

# 近50a黔东南冬季凝冻时空分布及异常凝冻年环流特征分析

秦畅畅<sup>1</sup>, 严小冬<sup>2\*</sup>, 梁平<sup>1</sup>, 张皓<sup>3</sup>, 刘芷含<sup>4</sup>

<sup>1</sup>黔东南州气象局, 贵州 凯里

<sup>2</sup>贵州省气候中心, 贵州 贵阳

<sup>3</sup>清镇市气象局, 贵州 清镇

<sup>4</sup>成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年7月28日; 录用日期: 2025年8月27日; 发布日期: 2025年9月4日

## 摘要

本文利用1971~2020年黔东南16个国家站冬季(12月至次年2月)雨淞观测资料, NCEP/NCAR海平面气压、500 hPa高度场再分析资料和NOAA海表温度资料, 借助M-K、EOF、小波分析及合成分析等方法对黔东南冬季凝冻的时空分布特征、时间演变规律以及环流特征进行了诊断分析研究。结果表明, 黔东南雨淞总体分布形势呈西部、东部多、南北少的特点。雨淞存在较大的年际和年代际变化, 从20世纪90年代初期开始雨淞呈下降的趋势; 北半球强凝冻年500 hPa位势高度距平场上亚洲西部为正距平控制, 整个欧亚地区50°N以北为正距平、以南为负距平; 弱凝冻年环流场中欧亚地区50°N以北为负距平、以南为正距平。强凝冻年赤道中东太平洋海水表面温度异常偏冷, 阿留申-阿拉斯加湾为负距平, 热带印度洋和热带中东太平洋为显著的负距平, 冷海温发展有利于冬季凝冻偏多; 弱凝冻年海温距平分布与强凝冻年相反。

## 关键词

凝冻, 时空分布, 环流特征

## Analysis of Annual Circulation Characteristics of Temporal and Spatial Distribution and Abnormal Freezing in Winter in Southeastern Guizhou in Recent 50 Years

Changchang Qin<sup>1</sup>, Xiaodong Yan<sup>2\*</sup>, Ping Liang<sup>1</sup>, Hao Zhang<sup>3</sup>, Zhihan Liu<sup>4</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 秦畅畅, 严小冬, 梁平, 张皓, 刘芷含. 近50a黔东南冬季凝冻时空分布及异常凝冻年环流特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(5): 926-935. DOI: 10.12677/ccrl.2025.145092

<sup>1</sup>Qiandongnan Meteorological Bureau, Kaili Guizhou<sup>2</sup>Guizhou Climate Center, Guiyang Guizhou<sup>3</sup>Qingzhen City Meteorological Bureau, Qingzhen Guizhou<sup>4</sup>School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu SichuanReceived: Jul. 28<sup>th</sup>, 2025; accepted: Aug. 27<sup>th</sup>, 2025; published: Sep. 4<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Based on the observation data of winter (December to February of the following year) at 16 national stations in southeastern Guizhou from 1971 to 2020, the NCEP/NCAR sea level pressure & 500 hPa height field reanalysis data & NOAA sea surface temperature data, temporal evolution law and the characteristics of circulation situation in southeastern Guizhou in winter were studied, which are more in the west and east and less in the north and south, through M-K, EOF, wavelet analysis and synthetic analysis, the temporal and spatial distribution characteristics. The silver thaw has great interannual and interdecadal changes. From the early 1990s, the silver thaw showed a downward trend. In the 500 hPa geopotential height anomaly field in the Northern Hemisphere during strong freezing years, the western part of Asia is controlled by the positive anomaly, and the whole Eurasian region is controlled by the positive anomaly in the north of 50°N and negative anomaly in the south; In the circulation field of the weak freezing year, the north of 50°N in Eurasia is a negative anomaly and positive anomaly in the south. In severe freezing years, the surface temperature of the equatorial Middle East Pacific Ocean is abnormally cold, with a negative anomaly in Aleutian-Gulf of Alaska, and a significant negative anomaly in the tropical Indian Ocean and tropical Middle East Pacific Ocean. In years with strong freezing events, the sea surface temperature (SST) in the equatorial central-eastern Pacific Ocean is abnormally cold, there is a negative anomaly in the Aleutian-Gulf of Alaska, and significant negative anomalies in the tropical Indian Ocean and the tropical central-eastern Pacific Ocean. The development of cold SST is conducive to more freezing events in winter; the distribution of SST anomalies in years with weak freezing events is opposite to that in years with strong freezing events.

## Keywords

Freezing, Temporal and Spatial Distribution, Circulation Characteristics

Copyright © 2025 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

凝冻是贵州冬季常见的灾害性天气，它与贵州特定的地理位置和特殊的地形地貌，以及气候条件密切相关。冬季北方冷空气不断南下，与南方暖湿气流在我国西南地区汇合形成静止锋，由于锋后阴雨绵绵，基础温度低，极易形成凝冻。凝冻对交通、电力传输、能源供应、通信设施、农业生产和人民生活等各方面造成严重的影响。例如 2008 年初，我国南方出现大范围持续低温雨雪冰冻天气，造成了极其严重的自然灾害[1]-[3]。因此，对凝冻天气研究具有重要意义。多年来贵州有不少气象专家对凝冻天气展开了研究，杜晓玲等[4]研究了贵州冻雨的时空分布，发现冻雨出现在 27°N 附近区域；严小冬等[5]分析了贵州冻雨的空间分布特征、时间演变规律，研究表明贵州冻雨时空分布不均，存在明显的年际变化和年代际变化；许丹等[6]分析了凝冻指数场的分布特征及时间系数的演变规律，研究表明重凝冻年与无凝冻年

