

西南地区冬季低温冰冻雨雪事件异常的大尺度环流特征

向楠^{1,2*}, 冉红玲¹, 蔡成瑶¹, 张李娟¹, 周明飞^{3#}

¹铜仁市气象局, 贵州 铜仁

²贵州省山地环境气候研究所, 贵州 贵阳

³贵州省气象台, 贵州 贵阳

收稿日期: 2024年2月20日; 录用日期: 2024年3月21日; 发布日期: 2024年3月28日

摘要

本文利用国家气象局气象信息中心提供的逐日最高、最低气温和日降水数据以及ERA5、NCEP/NCAR再分析资料, 主要运用Mann-Kendall突变检验法及合成分析法对西南地区冬季低温冰冻雨雪事件的时空变化特征及其异常的大尺度环流特征进行了分析。结果表明: 1) 西南地区低温冰冻雨雪事件存在一个“偏多-偏少”的年代际振荡特征, 在1994年左右发生突变, 从21世纪开始呈现显著下降趋势。2) 事件发生区域主要在川西高原至贵州中部一带, 贵州中部一带在1月频次最多, 到2月频次减少, 同时川西高原发生频次增多。3) 在事件多发年, 贝加尔湖到中国江淮地区为异常气旋式环流, 我国南海到西南华南地区为异常西伸高压环流系统, 沿异常气旋式环流西侧南下的冷空气与异常高压环流西北侧的暖湿空气在西南地区汇合, 形成低温雨雪天气。相反, 在少发年, 大气环流场的变化特征与多发年呈相反变化态势, 不利于低温冰冻雨雪事件的发生。

关键词

低温冰冻雨雪事件, 异常大尺度环流, 西南地区

Large-Scale Circulation Characteristics of Anomalous Low-Temperature Freezing Rain and Snow Events in Winter in Southwest China

Nan Xiang^{1,2*}, Hongling Ran¹, Chengyao Cai¹, Lijuan Zhang¹, Mingfei Zhou^{3#}

¹Tongren Meteorological Bureau, Tongren Guizhou

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 向楠, 冉红玲, 蔡成瑶, 张李娟, 周明飞. 西南地区冬季低温冰冻雨雪事件异常的大尺度环流特征[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(2): 405-414. DOI: 10.12677/ccrl.2024.132042

²Guizhou Institute of Mountain Environment and Climate, Guiyang Guizhou³Guizhou Provincial Meteorological Observatory, Guiyang GuizhouReceived: Feb. 20th, 2024; accepted: Mar. 21st, 2024; published: Mar. 28th, 2024

Abstract

In this paper, the daily maximum and minimum temperature and daily precipitation data from the Meteorological Information Centre of the National Meteorological Service, as well as ERA5 and NCEP/NCAR reanalysis information are used, and Mann-Kendall mutation test and synthetic analysis method are mainly applied to analyze the spatial and temporal variability characteristics of low-temperature freezing rain and snow events in winter in Southwest China and anomalous large-scale circulation characteristics. The results show that: 1) Low-temperature freezing rain and snow events in winter in Southwest China have an inter-decadal oscillation characteristic of “more and less”, with an abrupt change around 1994 and a significant downward trend from the 21st century onwards. 2) The occurrence area was mainly from the western Sichuan Plateau to central Guizhou, with the highest frequency in central Guizhou in January and decreasing in February, while the frequency increases in the western Sichuan Plateau. 3) In years of high incidence, there is an abnormal cyclonic circulation from Lake Baikal to the Jianghuai region of China, and an abnormal westward extending high circulation system from the South China Sea to the South China Sea of Southwest China. The cold air moving southward along the west side of the abnormal cyclonic circulation converges with the warm and humid air on the northwest side of the abnormally high circulation in Southwest China, forming low-temperature rain and snow weather. On the contrary, in years of low incidence, the variation characteristics of atmospheric circulation field are opposite to those in years of low incidence, which is not conducive to the occurrence of low-temperature freezing rain and snow events.

Keywords

Low-Temperature Freezing Rain and Snow Events, Anomalous Large-Scale Circulation, Southwest China

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

根据寒潮灾害统计, 1950~2010 年间, 极端低温灾害已造成近 7 亿人受到灾害影响, 并导致约 6400 亿元的直接经济损失[1] [2] [3]。2008 年 1 月, 南方地区出现了历史罕见的低温冰冻雨雪灾害, 是六十年代以来最强的一次区域性事件, 2011 年 1 月, 我国西南地区再次遭受低温冰冻雨雪灾害天气[4] [5] [6] [7] [8]。当发生大范围气候异常时, 会存在一定形式的大气环流系统异常。在我国冬季发生低温雨雪事件的机制研究中发现, 西伯利亚高压的强度和移动路径对东亚地区冬季局地气候的变化有重要影响, 这是我国区域性低温雨雪事件产生和维持的一个关键影响因子。最典型的例子就是 2008 年 1 月我国南方地区发生的低温冰冻雨雪灾害, 许多研究通过对本次事件的大气环流特征分析, 对事件发生的成因得出了较为一致的结论, 认为大气环流“组合性异常”是造成这次灾害的直接原因[9] [10] [11]。赵思雄、孙建华的研究指出, 欧亚地区中高纬阻塞高压稳定异常, 阻塞高压使得中高纬地区的冷空气不断向南侵入到中国南方地区,

