

云南东北部冻雨的气候特征及影响因素研究

王韵颖^{1,2,3}, 王国复⁴, 郑春怡^{5*}, 黄 菲^{1,2,3*}

¹中国海洋大学深海多圈层与地球系统前沿科学中心, 山东 青岛

²中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛

³中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛

⁴中国气象局国家气候中心, 北京

⁵云南省气象局, 云南 昆明

收稿日期: 2024年10月1日; 录用日期: 2024年10月28日; 发布日期: 2024年11月5日

摘要

本文依据1991~2021年云南东北部冻雨相关观测日值数据, 分析了云南东北部冻雨发生的气候特征和影响因素。结果表明: 云南东北部冻雨主要发生在12月至1月。发生次数总体呈现减弱趋势, 在2014/2015年出现显著突变, 由偏多转变为偏少。在冻雨偏多时乌拉尔山附近阻塞高压和切断低压偏强, 整个北极和西南地区位势高度呈现负距平, 欧亚地区温度场大范围呈现负距平, 欧洲东部呈现强烈的反气旋式环流, 有利于冷空气从极地向西伯利亚移动; 在冻雨偏少时, 阻塞低压的位置偏东, 位势高度和温度场异常与偏多年相反。冻雨发生与赤道中东太平洋海区La Niña型和北大西洋三极子型的海温异常有关。1991~2014年冻雨的发生次数与赤道中东太平洋海温关系较为明显, 2015~2021年冻雨的发生次数与西北太平洋海温和巴芬湾的海冰关系较为明显。分别建立冻雨的预报模型, 发现对2015~2021年冻雨的发生次数的模拟较好。

关键词

冻雨, 云南东北部, 大气环流, 海温, 海冰

Study on Climatic Characteristics and Influencing Factors of Freezing Rain in Northeast Yunnan Province

Yunying Wang^{1,2,3}, Guofu Wang⁴, Chunyi Zheng^{5*}, Fei Huang^{1,2,3*}

¹Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres, Ocean University of China, Qingdao Shandong

²Earth System and Key Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao Shandong

³College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

*通讯作者。

⁴National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing

⁵Yunnan Meteorological Bureau, Kunming Yunnan

Received: Oct. 1st, 2024; accepted: Oct. 28th, 2024; published: Nov. 5th, 2024

Abstract

Based on the observed daily values of freezing rain in northeast Yunnan from 1991 to 2021, the climatic characteristics and influencing factors of freezing rain in northeast Yunnan were analyzed in this paper. The results show that the freezing rain mainly occurs from December to January in northeast Yunnan. The frequency of occurrence generally showed a weakening trend, and there was a significant mutation in 2014/2015, which changed from more to less. When there is more freezing rain, the blocking high and cutting low near the Ural Mountains are stronger, the geopotential height of the whole Arctic and southwest China presents a negative anomaly, the temperature field in Eurasia presents a negative anomaly in a wide range, and the eastern Europe presents a strong anticyclonic circulation, which is conducive to the movement of cold air from the polar regions to Siberia. When there is less freezing rain, the blocking low is located to the east, and the geopotential height and temperature field anomalies are opposite to those in the past few years. The occurrence of freezing rain is associated with sea surface temperature (SST) anomalies of La Niña type in the equatorial Middle Eastern Pacific and the North Atlantic tripole type. The relationship between the occurrence of freezing rain and SST in the equatorial Middle East Pacific from 1991 to 2014 is obvious, and the relationship between the occurrence of freezing rain and the SST in the Northwest Pacific and the sea ice in Baffin Bay from 2015 to 2021 is obvious. The forecast model of freezing rain is established respectively, and it is found that the simulation of freezing rain occurrence times from 2015 to 2021 is better.

Keywords

Freezing Rain, Northeast Yunnan, Atmospheric Circulation, SST, Sea Ice

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

冻雨(Freezing Rain, ZR)是一种发生在近地表的过冷液体降水，其特点是雨滴的温度低于 0℃。严重的冻雨天气会对农田、建筑及交通设施等造成严重破坏，我国南方地区在冬季常遭受冻雨灾害。21 世纪以来，全球气候变暖显著加剧，极端天气气候事件的发生频率在全球范围内增加，其中包括严重的冻雨事件。从总体变化趋势来看，严寒天气的发生频率有所减少，而高温事件的频率则增加。然而，近年来，全球及中国极端低温事件时有发生，冻雨等极端天气的影响仍然不容忽视。以 2008 年为例，中国南方地区经历了一次严重的冻雨灾害，某些区域的灾害强度被评定为百年一遇[1]。

国外对冻雨的研究起步较早，对冻雨形成机制的认知较为一致。主要机制包括经典的融化机制，即高空冰晶在穿越暖层时完全融化，随后经过温度低于 0℃ 的冷层时形成过冷水，最终在物体表面或低空冻结[2]。另外，Huffman 和 Norman [3]提出了过冷暖雨机制，即整层空气温度保持在 0℃ 以下，过冷云滴与雨滴发生碰撞并结合，形成冻雨。Martner 等[4]、Rauber 等[5]、Szeto 等[6]利用遥感技术等方法进行了

系统研究,发现美国冻雨通常发生在冷暖锋相关的降水带内。Rauber 等[7]的研究表明,暖雨过程在约 75% 的冻雨事件中起到重要作用。上述研究表明,冻雨的发生与北极冷空气团、美国东海岸的冷空气及中西部的暖锋关系密切。