差异最显著的地区在欧亚地区, 重凝冻年在 500 hPa 高度距平场呈“北高南低”的分布型, 无凝冻年呈“北低南高”的分布型; 随着气候变暖, 近 10 年来的贵州冬季凝冻时空分布及异常凝冻年环流特征分析尚没人研究, 特别是对黔东南对本地凝冻的研究较少。根据业务需求, 在前人的研究基础之上利用最新资料对黔东南的凝冻天气进一步研究, 找出凝冻的气候特征, 为今后开展及时准确的凝冻监测、预报、预警和服务提供技术支撑, 也为当地政府、交通等相关部门防灾减灾提供科学的决策依据。

## 2. 资料与方法

### 2.1. 资料选取

本文选取黔东南地区(107.4°E~109.6°E, 25.4°N~27.4°N)范围内 16 个国家站 1971~2020 年逐日地面观测资料(要素包括气温、相对湿度、降水、风速、日照、雨淞等), 以黔东南 16 个站点的气象资料为基础数据, 选取最冷时段 12~翌年 2 月, 即冻雨多发期, 一天中有 1 站以上(包括 1 站)出现雨淞定义为雨淞日, 以逐年台站数据中的雨淞记录来表示实际发生凝冻的参考。冬季定义为当年 12 月至次年 2 月(例如 1971 年冬季指 1971 年 12 月至 1972 年 2 月)。格点选取 NCEP/NCAR 再分析资料, 要素包括海平面气压场(SLP)、500 hPa 位势高度场, 水平分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  以及 NOAA 海温资料, 气候场资料来自国家气候中心。

### 2.2. 方法

本文主要采用了曼-肯德尔 Mann-Kendall 法[7] [8]、Morlet 小波分析[9]、EOF (正交函数分解)、合成分析等方法。

采用正交函数(EOF)的分解方法[10] [11]对黔东南凝冻日数的变量场分布进行分析。用 North 等提出的计算特征值误差范围来进行显著性检验。通过显著性检验的前几项特征向量表征凝冻变量场的变率分布结构。

特征值  $\lambda_i$  的误差范围为:

$$e_i = \lambda_i \left( \frac{2}{n} \right)^{1/2}$$

式中  $n$  为样本量。当相邻的特征值  $\lambda_{i+1}$  满足

$$\lambda_i - \lambda_{i+1} \geq e_i$$

时, 就认为这两个特征值所对应的经验正交函数是有价值的信号。

从特征值的方差贡献了解所分析的特征向量的方差占方差的比例及前几项特征向量共占总方差的比例。计算每个特征向量的方差贡献:

$$R_j = \lambda_j / \sum_{i=0}^m \lambda_i, (j = 0, 1, 2, \dots, p)$$

## 3. 结果分析

### 3.1. 黔东南冬季雨淞强度时空变化特征分析

#### 3.1.1. 黔东南冬季雨淞的月际分布

图 1 是黔东南雨淞日数月平均变化图。黔东南雨淞集中出现在(12 月~翌年 2 月), 1 月雨淞日数最多, 占总数的 50%, 2 月次之, 占总数的 31%, 11 月雨淞出现最少, 年平均仅 0.6 d; 整个冬季, 月平均雨淞日数变化呈抛物线形式。雨淞最早于 11 月下旬开始, 翌年 3 月上中旬结束。

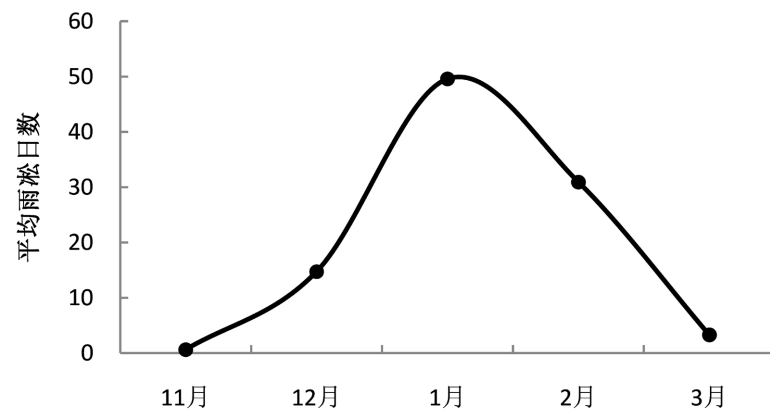


Figure 1. Monthly average variation chart of rime days in Qiandongnan

图 1. 黔东南雨凇日数月平均变化图

### 3.1.2. 黔东南雨凇日数与对应站点海拔高度的关系

图 2 是黔东南 16 个国家站多年平均雨凇日数和海拔高度点绘成散点图。由图可以看出，雨凇平均日数是随着海拔高度的增加而增加，海拔较高的地区，雨凇日数偏多。据统计，海拔高度在 600~1000 m 之间最容易导致黔东南雨凇高频出现，约占总日数的 59%，海拔高度与雨凇日数呈显著正相关。