为冻雨天气的发生发展提供了有利条件[12]；北半球欧亚地区形成的“北高南低”的阻塞形势，有利于欧亚中高纬高压脊的加强及中低纬西风槽的发展；在低纬度地区，副热带高压西伸且偏北偏强，有利于将暖湿气流向华南地区输送。欧亚地区气流分成两支分别从高、低纬度绕过青藏高原向东流，最后在长江流域汇合，这是造成 2008 年低温冰冻雪灾的一个重要大气环流条件，另外，来自北方的冷空气与副热带高压西侧的偏南气流在长江流域辐合，可使准静止锋长期维持；另一方面，这两支气流与来自孟加拉湾的气流在西南地区辐合，大致对应云贵的准静止锋是冰冻雨雪天气的重要影响系统[13]-[20]。

之前对我国发生的低温雨雪事件的机理研究分析大多都是基于 2008 年的低温冰冻灾害事件出发，然而个例分析容易造成不确定性，通过个例环流分析的结果是否具有普适性还难以确定。例如，1954/1955 年低温冰冻雨雪过程，副高位置偏南偏弱，这与 2008 年过程正好相反[21]。王林等将我国南方 36 个冰冻雨雪事件的个例环流形势进行合成，发现 850 hPa 上出现强的东北气流，700 hPa 上有来自印缅地区的西南急流，在 200 hPa 上出现高空西风急流带，有利于北方冷空气与南支槽前的暖湿气流汇合，这样的环流形式有利于冻雨天气的维持和发展[22]。

因此，本文分析了西南地区冬季低温冰冻雨雪事件的时空分布特征，并对其异常年的环流场进行了分析对比，在一定程度上为研究我国长时间范围内低温冰冻雨雪事件提供理论基础，提高对这种极端天气事件的进一步了解，对灾害性天气事件研究具有重要的科学价值。

2. 数据与方法

2.1. 数据选取

本文采用的气温和降水数据来自国家气象局气象信息中心提供的逐日最高、最低气温和日降水数据，最终选取西南地区共 102 个站点数据资料，时间范围为 1961~2020 年冬季，即上年 12 月至当年 2 月。

格点资料选用 ERA5、NCEP/NCAR 再分析数据，分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。所选用的数据有位势高度、2 m 温度、风速、相对湿度、垂直速度等，垂直方向从 1000~200 hPa 共 24 层，时间为 1979~2020 年。

2.2. 单站低温冰冻雨雪事件定义

本文基于钱晰文中对单站低温冰冻雨雪事件的定义[23]，同时结合温度、降水条件，对西南地区发生一次低温冰冻雨雪事件进行定义：当日最低温度小于 0°C ，且降水量大于等于 0.1 mm 时，则认为是一次低温冰冻雨雪事件。该方法所得低温冰冻雨雪频次与前人研究中的频次次数接近，因此认为该定义具有可行性。

2.3. 研究方法

在研究低温冰冻雨雪频次的趋势突变分析时主要应用了 Mann-Kendall (M-K) 突变检验，其优点为既不遵从一定的分布，也不受少数异常值的干扰，更适合于顺序变量和类型变量，也能很好地反映要素的趋势变化，常用于气象上时间序列的趋势检验[24]。本文主要利用合成分析方法探究西南地区冬季低温雨雪事件典型多发年和少发年大尺度环流异常的影响。

单位气柱整层大气水汽输送通量矢量 Q 的计算公式如下：

$$Q = \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} Vq dp \quad (1)$$

矢量 Q 可以分解为纬向水汽通量 Q_x 和经向水汽通量 Q_y ：

$$Q_x = \frac{1}{g} \int_{P_t}^{P_s} u q dp \tag{2}$$

$$Q_y = \frac{1}{g} \int_{P_t}^{P_s} v q dp \tag{3}$$

式中， V 为单位气柱内各层大气的风速的矢量， q 为各层大气的比湿， P_t 、 P_s 分别为大气柱下界气压和上界气压， g 为重力加速度。

3. 低温冰冻雨雪事件的时空变化特征

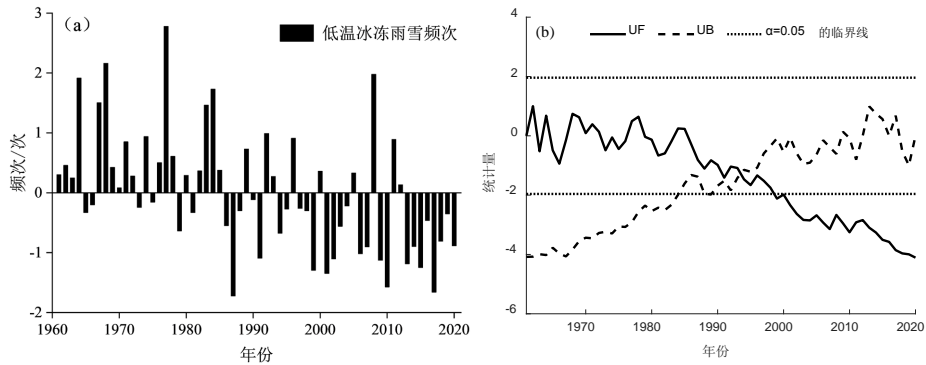


Figure 1. Standardized time series and M-K test for low-temperature freezing rain and snow events in winter in southwest China

