation stations in Yunnan Province from 1981 to 2021. The results indicate that: ① The cold wave frequencies in Yunnan show a decreasing trend from 1981 to 2021. In the province, cold waves happen most frequently in December and the following January; and most of the cold waves are a minimum temperature type. ② More frequently the cold waves will happen in Yunnan, when the polar vortex is stronger than normal, the Baikal blocking high is stronger than normal, the deep East-Asian trough and the Southern Branch trough are stronger than normal, the West Pacific subtropical high is weaker than normal and the East-Asian surface cold high is stronger than normal. ③ The cold waves along the Northeastern route and those along the Eastern route account for more than 90% of all the three routes of cold waves in Yunnan. The frequency of cold waves along the Northwestern route is the lowest, usually accompanied by a sharp drop to the lowest temperature, which often leads to severe frost weather in Yunnan. Most of the cold waves along the Northwestern route occur in the middle and late stages of the Eastern route cold waves. ④ Compared with the cold waves along the Eastern route, the surface cold high of cold waves along the Northwestern route in Yunnan extends westward and is stronger, the Southern Branch trough extends eastward, the upper cold advection is stronger, the wind speed in the low latitude westerlies is slower, and the downdraft in the Southeast of the Tibetan Plateau is stronger.

Key words: Yunnan cold wave; climatic characteristics; atmospheric circulation characteristics; interannual variation