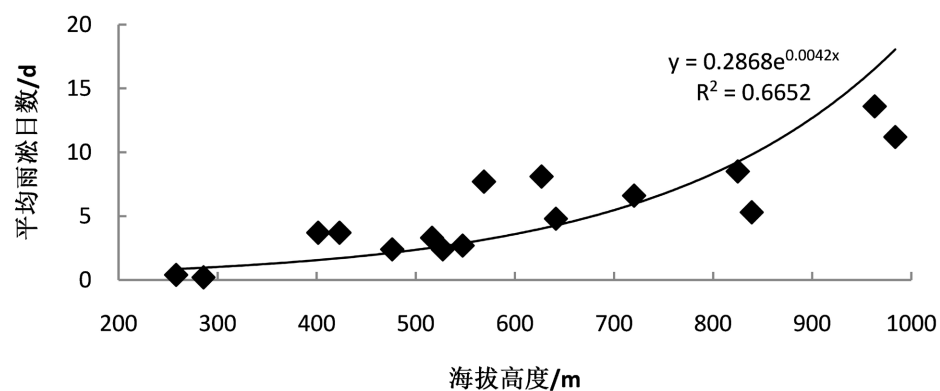
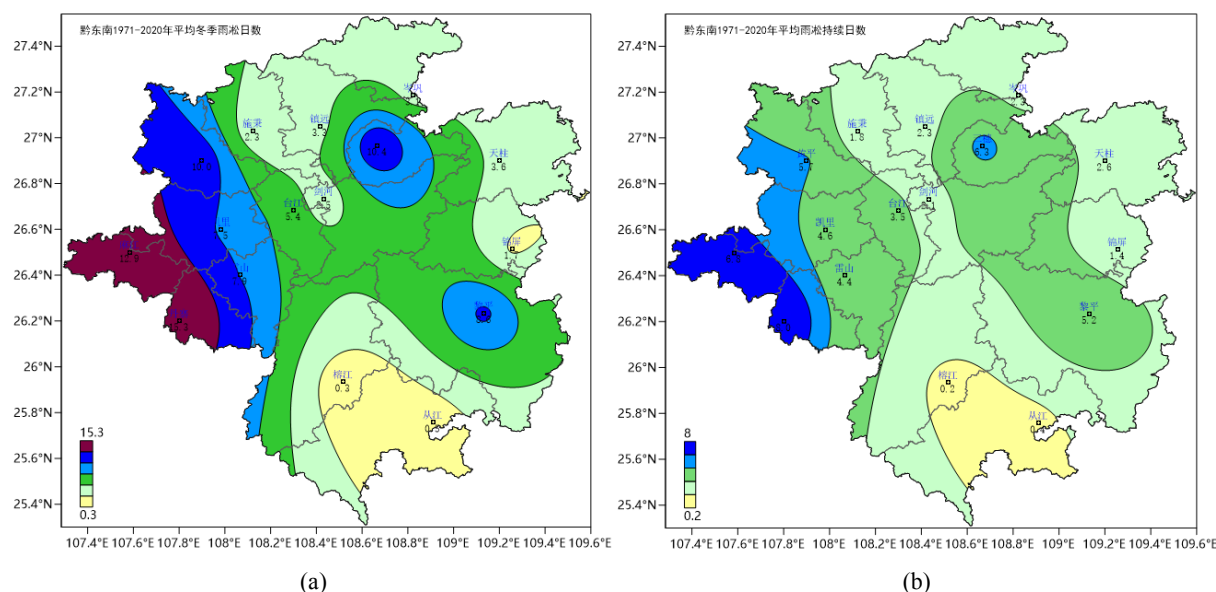


Figure 2. Curve chart of average rime days and altitude in Qiandongnan

图 2. 黔东南平均雨凇日数与海拔高度曲线图

### 3.1.3. 黔东南冬季雨凇日数和持续日数分布

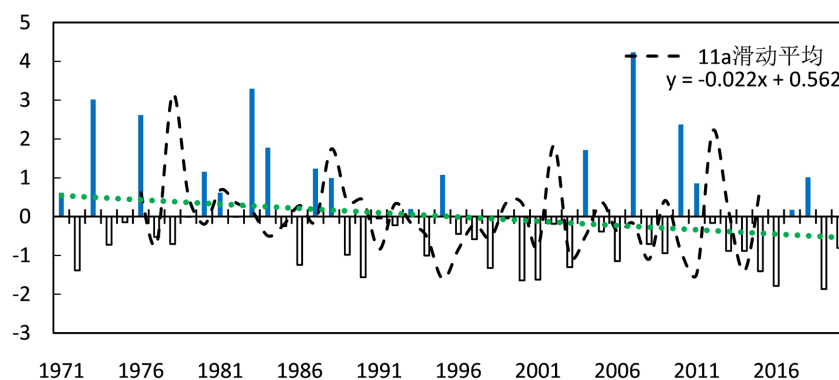
图 3 是 1971~2020 年冬季平均雨凇日数和持续日数分布。图 3(a)显示黔东南共有 3 个雨凇多发中心，依次是位于州西部地区的麻江、丹寨，海拔较高在 900 m 以上，其次是东部地区的三穗以及东南部地区的黎平，海拔高度相对于周边地区高出 100~200 m，是冷空气入侵的迎风坡。黔东南雨凇频发地区出现在 26°N~27°N 之间，最大值出现在丹寨，年平均雨凇日数达 15.3 d。在同一纬度附近雨凇日数较多的站还有麻江、凯里、黄平、三穗、黎平。严小冬、吴战平等[5]研究发现，雨凇分布形态与地形密切相关，上述雨凇多的站大多位于海拔高度和相对高度较高的地区，南部地区纬度偏南，相对于其他站点温度偏高，从而雨凇日数偏少。黔东南雨凇总体分布形势呈现西部、东部多、南北少。结合 1971~2020 年冬季黔东南平均雨凇持续日数空间分布(图 3(b))，发现黔东南雨凇持续时间较长的两个区域分别是州西部一线丹寨、麻江、黄平，以及东部地区的三穗，平均雨凇持续日数在 5.7~8.0 d 之间，该区域凝冻发生频率较高；州南部地区的榕江、从江平均雨凇持续日数在 0.2~0.4 d 之间，该区域凝冻发生频率较低且持续时间较短。