图 1. 西南地区冬季低温冰冻雨雪事件的标准时间序列及 M-K 检验

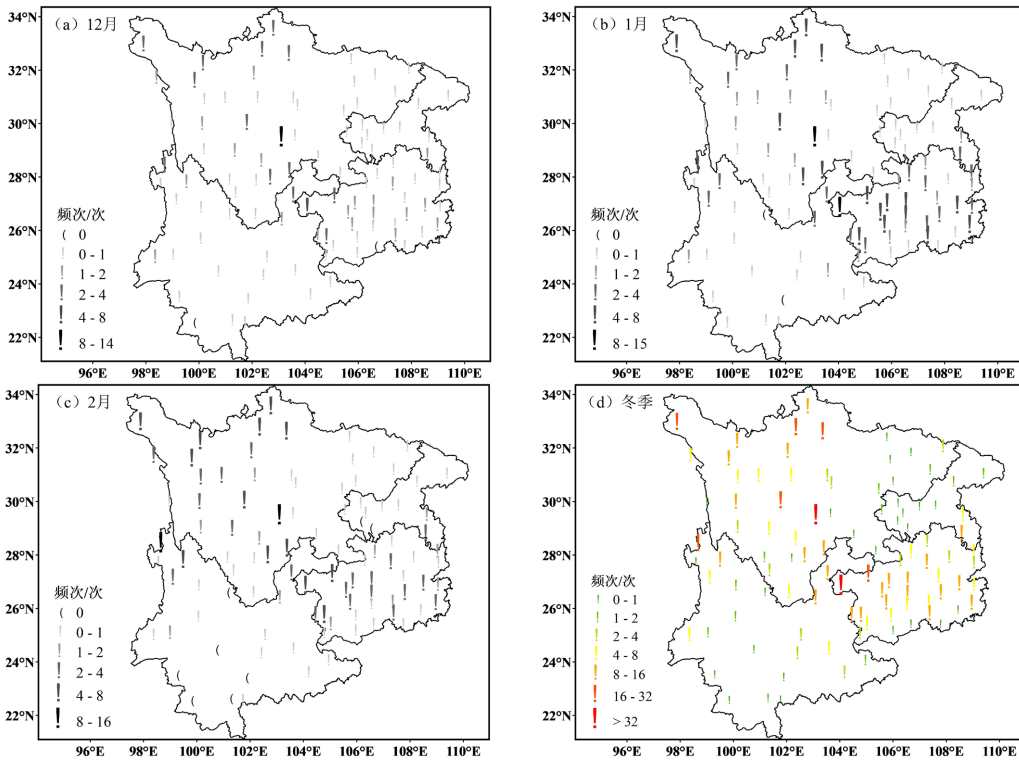


Figure 2. Spatial distribution of low-temperature freezing rain and snow events in winter in Southwest China

图 2. 西南地区冬季低温冰冻雨雪事件的空间分布

从图 1(a)中可看出, 西南地区低温冰冻雨雪事件在时间尺度上存在一个“偏多 - 偏少”的年代际振荡特征, 其中在 20 世纪 80 年代中期以前频次偏多, 之后偏少。通过图 1(b) M-K 突变检验可知, 西南地区低温冰冻雨雪频次在 1994 年左右发生突变, 从 21 世纪开始呈现显著下降趋势。

从图 2 西南地区 12~2 月低温冰冻雨雪事件的空间分布中可看出, 其发生区域主要在川西高原至贵州中部一带, 贵州中部一带在 1 月频次最多, 多数站点月均 4~8 次, 到 2 月频次减少, 月均 2~4 次, 同时川西高原发生频次增多。

4. 低温冰冻雨雪事件异常的大尺度环流特征

已知西南地区地形西高东低, 川西高原和云贵高原发生低温冰冻雨雪事件的机制不同, 将西南地区的站点进一步划分, 综合考虑海拔高度、经纬度等因素, 将云贵高原发生事件频次超过 2 次的站点划分为核心区域, 最后得到核心区域内的 44 个站点, 并将其发生低温冰冻雨雪事件的频次和降水量分别标准化(图 3), 选取标准化后发生频次和降水量均大、小于 ± 1 的年份作为发生频次较多、少的年份, 为了使结果更准确, 选取 1979 年后的年份(见表 1): 1984、2008、2011 (简称多发年), 1987、2001、2002、2010、2017 (简称少发年)。