为提高冻雨的预报准确性,国外学者除经验预报和数值预报外,还提出了多种预报方法。成功预报冻雨需要评估大气的热力学剖面、局地影响及非线性过程,如潜热和冷却[8]。

国内对冻雨的关注起步较晚,相关研究尚未形成系统,观测资料也相对有限。赵思雄和孙建华[9]指出,中国冻雨的相关环流形势与国外存在差异,国外冻雨研究的结果不能直接应用于我国。漆梁波和张瑛[10]提出了基于温度和厚度的冬季降水相态识别判据,对雨雪和雨夹雪的识别效果较好,但对冻雨的识别效果不佳。贵州省是我国冻雨发生最频繁的省份[11],云南省东北部亦常出现冻雨。云南省,特别是以昆明为中心的滇中地区,已成为我国最大的鲜花生产基地。花卉种植对冻雨等极端天气具有较高的依赖性。近年来,云南东北部的花卉种植面积不断扩大,但关于冻雨的研究仍较为有限,多集中于贵州。研究发现冻雨发生时高空存在强西风,低层有西南急流,同时冷锋过境,温度场分布为底层冷、中层暖、高空冷,并存在逆温层[12]。对于云南东北部冻雨的研究相对较少,多为个例分析。王志云等[13]对 2008 年云南东北部冻雨过程的成因分析发现,冻雨发生时高空存在西偏北气流,但无明显南支槽;对流层中层存在逆温层;底层云南东北部处于准静止锋后,温度低于 0℃。

海温、海冰异常对大气环流异常和区域气候的异常有重要影响。常蕊等[14]发现当北大西洋中纬海温呈现正异常时,有利于贝加尔湖附近出现阻塞高压,从而可能导致寒潮爆发,带来冰冻天气。付建建等[15]研究发现强 La Niña 事件与中国南方气温偏低和降水偏多、蒙古冷高压增强的部分环流形势存在一定的关联。宗海锋等(2008)[16]研究发现北大西洋海温异常偏暖有利于乌拉尔山和贝加尔湖附近地区阻塞高压的形成,导致中国受到东路和西路两股冷空气的影响,使得影响中国南方的寒潮加强。刘少锋等[17]发现 La Niña 发展年有利于亚洲中高纬地区阻塞高压和中国沿海附近副高的增强;北大西洋三极子型的海温异常也会加强乌拉尔山阻塞高压,进而加强东亚冬季寒潮冷空气的向南爆发。王玥彤[18]对中国西南地区冻雨进行的整体研究发现,与冻雨的发生相关的因子主要有海温和局地地形等。此外,北极海冰年代际转型与冻雨发生的次数的变化存在对应,且不同年代影响关键海区有所不同[19]。云南东北部地区冻雨的环流场特征是否与其他地区一致,冻雨的影响因素及关键影响区是否相同,是值得进一步探讨和研究的问题。

2. 数据和方法

使用 1991~2020 年近 30 年云南东部冻雨(雨凇、雾凇)和电线结冰观测日值数据,范围包括昭通和曲靖的 19 个台站数据,以站点是否发生雨凇或雾凇作为判断冻雨是否发生的标准。本文插图所涉及的国界和行政区域界线基于审图号为 GS 京(2022)1061 号标准地图制作,底图无修改。

统计每年每月总的冻雨发生天数作为冻雨发生的频次,分析云南东北部冻雨发生的多时间尺度变化规律和空间分布特征,选取典型冻雨个例进行过程分析。根据云南东北部冬季冻雨发生次数距平时间序列选取 5 个发生的年次数大于 0.85 倍标准差($+0.85\sigma$)的年份,作为冻雨发生次数偏多的年份,分别是 1993 年、1996 年、2008 年、2011 年和 2012 年;同样的选出 5 个冻雨发生的年次数小于 0.85 倍标准差(-0.85σ)的年份,作为冻雨发生次数偏少的年份,分别是 2016 年、2017 年、2019 年、2020 年和 2021 年(这里的年份指的是前一年 12 月至当年 2 月之间的冬季)。分别将冻雨发生次数异常偏多和偏少年份与当年位势高度场、温度场、风场等进行合成,对云南东北部地区冻雨发生次数偏多和偏少年份的大气环流进行分析。冻雨的发生情况在 2014/2015 年发生突变,将 1991 年~2014 年作为冻雨发生偏多的时段,2015 年~2021 年作为冻雨发生偏少的时段,分别研究不同时段的冻雨发生情况与海温和海冰的不同关系。

通过相关分析等方法探寻云南东北部冻雨天气的影响因子，利用海温等因子对云南冻雨的影响进行剖析，讨论影响因子与云南东北部地区冻雨产生可能存在的机制。通过逐步回归的方法选取关键的影响因子，建立预报模型，对冻雨的发生进行预报。

3. 云南东北部冻雨发生规律分析

3.1. 冻雨的空间分布特征

贵州省是我国冻雨发生最频繁的地区，曲靖市和昭通市位于云南东北部(图 1)，与贵州省接壤，也经常发生冻雨。从图 2 中可以看出，在 19 个观测站点中，镇雄的冻雨发生次数最多超过 10 次，其次为昭通、鲁甸、宣威和威信，发生次数为 3~4 次，曲靖市的高海拔位置使得其冻雨发生次数较多。