**Figure 3.** (a) Distribution of average rime days in winter from 1971 to 2020; (b) distribution of the duration days of winter rime from 1971 to 2020

**图 3.** (a) 1971~2020 年冬季平均雨凇日数分布; (b) 1971~2020 年冬季雨凇持续日数分布

图 4 是 1971~2020 年黔东南雨凇日数距平时间序列分布, 从 11a 滑动平均值可以看出, 20 世纪 70 年代中后期、80 年代中期时段内雨凇强度较平均水平偏强, 以正距平为主, 从 20 世纪 90 年代初期开始雨凇呈现减小的趋势, 以负距平为主。观察图中雨凇日数距平时间序列发现, 近年来极端雨凇事件较多, 进入 21 世纪后, 有 2 个年份出现较强雨凇, 分别是 2007/2008 年冬季、2010/2011 年冬季, 且 2007/2008 年冬季是在研究时段 50a 内强度最强的。综上所述, 不论是线性趋势还是 11a 滑动平均, 黔东南冬季雨凇整体呈减少趋势。



**Figure 4.** Time series of rime days anomalies in Qianjiangnan from 1971 to 2020

**图 4.** 黔东南 1971~2020 年雨凇日数距平时间序列

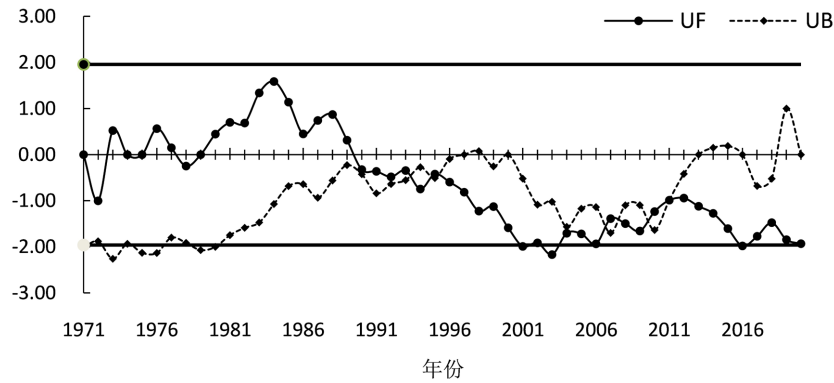
### 3.2. 凝冻时间演变特征分析

#### 3.2.1. 黔东南雨凇日数的 M-K 突变分析

对黔东南 1971~2020 年的雨凇日数进行突变检验, 利用 Mann-Kendall 检验可以分析得出(图 5): 在信度  $\alpha=0.05$  的显著性水平下, 临界值  $u_{0.05}=\pm 1.96$ , 黔东南雨凇日数存在突变, 根据 UF 和 UB 曲线交点的位置确定突变点在 1990 年, 1990 年以前雨凇呈现上升趋势, 1990 年到 21 世纪初期雨凇进入减少趋



势，在 2003 年附近出现极小值，这种偏少趋势超过显著性水平 0.05 临界线，表明雨淞下降趋势是十分显著的，2004~2012 年有小幅上升，雨淞日数开始增多，2012 年后至今整体维持下降趋势。

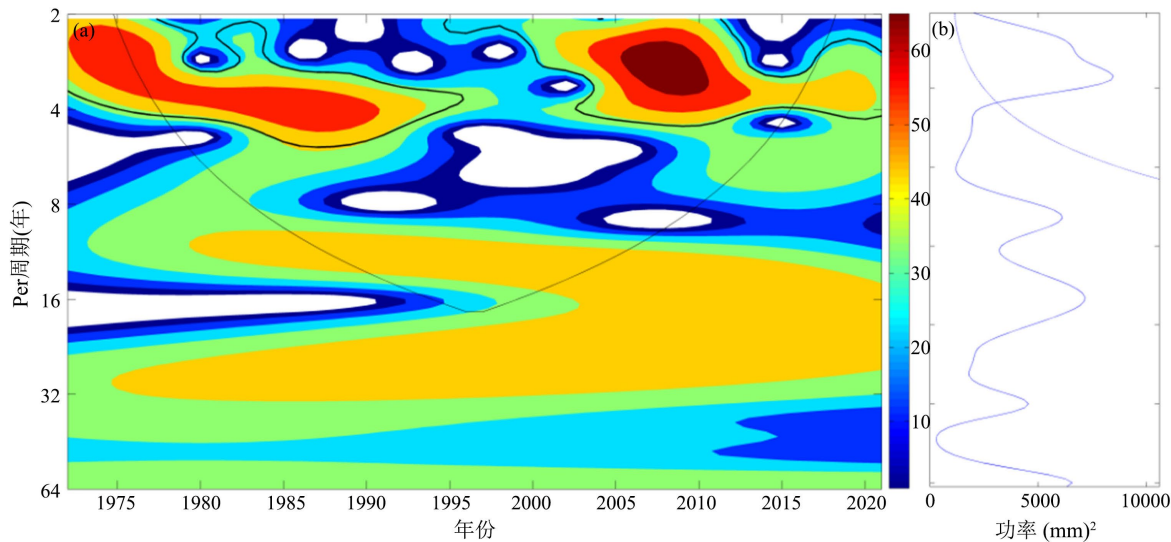


(直线为  $\alpha = 0.05$  显著性水平临界值)。

Figure 5. Mann-Kendall test for average winter rime days in Qiandongnan from 1971 to 2020  
图 5. 黔东南 1971~2020 年平均冬季雨淞日数 Mann-Kendall 检验