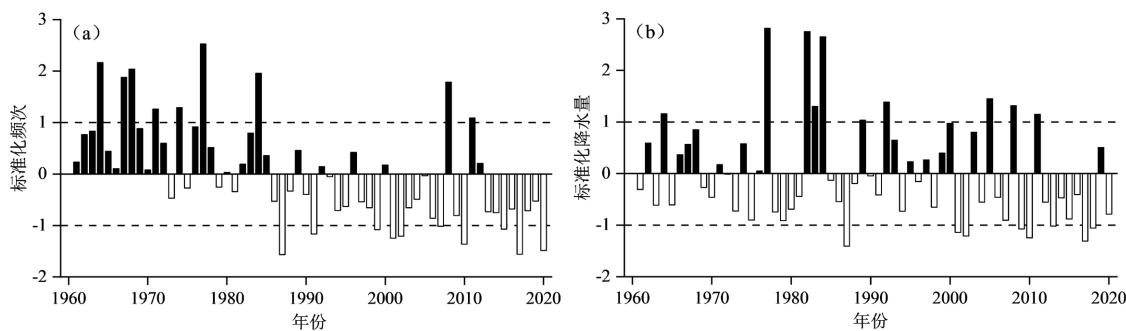


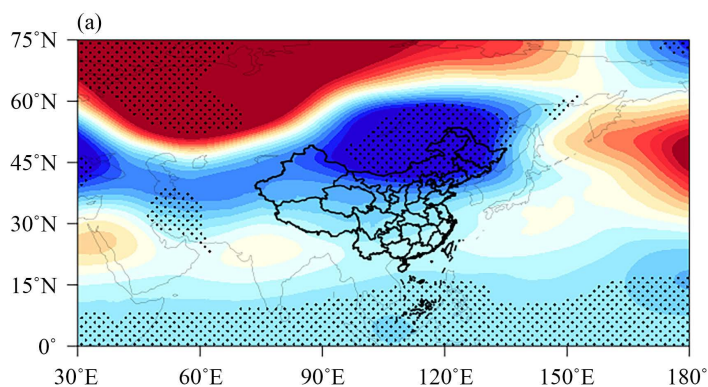
Figure 3. Standardized frequency and standardized precipitation of low-temperature freezing rain and snow events in Southwest China

图 3. 西南地区低温冰冻雨雪事件的标准化频次和标准化降水量

Table 1. High- and low-occurrence years of low-temperature freezing rain and snow events in Southwest China

表 1. 西南地区低温冰冻雨雪事件的多发年和少发年

核心区域	
多发年	1984、2008、2011
少发年	1987、2001、2002、2010、2017



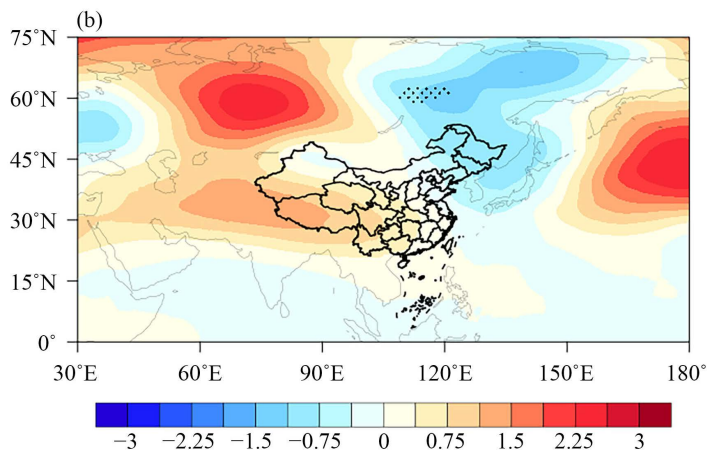
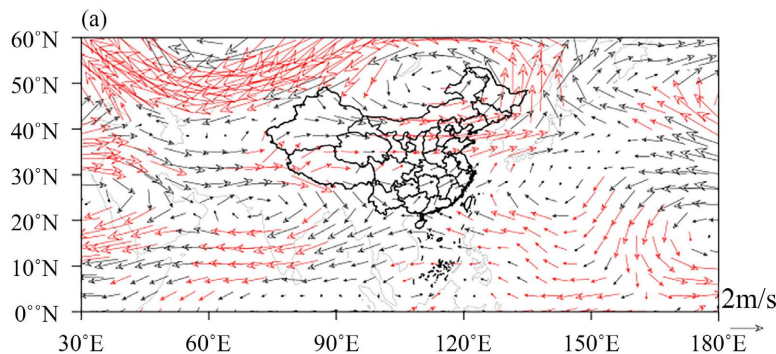


Figure 4. Synthesis of the 500 hPa geopotential height field distance level between years of high- and low-occurrence of low-temperature freezing rain and snow events in winter in Southwest China (unit: gpm): (a) Years of high occurrence; (b) Years of low occurrence, punched as passing 95 percent significance test