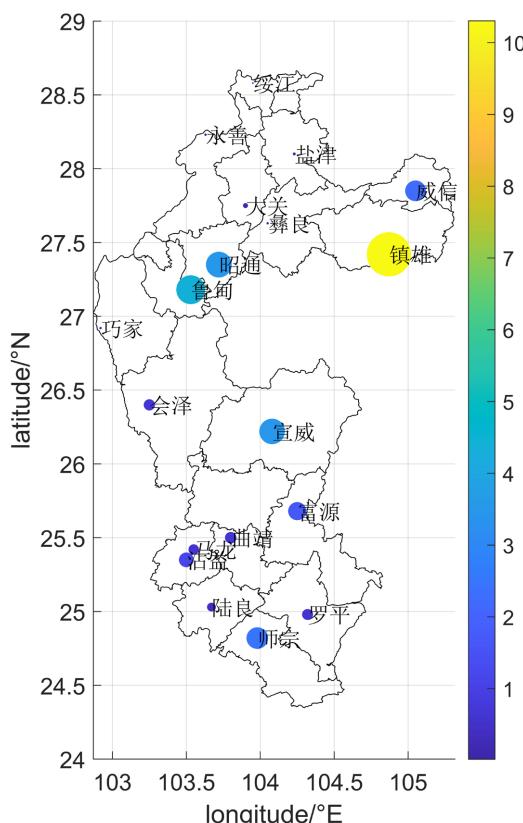


Figure 1. Total number of ZR occurrence at each station in northeast Yunnan (Qujing and Zhaotong) from 1961 to 2021

图 1. 1961~2021 年云南东北部(曲靖和昭通)各站点冻雨发生总次数

3.2. 冻雨的时间变化特征

从冻雨发生次数的季节分布图(图 2(a))可见，云南东北部冻雨主要发生在每年的 11 月至次年 4 月，其中 12 月至 2 月的冻雨发生频率最高，占总天数的 94%；3 月、4 月和 11 月的冻雨发生次数较少，占总天数的 6%；5 月至 10 月则无冻雨发生。冻雨发生次数的年际变化图(图 2(b))显示，冬季(12 月~2 月)与全年(12 月~4 月)的年际变化特征一致，冻雨发生次数在极少数年份有显著差异。冬季冻雨发生次数与全年冻雨发生次数的相关系数为 0.979，经过显著性水平为 0.05 的检验。因此，后文将冬季(12 月至次年 2 月)的冻雨发生次数作为云南冻雨次数的年际变化代表，以进一步分析云南东北部的冻雨。

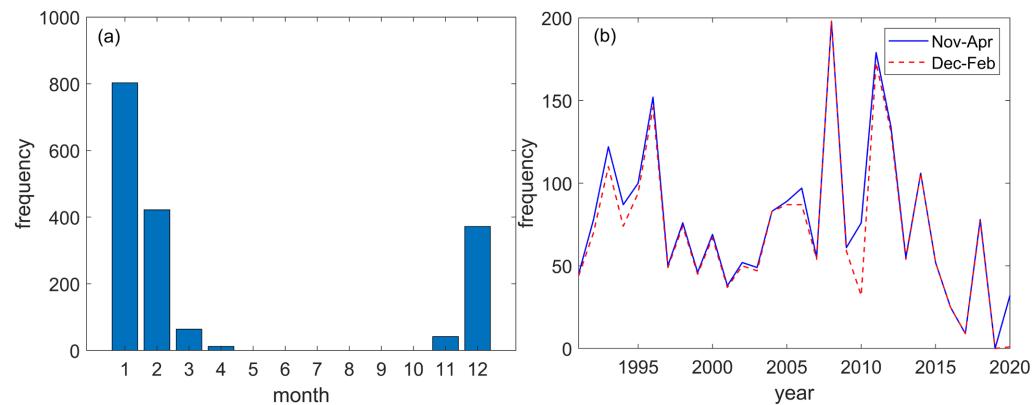
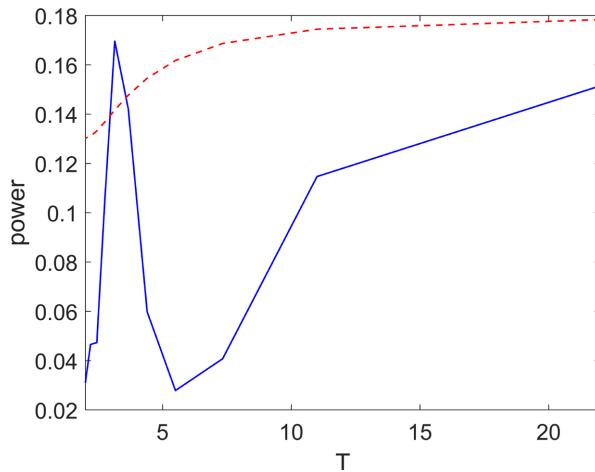


Figure 2. Monthly distribution (a) and interannual variation of ZR frequency (b) (The red line: Frequency of ZR from December to February, the blue line: Frequency of ZR from November to April)

图 2. 冻雨发生次数的月分布(a)及年际变化(b)(红线: 12月~2月冻雨发生次数, 蓝线: 11月~4月冻雨发生次数)