3.2.2. 小波变化特征分析

图 6 为雨淞日数小波功率谱，显示了黔东南冬季雨淞在不同时间尺度上的周期变化。可以看出，1975~1995 年间，雨淞变化周期主要为 2~4a，2000 年以后至今 2~4a 周期较为显著，达到统计显著水平，1995~2000 年间由于雨淞偏弱，未通过显著水平  $\alpha = 0.05$  的检测区域。通过小波强度能量曲线表明 2~4a 为主周期，且通过了 95%信度的显著性检验。



(a) 黑色实线：经过红噪声检验显著水平  $\alpha = 0.05$  的区域，黑色虚线：此线以下为边缘效应影响区；(b) 凝冻小波方差谱(实线：计算谱；虚线：红噪音谱)。

Figure 6. Wavelet power spectrum of freezing days  
图 6. 凝冻日数小波功率谱

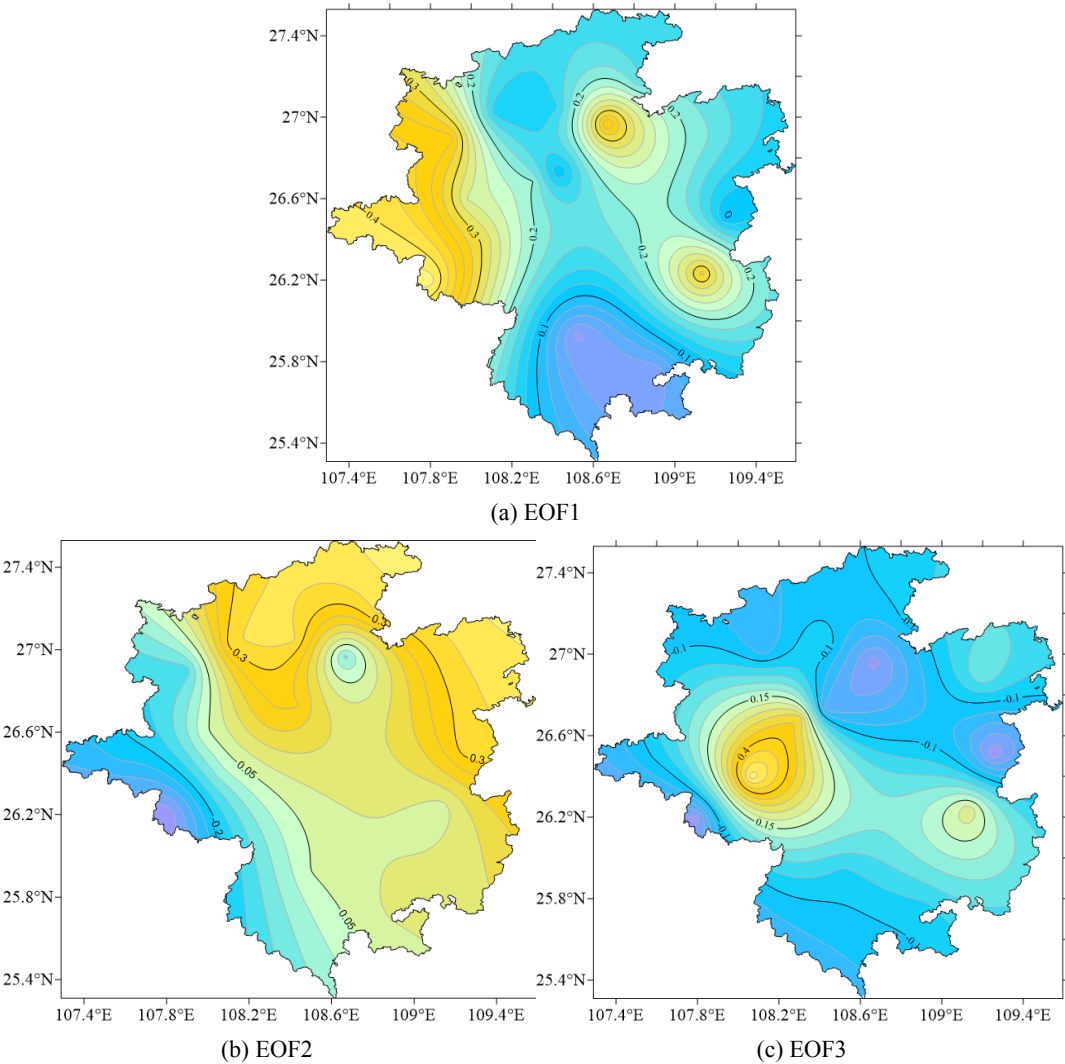
3.2.3. 黔东南冬季凝冻 EOF 分型

从空间场上分析凝冻的主要特征，对 1971~2020 年黔东南 16 个国家站冬季雨淞日数进行 EOF 分解，

在 95%置信度水平下具有统计显著性, 其前 3 个模态存在显著差异, 特征向量场的方差贡献如表 1 所示, 表明前 3 模态能很好的表征 16 个站点雨凇日数的空间分布特征。结果表明, 黔东南凝冻指数的第一特征向量场(EOF1)占总方差的 82.7%, 再结合前 3 模态对应的空间分布型结果可以看出(图 7(a)~(c)), EOF1 较好地反映了雨凇日数场基本信息, 说明冬季雨凇日数的年际变化具有较好的一致性。高值区位于麻江、丹寨、黄平、三穗、黎平表现出很好的同位相变化。特征向量场 EOF2 与 EOF1 空间分布呈反位相型, 而第三特征向量场 EOF3 方差贡献只占总方差的 1.94%, 特征向量场 EOF3 与 EOF1、EOF2 为“东、西部反位相型”。