图 4. 西南地区冬季低温冰冻雨雪事件多发年与少发年 500 hPa 位势高度场距平合成(单位: gpm): (a) 多发年; (b) 少发年, 打点为通过 95% 显著性检验

从 500 hPa 位势高度距平(图 4)中可以看出, 在多发年, 乌拉尔山高压脊和东亚大槽强度偏强, 这种形式会使环流经向型加强和稳定维持, 有利于欧亚中高纬高压脊加强以及中低纬西风槽的发展。乌拉尔山高压脊偏强, 有利于来自新地岛的冷空气南下, 中国处于负值区, 低压槽强度偏强, 槽前西南气流从阿拉伯海和孟加拉湾携带的大量水汽绕青藏高原输送到西南地区, 同时槽前脊后西北气流强盛, 会导致北方南下的冷空气强度愈强, 冷空气聚集, 容易爆发寒潮; 到中低纬度, 副热带高压偏强, 导致北方南下的冷空气堆积在长江南部地区, 冷暖空气在我国西南地区交汇, 造成了我国西南地区低温冰冻雨雪事件频发。在少发年, 发生的形式略有不同, 欧亚大陆中高纬度地区从西向东位势高度距平表现为“正-负-正”的分布形式, 负距平中心出现在我国东北地区, 我国青藏高原以及西南地区均表现为正距平, 这种分布形式不利于我国北方的冷空气南下和暖湿气流向西南地区输送, 不利于低温冰冻雨雪事件的发生。

从 500 hPa 风场距平(图 5)可以看出, 在多发年, 欧亚地区中高纬度存在异常强盛的反气旋, 有利于引导极地冷空气向南输送, 我国大部地区受异常东北向气流控制, 西南地区有异常南风气流向北输送, 风场在该地区辐合, 南北气流在该地交汇。贝加尔湖到中国江淮地区为异常气旋式环流, 我国南海到西南华南地区为异常西伸高压环流系统, 沿异常气旋式环流西侧南下的冷空气与异常高压环流西北侧的暖湿空气在西南地区汇合, 形成低温雨雪天气。在事件少发年, 欧亚地区中高纬度存在较弱的异常反气旋, 与西南地区的北风在该地区辐散, 引致下沉气流, 导致低温冰冻雨雪事件频次减少。



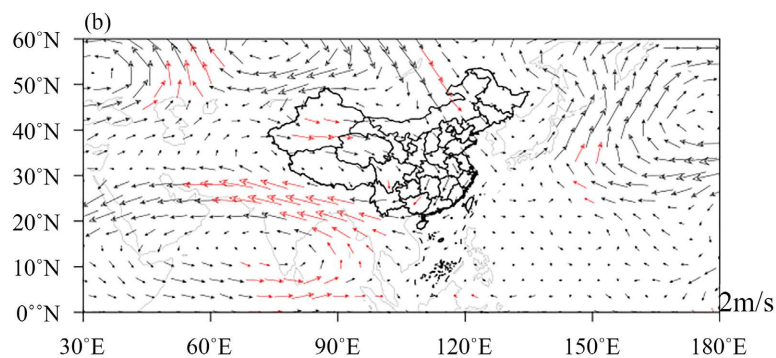


Figure 5. Synthesis of 500 hPa wind field distance level between years of high- and low-incidence of low-temperature freezing rain and snow events in winter in Southwest China (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$): (a) Years of high occurrence; (b) Years of low occurrence, red arrows indicate passing the 95 percent significance test

图 5. 西南地区冬季低温冰冻雨雪事件多发年与少发年 500 hPa 风场距平成(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$): (a) 多发年; (b) 少发年, 红色箭头为通过 95% 显著性检验