对冬季冻雨发生次数进行连续功率谱分析(图 3)显示, 其主要年际变化周期约为 3.1 年, 存在准 3 年的年际振荡。图 4 展示了云南东北部冬季冻雨发生次数距平时间序列。通过一元线性回归趋势分析可知, 从 1991 年到 2020 年, 冻雨发生次数逐年减少。冻雨发生次数 11 年滑动平均显示, 1991 年至 2004 年距平值接近于零; 2005 年至 2013 年距平值大于零; 2014 年至 2021 年距平值小于零。整体变化趋势表明, 2004 年至 2014 年期间全球变暖趋于停滞, 而北极增暖的影响逐渐增强。2014 年后, 全球气温再次加速上升, 全球变暖停滞阶段结束。



(The red dotted line: Red noise test, the solid blue line: Continuous power spectrum)
(红色虚线: 红噪声检验, 蓝色实线: 连续功率谱)

Figure 3. Continuous power spectrum of ZR frequency (December~February)

图 3. 冻雨发生次数(12月~2月)的连续功率谱

冻雨发生次数距平时间序列显示, 冻雨发生最频繁的时间段为 2004 年至 2014 年, 其次为 1991 年至 2003 年, 而 2014 年至 2021 年冻雨发生次数明显减少。冻雨发生次数异常偏多的年份主要集中在 2015 年之前, 如 1996 年、2008 年、2011 年和 2012 年, 其中 2008 年冻雨发生次数最多, 2011 年次之。这两年是研究时间序列中云南东北部冻雨发生次数最多的年份。而 2015 年之后, 冻雨发生次数基本呈现负异常。这与前人的研究结果(谷富等, 2018) [20]一致。整体温度升高、降水减少是导致冻雨发生次数减少的原因。

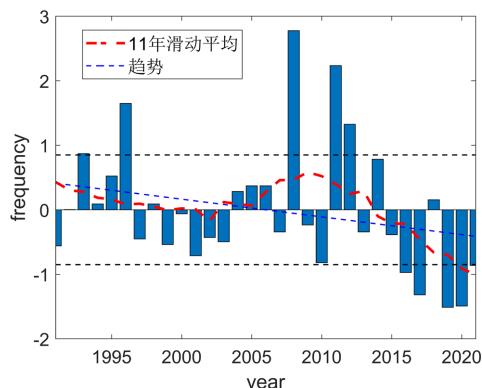


Figure 4. Time series of anomalies of ZR frequency in Eastern Yunnan winter (December~February) (The blue dotted line: Linear regression trend, the red dotted line: Moving average, the black dotted lines: Plus or minus 0.85 standard deviation)

图 4. 云南东北部冬季(12月~2月)冻雨发生次数距平时间序列(蓝色虚线:一元线性回归趋势, 红色虚线: 滑动平均, 黑色虚线: 正负 0.85 倍标准差)

冻雨发生次数的突变检验(图 5)发现, 2015 年左右存在气候突变。结合冻雨发生次数距平时间序列, 1991~2014 年为冻雨发生次数偏多的时期, 而 2015~2021 年则为冻雨发生次数偏少的时期。

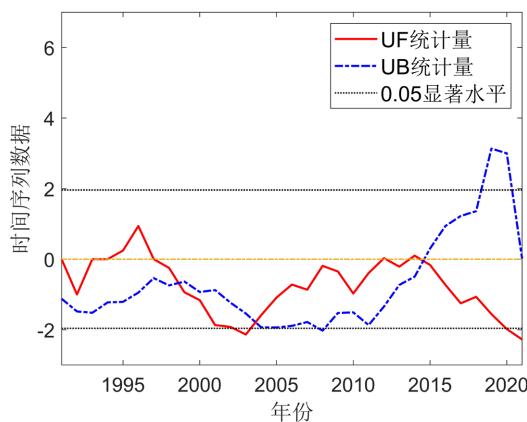
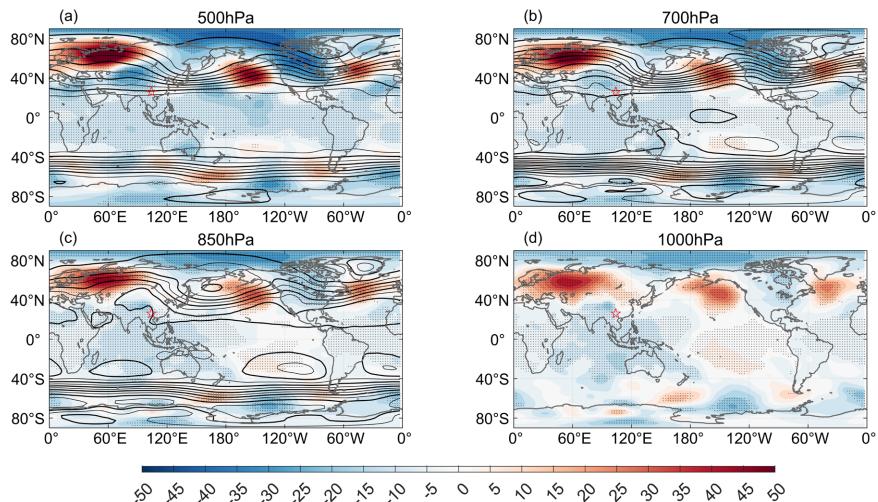