**Table 1.** Variance Contribution of the Eigenvector Field for the Number of Rime Days in Winter  
**表 1.** 冬季雨凇日数特征向量场的方差贡献

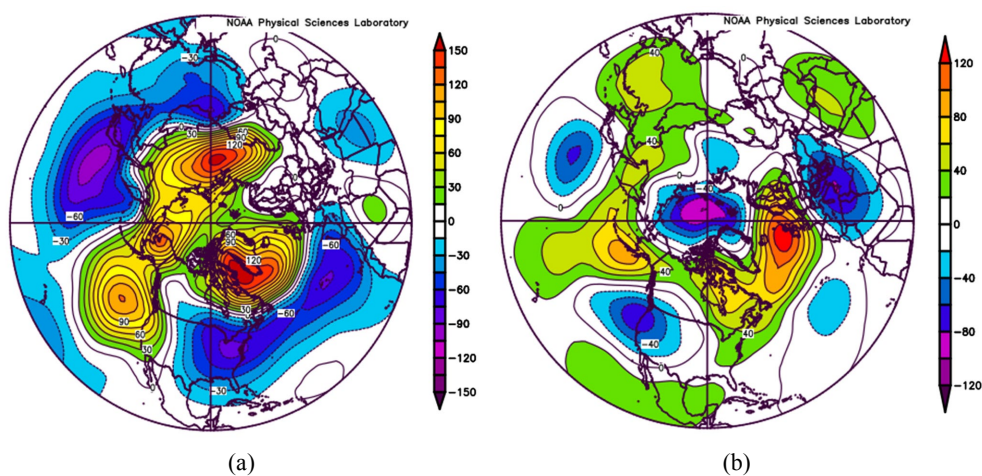
| 特征向量场 | 特征值   | 方差贡献率(%) | $\lambda_i - \lambda_{i+1}$ |
|-------|-------|----------|-----------------------------|
| 第一模态  | 413.6 | 82.7     | 379.4                       |
| 第二模态  | 34.1  | 6.82     | 24.3                        |
| 第三模态  | 9.7   | 1.94     | 3.47                        |



**Figure 7.** EOF spatial distribution of winter rime days in Qiandongnan from 1971 to 2020  
**图 7.** 1971~2020 年冬季黔东南雨凇日数 EOF 空间分布

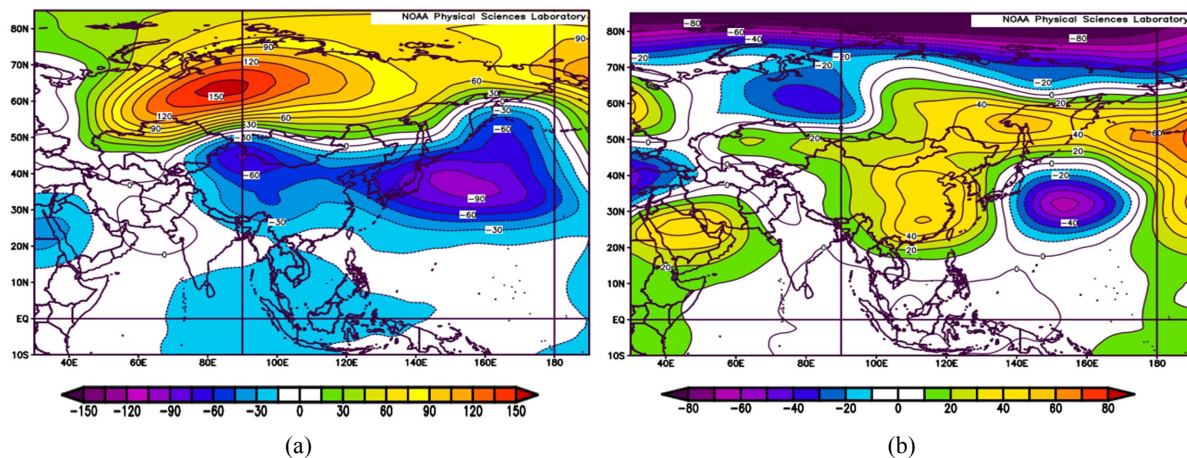
### 3.3. 凝冻年环流异常特征分析

图 8 为北半球强凝冻年(1973, 1976, 1983, 1995, 2007, 2010 年)和弱凝冻年(1972, 1986, 1990, 1998, 2001, 2016 年) 500 hPa 位势高度距平场合成分布, 在出现强凝冻年的环流场中, 主要的环流形势是极圈上有负距平, 说明有极涡存在, 极涡向南发展, 整个欧亚地区  $50^{\circ}\text{N}$  以北为正距平区、以南为负距平区, 距平图上呈现“北正南负”的分布型。黔东南地区出现凝冻时为负距平控制, 中高纬有阻塞高压存在, 阻塞高压前持续的强冷空气南下与南方的暖湿气流配合, 易出现大范围凝冻天气。弱凝冻年的环流场分布与强凝冻年相反, 即暖空气较为活跃, 冷空气影响较为偏北, 不易造成凝冻。许丹等[6]研究发现, 欧亚地区 500 hPa 高度场“北高南低”的距平分布对应贵州冬季雨淞强度强, 反之, “北低南高”的距平分布对应冬季雨淞强度弱。