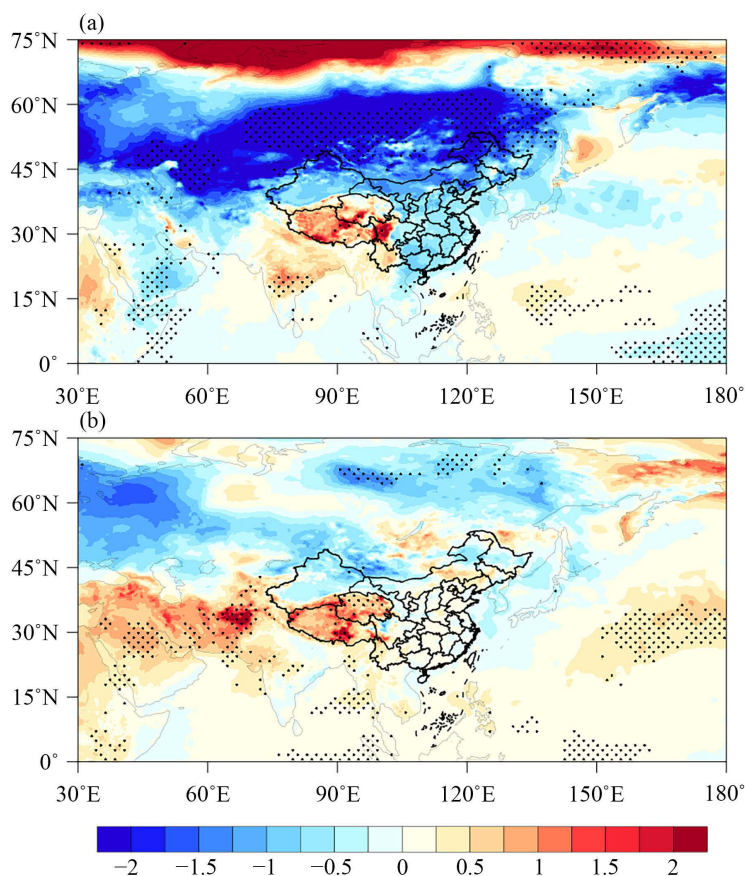


Figure 6. Synthesis of 2 m temperature field distance level between years of high- and low-incidence of low-temperature freezing rain and snow events in winter in Southwest China (unit: $^{\circ}\text{C}$): (a) Years of high incidence; (b) Years of low incidence, punched as passing 95 per cent significance test

图 6. 西南地区冬季低温冰冻雨雪事件多发年与少发年 2 m 温度场距平成(单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 多发年; (b) 少发年, 打点为通过 95% 显著性检验

分析冬季低温冰冻雨雪事件发生时的近地面温度条件(图 6), 事件多发年主要的异常低温区在中亚地区

一直扩展到东亚地区, 整个 45°N 以南的亚洲地区及其中国南方地区一直处于大范围异常低温区, 我国中西部地区有一南北走向带的负值中心区, 出现了一条异常向南延伸的冷舌, 西南地区除云南外温度距平表现为负值。乌拉尔山高压脊前西北气流引导新地岛冷空气南下, 由于欧亚地区经向环流的加强和维持, 导致冷空气频繁南下, 逐步推进到我国西南地区, 使得我国西南地区长期处于低温区, 有利于形成低温冰冻雨雪事件发生的温度条件。在事件少发年, 2 m 温度场则呈相反变化, 45°N 以南的亚洲地区从非洲中东部经过阿拉伯半岛、里海、巴尔克什湖一直到我国南方地区处于异常正值区, 有一条宽广的东西走向的正值带, 我国西南地区温度距平呈正值, 表明我国西南地区暖空气较为强盛, 不利于低温冰冻雨雪事件的发生。

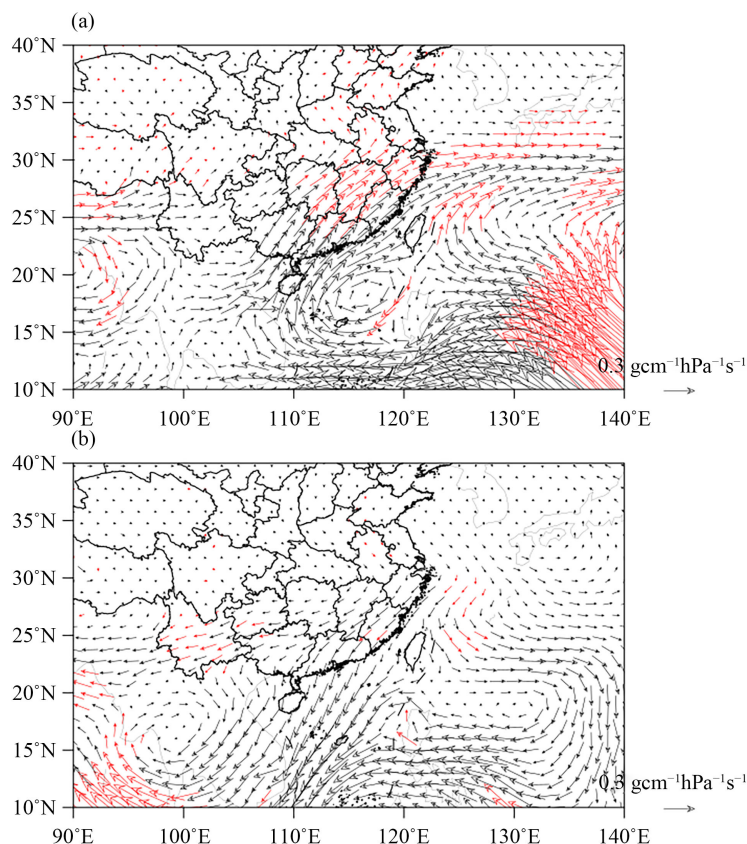


Figure 7. Synthesis of whole-layer water vapor (surface to 500 hPa) transport flux spacing distance level between years of high- and low-incidence of low-temperature freezing rain and snow events in winter in Southwest China (unit: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$): (a) Years of high occurrence; (b) Years of low occurrence, red arrows indicate passing the 95 percent significance test

图 7. 西南地区冬季低温冰冻雨雪事件多发年与少发年的整层水汽(地表至 500 hPa)输送通量距平合成(单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$): (a) 多发年; (b) 少发年, 红色箭头为通过 95%显著性检验