Figure 5. Mann-Kendall test of the annual frequency of ZR (December~February)
图 5. 冻雨年发生次数(12月~2月)的 Mann-Kendall 检验

3.3. 云南东北部地区冻雨偏多偏少年大气环流异常

根据云南东北部冬季冻雨发生次数距平时间序列(图 4), 选取了 5 个冻雨发生次数偏多的年份, 分别是 1993 年、1996 年、2008 年、2011 年和 2012 年; 同样选取了 5 个冻雨发生次数偏少的年份, 分别是 2016 年、2017 年、2019 年、2020 年和 2021 年。从 500 hPa 的位势高度距平场(图 6(a))来看, 冻雨偏多的年份主要受到欧亚上游北欧乌拉尔山附近阻塞高压和南侧切断低压系统的影响。这种偶极子型的阻塞高压维持时间较长且强度较大, 有利于我国冬季寒潮冷空气的爆发, 导致大范围冻雨天气。云南东北部各层位势高度呈现负距平, 存在气旋式异常, 有利于发生对流, 从而导致冻雨的发生。北极地区位势高度也呈现负距平, 北极涡旋强度偏强, 为寒潮的爆发提供了大量冷空气。从高空到地面的环流形势异常基本一致, 呈上下一致的正压结构, 北半球呈典型的纬圈三波结构特点, 但不同于冬季平均三大槽脊的分布特点, 北欧乌拉尔山附近的异常高压脊最为强大, 热带副热带地区位势高度异常偏低, 加强了亚欧大陆位势高度、西北高东南低的南北气压梯度, 有利于冷空气输送。

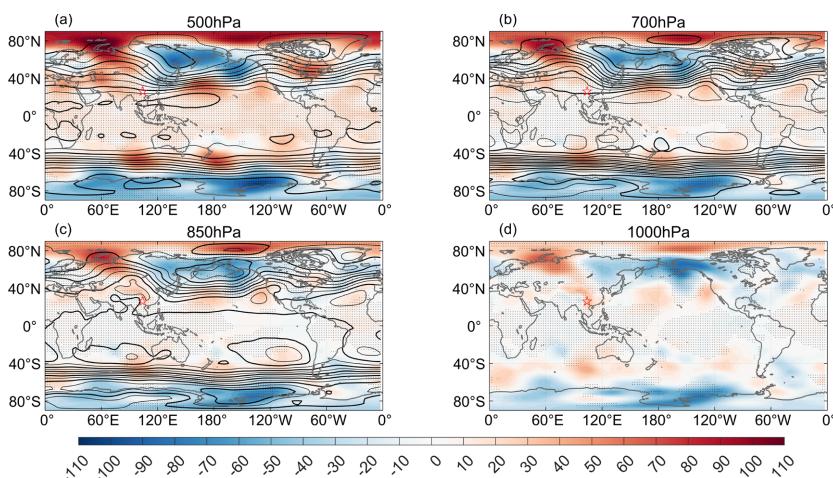


((a): 500 hPa, (b): 700 hPa, (c): 850 hPa, (d): 1000 hPa, the dot area: Passed the significance test of 0.05, the solid line: Climatic mean height field, the star: The study area)

((a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, (d) 1000 hPa, 打点区域: 通过 0.05 的显著性检验, 实线: 气候平均位势高度场, 星号: 研究区域)

Figure 6. Geopotential height anomaly of the years of more ZR in winter (December~February)
图 6. 冻雨发生频次偏多年冬季(12 月~2 月)位势高度异常

冻雨偏少的年份(图 7(a)), 与偏多年份相比, 异常高压的位置偏北, 阻塞低压的位置偏东, 寒潮天气主要影响我国东北、华北以及日本, 对西南地区影响较小。西南地区整体的位势高度呈正距平, 存在反气旋异常, 不利于对流的发生。北极地区位势高度呈现正距平, 北极涡旋强度偏弱, 未能为强寒潮提供足够的冷空气。高空至地面的环流形势异常表现为正压结构特征, 中高纬度呈纬向 1~2 波的行星波分布, 热带副热带地区整体位势高度异常升高, 亚欧大陆位势高度呈现“低 - 高 - 低”的特点, 西南地区位势高度异常偏高, 冷空气的影响区域偏东北, 不利于冷空气输送。