**Figure 8.** (a) Anomaly map of 500 hPa geopotential height field in strong freezing years; (b) anomaly map of 500 hPa geopotential height field in weak freezing years

**图 8.** (a) 强凝冻年 500 hPa 位势高度场距平图; (b) 弱凝冻年 500 hPa 位势高度场距平图



**Figure 9.** (a) 500 hPa geopotential height field in strong freezing years; (b) 500 hPa geopotential height field in weak freezing years

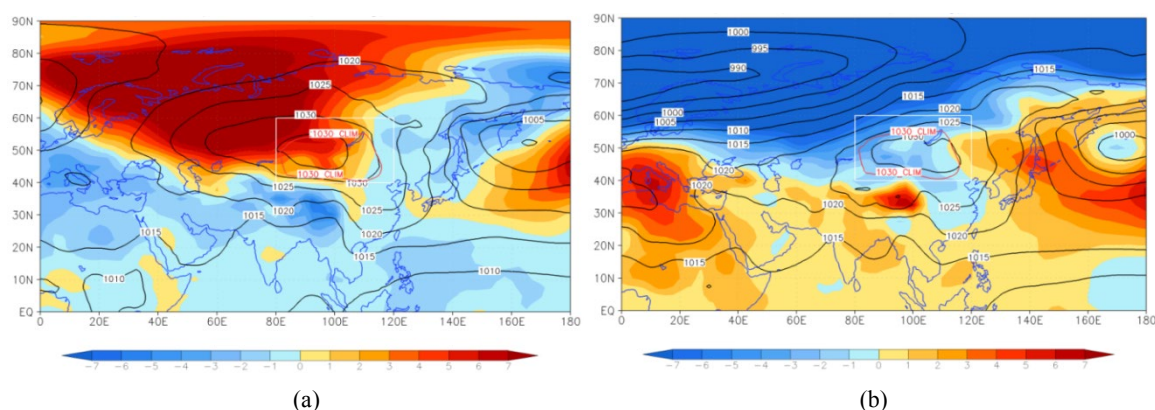
**图 9.** (a) 强凝冻年 500 hPa 位势高度场; (b) 弱凝冻年 500 hPa 位势高度场

强凝冻年在 500 hPa 高度场上,  $50^{\circ}\text{N}$  以北的欧亚大陆中高纬环流呈“西高东低”的分布型, 亚洲西部为正距平控制, 环流经向度加大,  $50^{\circ}\text{N}$  以南的欧亚地区环流呈“西高东低”的分布型, 高纬度地区的高度场为正距平, 低纬度地区为负距平。黔东南地区出现大范围低温、雨雪冰冻天气时乌拉尔山高压脊



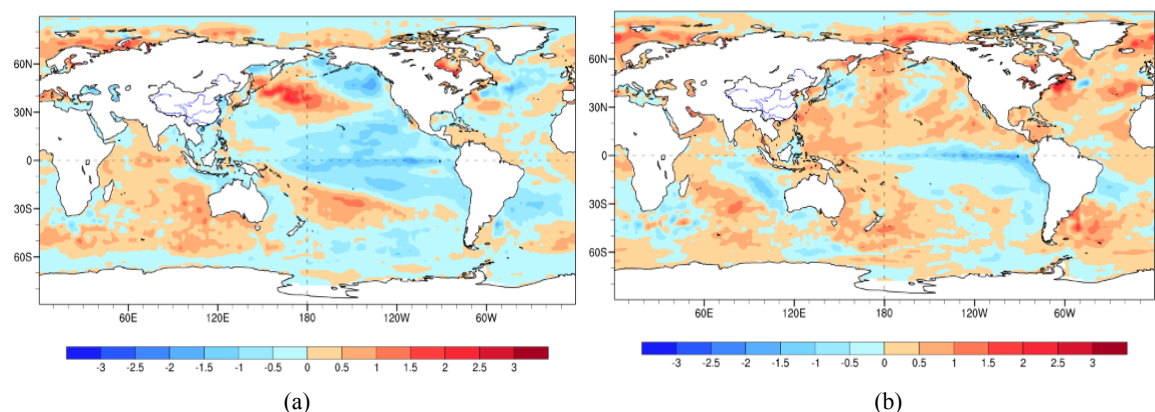
加强,东亚槽加深,冷空气从西伯利亚连续不断的以西方路径入侵;弱凝冻年的距平场的分布与强凝冻年正好相反,乌拉尔山一带的高压脊减弱,不利于槽后脊前来自高纬地区的冷空气入侵,从而黔东南地区不易出现大范围凝冻天气(图9)。

图10为冬季SLP距平场。整个东亚大陆均受较强的冷高压控制,乌拉尔山附近为正海平面距平控制,西伯利亚高压偏强,冷空气在此堆积,正距平大值区为西伯利亚至贝加尔湖一带,这种北正南负的距平分布,利于冷空气南下入侵我国。随后冷空气主要从西伯利亚经蒙古到达河套附近,沿着河西走廊南下侵入黔东南地区,可直接造成黔东南出现大范围低温、雨雪天气;当西伯利亚地区为负距平所控制,不利于西伯利亚高压的加深与维持,也不利于冷空气南下,则黔东南地区对应的凝冻天气偏弱。



**Figure 10.** (a) Sea level pressure field in strong freezing years; (b) sea level pressure field in weak freezing years  
**图 10.** (a) 强凝冻年海平面气压场; (b) 弱凝冻年海平面气压场