低温冰冻雨雪的发生与水汽的稳定输送有着密切相关, 从整层水汽输送通量距平(图 7)中可以看出, 事件多发年和少发年的水汽输送通道具有明显差异。在多发年, 孟加拉湾往西南地区输送水汽, 另外在我国东部沿海有一强大的反气旋性环流, 强盛的东南气流往西南地区输送; 孟加拉湾北部地区存在西风向的水汽输送通量距平, 西南地区水汽通量表现为西北风距平, 这意味着南亚季风北支流增强, 经孟加拉湾向我国西南地区输送的水汽能力增强。当低温冰冻雨雪事件发生时, 来自中纬度地区南支西风气流和来自南海、中南半岛的向北的气流在我国西南地区处汇合, 在该地区形成强的水汽辐合, 为西南地区冬季低温冰冻雨

雪事件发生提供了有利的水汽条件，而在低纬度地区西风水汽输送带对西南地区的降水影响不大。在少发年，水汽输送路径与多发年呈相反型变化，孟加拉湾地区存在东风向的水汽输送通量距平，西南地区水汽通量表现为东南风距平，则向我国西南地区输送水汽的能力减弱。中纬度地区东风气流和来自南海和中南半岛的向南的气流将水汽带离我国西南地区，不利于形成低温冰冻雨雪事件发生的水汽条件。

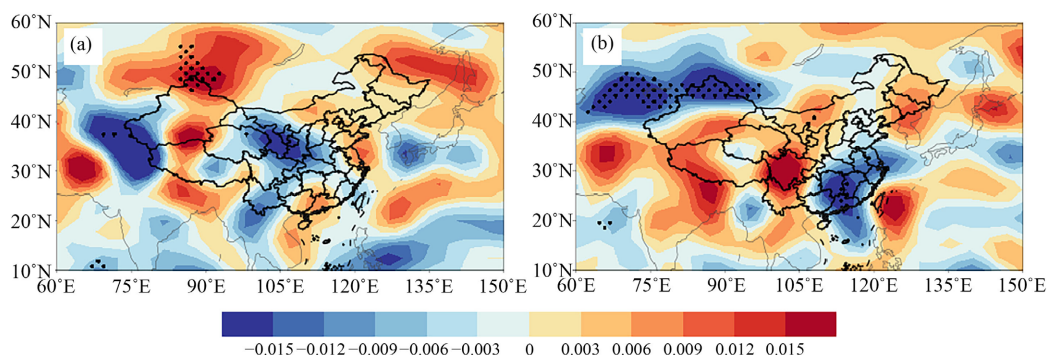


Figure 8. Synthesis of 850 hPa vertical velocity field distance level between years of high- and low-incidence of low-temperature freezing rain and snow events in winter in Southwest China (unit: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$): (a) Years of high incidence; (b) Yars of low incidence, punched as passing 95 per cent significance test

图 8. 西南地区冬季低温冰冻雨雪事件多发年与少发年 850 hPa 垂直速度场距平合成(单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$): (a) 多发年; (b) 少发年, 打点为通过 95% 显著性检验

除了充沛的水汽供应，强烈的上升运动也是产生降水的必要条件。从事件多发年和少发年的垂直速度场距平场(图 8)可看出，在事件多发年，西南地区垂直速度场距平主要表现为负值，表明该地区在冬季低温冰冻雨雪事件多发年主要受异常的上升运动控制，有利于降水的发生。在少发年，垂直速度场与多发年呈相反变化，除贵州东部地区垂直速度表现为负值，西南地区上空垂直速度场距平主要表现为正值，表明西南地区在冬季低温冰冻雨雪事件少发年主要受异常的下沉运动控制，不利于降水的发生。

5. 结论与讨论

1) 西南地区低温冰冻雨雪事件在时间尺度上存在一个“偏多 - 偏少”的年代际振荡特征，其中在 20 世纪 80 年代中期以前频次偏多，在 1994 年左右发生突变，从 21 世纪开始呈现显著下降趋势。其发生区域主要在川西高原至贵州中部一带，其中贵州中部一带在 1 月频次最多，到 2 月频次减少，同时川西高原发生频次增多。

2) 西南地区冬季低温冰冻雨雪事件多发年时，乌拉尔山高压脊偏强，有利于来自新地岛的冷空气南下，导致冷空气聚集，高压脊前西北气流引导新地岛冷空气南下，逐步推进到我国西南地区，使得西南地区长期处于低温区，有利于形成低温冰冻雨雪事件发生的温度条件。贝加尔湖到中国江淮地区为异常气旋式环流，我国南海到西南华南地区为异常西伸高压环流系统，沿异常气旋式环流西侧南下的冷空气与异常高压环流西北侧的暖湿空气在西南地区汇合，风场在该地区辐合，容易形成低温雨雪天气。