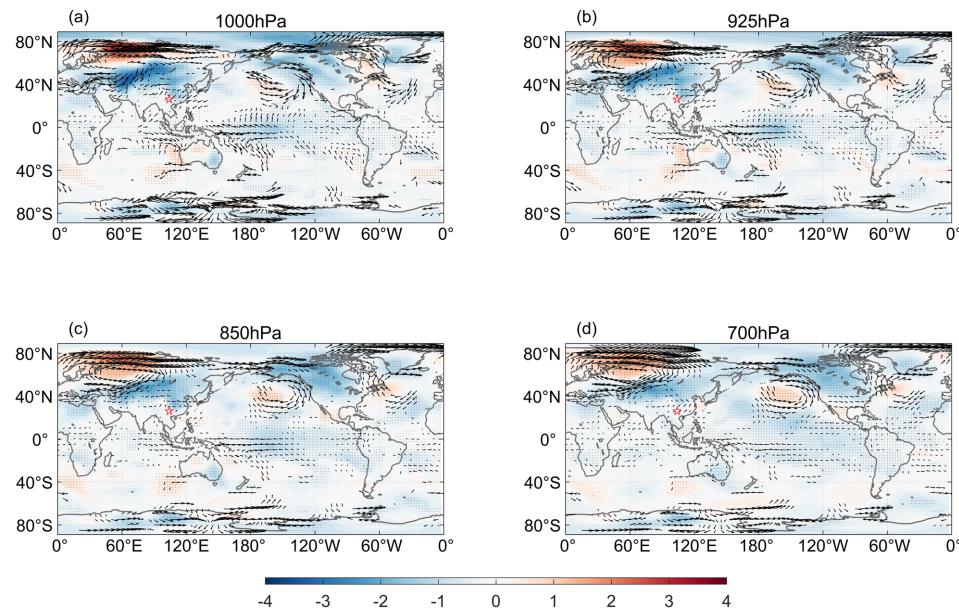


((a): 500 hPa, (b): 700 hPa, (c): 850 hPa, (d): 1000 hPa, the dot area: Passed the significance test of 0.05, the solid line: Climatic mean height field, the star: The study area)

((a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, (d) 1000 hPa, 打点区域: 通过 0.05 的显著性检验, 实线: 气候平均位势高度场, 星号: 研究区域)

Figure 7. Geopotential height anomaly of the years of less ZR in winter (December~February)
图 7. 冻雨发生频次偏少年冬季(12 月~2 月)位势高度异常

冻雨发生次数偏多的年份(图 8), 欧亚地区大范围呈温度负距平, 表明冷空气大规模南下, 云南东北部地区低层温度偏低。风场异常显示, 欧洲东部存在强的反气旋式环流, 有利于冷空气从极地向西伯利亚移动, 并在寒潮关键区堆积。



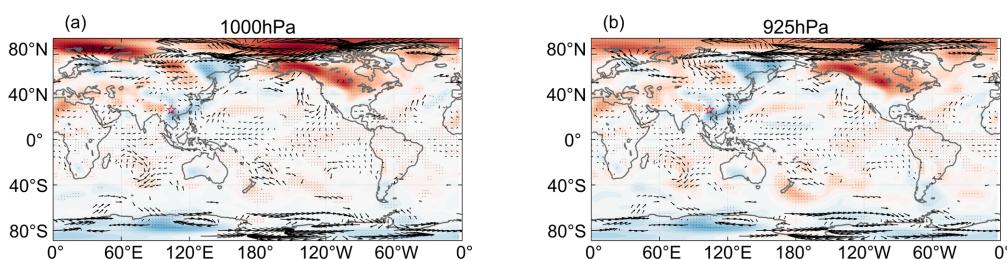
((a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, (d) 1000 hPa, the dot area: Passed the significance test of 0.05, the star: The study area)

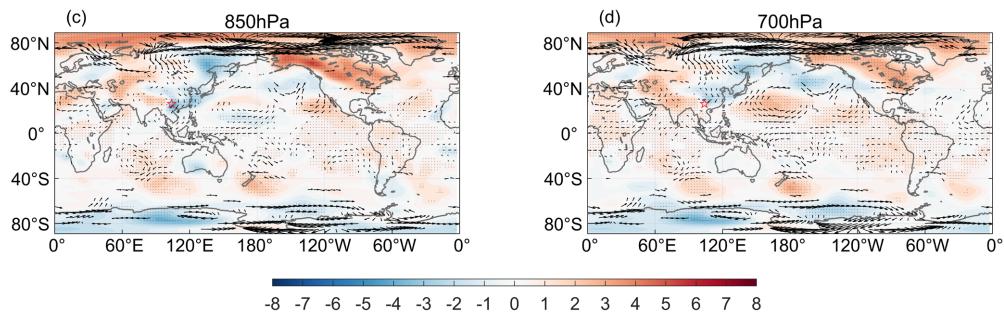
((a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, (d) 1000 hPa, 打点区域: 通过 0.05 的显著性检验, 星号: 研究区域)

Figure 8. The temperature anomaly of the years of more ZR in winter (December~February)
图 8. 冻雨发生频次偏多年冬季(12月~2月)温度异常

冻雨发生次数异常偏少的年份(图 9), 温度场的异常分布相比于偏多年份, 欧亚大陆大范围为正距平, 仅亚洲东部存在小范围负距平, 云南东北部地区负距平较弱, 温度偏高。乌拉尔山附近到欧洲地区的低层存在负距平, 但高层负距平减弱, 西西伯利亚附近负距平转为正距平。这种温度场配置不利于冷空气从极地向云南东北部地区输送, 无法造成持续的冻雨天气。

前人研究指出, 逆温层的存在有利于冻雨的产生。强度强、范围广泛的寒潮会引发云南东北部冻雨的发生, 这与前文冻雨发生次数异常偏多与偏少的分析结果相一致。当位势高度场和温度场的配置有利于寒潮发生时, 如欧亚上游北欧乌拉尔山附近存在异常高压, 云南东北部地区的位势高度呈负异常, 欧亚大范围异常偏冷, 并且冷空气能够到达云南东北部区域时, 冻雨发生次数会增加; 反之, 则冻雨发生次数减少。





((a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, (d) 1000 hPa, the dot area: Passed the significance test of 0.05, the star: The study area)

((a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, (d) 1000 hPa, 打点区域: 通过 0.05 的显著性检验, 星号: 研究区域)