白慧等[12]分析了影响贵州冬季冻雨日数的大尺度环流系统,讨论了海温异常对冻雨日数的影响,研究发现秋、冬季赤道中东太平洋冷暖海温发展有利于冻雨日数偏多(少),此外,前期秋季赤道太平洋 Nino 区海温异常是显著影响贵州冬季冻雨日数的年际预报信号。图11为前期秋季海温距平合成图。强凝冻年赤道中东太平洋海水表面温度异常偏冷,阿留申-阿拉斯加湾为负距平,热带印度洋和热带中东太平洋为显著的负距平,冷海温发展有利于冬季雨淞日数偏多,当亚洲中高纬大气环流经向发展异常强烈时,则引导冷空气频繁南下,会造成黔东南地区凝冻偏重;弱凝冻年海温距平分布与强凝冻年相反。张娇艳等[13]研究发现主要关键区在北大西洋 25°N~35°N, 60°W~40°W 海温异常偏低(高)时,对应贵州雨淞强度偏强(弱)。



**Figure 11.** (a) Distribution map of sea surface temperature anomaly (SSTA) in strong freezing years; (b) distribution map of sea surface temperature anomaly (SSTA) in weak freezing years  
**图 11.** (a) 强凝冻年海温距平(SSTA)分布图; (b) 弱凝冻年海温距平(SSTA)分布图

## 4. 小结

本文对黔东南冬季凝冻的时空分布特征及凝冻环流特征进行了分析, 得出如下初步结论:

(1) 黔东南冬季雨淞时空分布不均, 总体分布形势呈西部、东部多、南北少的特点; 雨淞日数月演变呈抛物线型, 且具有明显的年代际和年际变化特征, 20 世纪 70 年代中后期、80 年代中期时段内雨淞强度偏强, 从 20 世纪 90 年代初期开始雨淞呈显著下降趋势, 在 2003 年附近出现极小值。

(2) 冬季雨淞日数 EOF 分解结果表明在 95%置信度水平下具有统计显著性, 其前 3 个模态存在显著差异, 通过相关性分析得出黔东南冬季雨淞日数特征向量场的方差贡献率达 82.7%, 而且空间分布比较均匀。小波分析显示了黔东南冬季雨淞在不同时间尺度上的周期变化, 表明通过显著水平  $\alpha = 0.05$  的检测区域, 雨淞变化主周期为 2~4a。

(3) 北半球 500 hPa 位势高度距平场合成分析表明, 强凝冻年亚洲西部为正距平控制, 整个欧亚地区 50°N 以北为正距平, 以南为负距平, 距平图上呈现“北正南负”的分布型, 弱凝冻年呈“北负南正”的分布型。黔东南地区出现凝冻时中高纬有阻塞高压存在, 乌拉尔山高压脊加强, 东亚槽加深, 阻塞高压前持续的强冷空气南下与南方的暖湿气流配合, 直接造成大范围低温、雨雪冰冻天气; 弱凝冻年的环流场分布与强凝冻年正好相反。

(4) 前期秋季海温距平合成分析表明, 强凝冻年赤道中东太平洋海水表面温度异常偏冷, 阿留申 - 阿拉斯加湾为负距平, 热带印度洋和热带中东太平洋为显著的负距平, 冷海温发展有利于冬季凝冻偏多; 当亚洲中高纬大气环流经向发展异常强烈时, 则引导冷空气频繁南下, 会造成黔东南地区凝冻偏重; 弱凝冻年海温距平分布与强凝冻年相反。

## 参考文献

- [1] 吴战平, 严小冬, 古书鸿, 等. 前期高度场和海温场变化对贵州冬季冻雨的影响[J]. 高原山地气象, 2015, 35(1): 41-47.
- [2] 王玥彤, 李栋梁. 中国西南地区冻雨灾害特征分析与评估[J]. 冰川冻土, 2017, 39(5): 967-978.
- [3] 汪卫平, 张娇艳. 贵州省短期气候预测手册[M]. 北京: 气象出版社, 2020.
- [4] 杜晓玲, 彭芳等. 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.
- [5] 严小冬, 吴战平, 古书鸿. 贵州冻雨时空分布变化特征及其影响因素浅析[J]. 高原气象, 2009, 28(3): 694-701.
- [6] 许丹, 罗喜平. 贵州凝冻的时空分布特征和环流成因分析[J]. 高原气象, 2003, 22(4): 401-404.
- [7] 符宗斌, 王强. 气候突变的定义和检验方法[J]. 大气科学, 1992(16): 482-493.
- [8] 钟有萍, 高红梅, 孙贵江, 等. 近 60a 铜仁市凝冻气候变化特征及灾害风险区划[J]. 高原山地气象研究, 2013, 33(2): 63-68.
- [9] 葛秋. 1965-2017 年浑河沈阳站降水量变化规律研究[J]. 水利科技与经济, 2021, 27(2): 12-15.
- [10] 黄晨然, 白慧, 贵州冬季凝冻特征及环流分型研究[J]. 贵州气象, 2017, 41(3): 10-16.
- [11] 徐智慧, 严小冬, 吴战平, 等. 贵州近 49a 冬半年降水变化及少雨年成因浅析[J]. 贵州气象, 2013, 37(2): 21-25.
- [12] 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.
- [13] 张娇艳, 王玥彤, 吴战平, 等. 贵州省冬季雨淞灾害预测模型的初构[J]. 中低纬山地气象, 2018, 42(3): 38-43.