3) 西南地区冬季低温冰冻雨雪事件少发年时，中低纬度距平从西到东为正、负变化，我国东北地区为负距平，西南地区表现为正距平，这种分布形式不利于我国北方的冷空气南下和暖湿气流向西南地区输送。水汽输送路径与多发年呈相反型变化，西南地区水汽通量表现为东南风距平，孟加拉湾地区存在东风向的水汽输送通量距平，则向西南地区输送水汽的能力减弱。欧亚地区中高纬度存在较弱的异常反气旋，与西南地区的北风在该地区辐散，引致下沉气流，低温冰冻雨雪事件少发。

本文分析了西南地区冬季低温冰冻雨雪事件的大气环流特征，对其发生发展的机制有了初步的探究成果，但通过以往的研究我们发现，低温冰冻雨雪事件发生的机制极其复杂，其中地面上稳定持久的准

静止锋是西南地区低温雨雪天气发生的重要影响系统，且低温冰冻雨雪事件存在显著的年代际变化，因此下一步可以从地面准静止锋角度和事件的年代际变化影响进行研究。

基金项目

贵州省山地气候与资源重点实验室基金项目(QHLSSLJ [2022]-05)；贵州省气象局科研业务项目(黔气科登[2023] 08-01 号)。

参考文献

- [1] 王月, 李辑, 焦敏, 等. 中国大范围极端低温事件的特征分析[J]. 气象与环境学报, 2020, 36(6):74-81.
- [2] 朱万林, 李清泉, 王遵娅, 等. 近 60 年中国冷空气过程的气候变率分析[J]. 气象, 2022, 48(1): 1-13.
- [3] 龚志强, 王晓娟, 崔冬林, 等. 区域性极端低温事件的识别及其变化特征[J]. 应用气象学报, 2012, 23(2): 195-204.
- [4] 邵懿, 张祖强, 陶丽. 2007/2008 年冬季中国南方低温雨雪天气期间大气准双周振荡作用分析[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(3): 1-6.
- [5] 陶诗言, 卫捷. 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, 2008, 13(4): 337-350.
- [6] 丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 等. 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, 2008, 66(5): 808-825.
- [7] 马宁, 李跃凤, 琚建华. 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, 2011, 30(2): 318-327.
- [8] 杜小玲, 高守亭, 彭芳. 2011 年初贵州持续低温雨雪冰冻天气成因研究[J]. 大气科学, 2014, 38(1): 61-72.
- [9] 杨贵名, 孔期, 毛冬艳, 等. 2008 年初“低温雨雪冰冻”灾害天气的持续性原因分析[J]. 气象学报, 2008, 66(5): 836-849.
- [10] 钱晰. 中国低温雨雪冰冻事件特征及大尺度环流异常分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [11] 高辉, 陈丽娟, 贾小龙, 等. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 II.成因分析[J]. 气象, 2008, 34(4): 101-106.
- [12] 赵思雄, 孙建华. 2008 年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 351-367.
- [13] 宗志平, 马杰. 2008 年初冻雨强度变化以及与逆温层特征之间的关系[J]. 气象, 2011, 37(2): 156-160.
- [14] 赵美艳, 徐海明. 2008 年初南方冰雪天气逆温层特征及其维持机制[J]. 气象科学, 2010, 30(6): 814-821.
- [15] 孙建华, 赵思雄. 2008 年初南方雨雪冰冻灾害天气静止锋与层结结构分析[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 368-384.
- [16] 吴哲红, 陈贞宏, 白慧. 2011 年与 2008 年贵州低温雨雪冰冻天气锋区特征对比[J]. 干旱气象, 2013, 31(4): 763-770.
- [17] 张润琼, 刘艳雯, 姚刚, 等. 2008 年贵州罕见低温雨雪冰冻灾害成因及影响分析[J]. 热带地理, 2009, 29(4): 319-323+334.
- [18] 田青, 温敏, 张人禾, 等. 中国南方冬季持续性温湿异常事件的分类和特征分析[J]. 气象学报, 2017, 75(5): 729-743.
- [19] 杜小玲, 彭芳, 武文辉. 贵州冻雨频发地带分布特征及成因分析[J]. 气象, 2010, 36(5): 92-97.
- [20] 白慧, 柯宗建, 吴战平, 等. 贵州冬季冻雨的大尺度环流特征及海温异常的影响[J]. 高原气象, 2016, 35(5): 1224-1232.
- [21] Ding, Y.H., Jia, X.L., Wang, Z.Y., Chen, X.Y. and Chen, L.J. (2009) A Contrasting Study of Freezing Disasters in January 2008 and in Winter of 1954/1955 in China. *Frontiers of Earth Science in China*, 3, 129-145. <https://doi.org/10.1007/s11707-009-0028-2>
- [22] 王林, 覃军, 陈正洪, 等. 南方冰冻雨雪灾害年的环流及气象要素异常的统计分析[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(S1): 173-180.
- [23] 钱晰, 翟盘茂. 中国大陆低温雨雪及冰冻事件及其变化特征分析[C]//创新驱动发展 提高气象灾害防御能力——S2 灾害天气监测、分析与预报. 南京: 中国气象学会, 2013: 1-14.
- [24] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007.