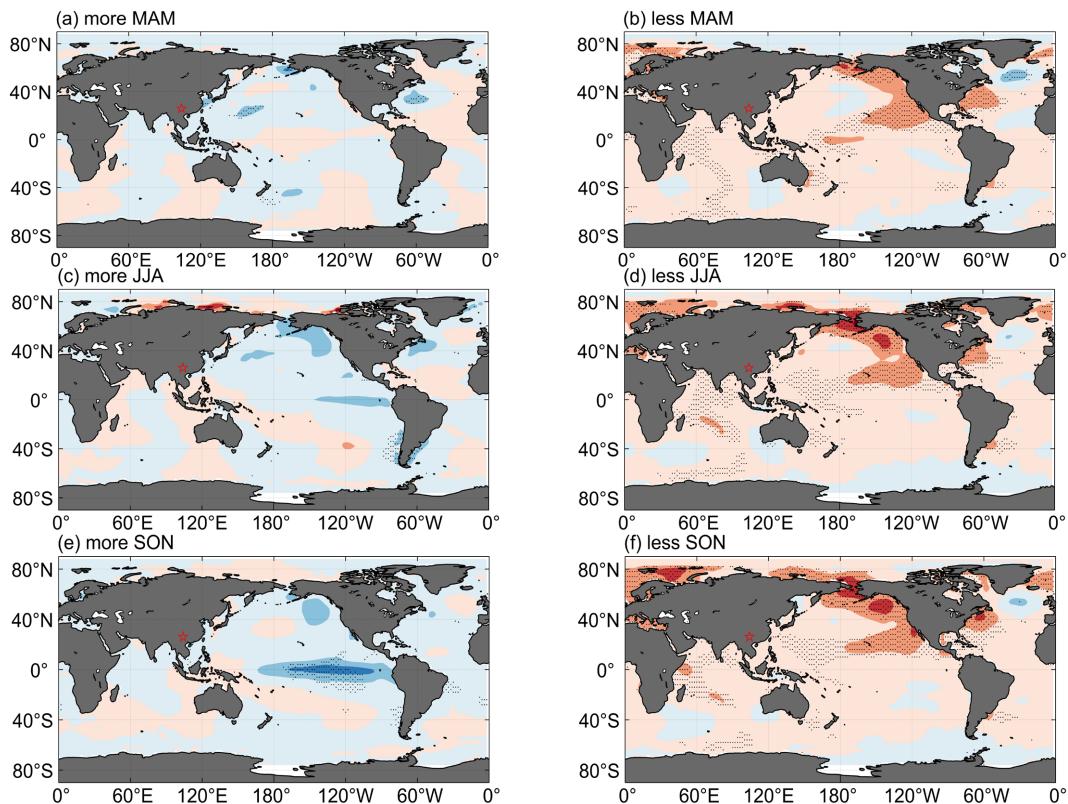
Figure 9. The temperature anomaly of the years of less ZR in winter (December~February)

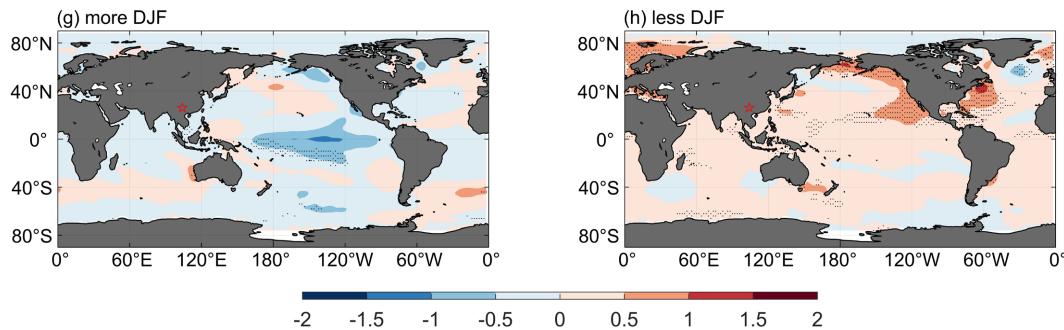
图9. 冻雨发生频次偏少年冬季(12月~2月)温度异常

4. 云南东北部冻雨影响因子分析

4.1. 海温和海冰距平异常分布

在冻雨发生次数偏多的年份(图 10), 海温大范围呈负距平, 主要的异常海区为赤道中东太平洋。该区域表现为 La Niña 型异常, 并且秋季及冬季异常显著。而在冻雨发生次数偏少的年份, 海温大范围呈正异常, 春季、夏季、秋季及冬季均存在明显的正异常。主要异常海区包括北大西洋和东北太平洋沿岸, 北大西洋海区海温距平从低纬到高纬呈现“正-负-正”模态, 东北太平洋沿岸的海温则表现为正距平, 这与前人研究相一致, 此种海温模态有利于阻塞高压发展。



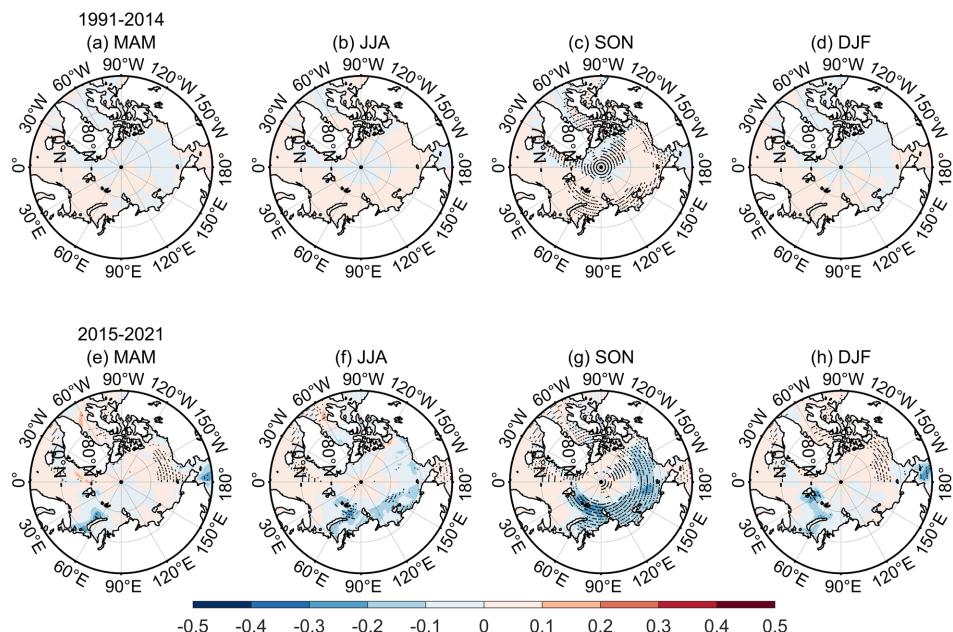


((a) and (b): March to May of the year of more and less ZR, (c) and (d): June of August of the year of more and less ZR, (e) and (f): September to November of the year of more and less ZR, (g) and (h): December to February of the year of more and less ZR, the dot area: Passed the significance test of 0.05, the star: The study area)
((a)(b): 偏多和偏少年 3 月~5 月, (c)(d): 偏多和偏少年 6 月~8 月, (e)(f): 偏多和偏少年 9 月~11 月, (g)(h): 偏多和偏少年 12 月~次年 2 月, 打点区域: 通过 0.05 的显著性检验, 星号: 研究区域)

Figure 10. The sea surface temperature anomaly of the years of more and less ZR

图 10. 冻雨发生频次偏多和偏少年海表面异常

图 11 是冻雨发生偏多和偏少时期的北极海冰密集度距平。在冻雨发生偏多的时期(1991 年~2014 年), 海冰异常不显著, 仅在前一年秋季, 从喀拉海到西伯利亚区域存在海冰正异常, 格陵兰岛附近存在负异常。在冻雨发生偏少的时期(2015 年~2021 年), 前一年春季、夏季、秋季以及当年冬季均表现出海冰异常, 从喀拉海到波弗特海存在海冰负异常, 格陵兰岛附近则存在海冰正异常。



((a): March to May from 1991 to 2014, (b): June of August from 1991 to 2014, (c): September to November from 1991 to 2014, (d): December to February from 1991 to 2014, (e): March to May from 2015 to 2021, (f): June of August from 2015 to 2021, (g): September to November from 2015 to 2021, (h): December to February from 2015 to 2021, the dot area: passed the significance test of 0.05)
((a): 1991~2014 年的 3~5 月, (b): 1991~2014 年的 6~8 月, (c): 1991~2014 年的 9~11 月, (d): 1991~2014 年的 12~2 月, (e): 2015~2021 年的 3~5 月, (f): 2015~2021 年的 6~8 月, (g): 2015~2021 年的 9~11 月, (h): 2015~2021 年 12~2 月, 打点区域: 通过 0.05 显著性检验)

Figure 11. The Arctic sea ice intensity anomaly of 1991 to 2014 and 2015 to 2021

图 11. 1991~2014 年和 2015~2021 年北极海冰密集度异常

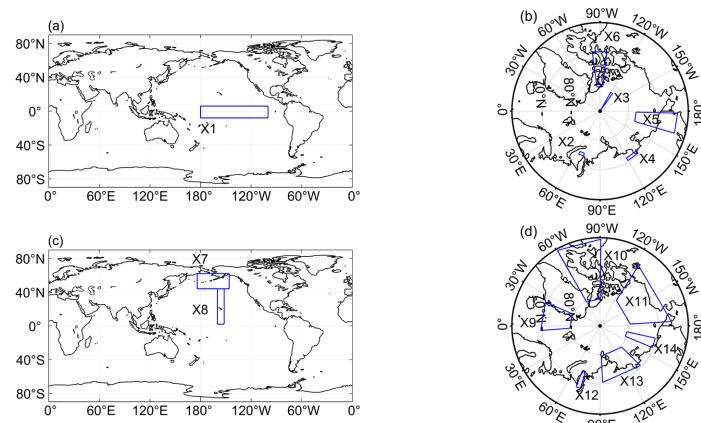
4.2. 冻雨发生次数预报模型

对于降水偏多的年份(图 12(a) (b))选取前一年秋季关键区的赤道中东太平洋海温距平和喀拉海、北极中央、东西伯利亚海的海冰距平作为预报因子(表 1)，使用逐步回归方法进行因子筛选，最终确定赤道中东太平洋海温距平为有效预报因子。利用一元线性回归方法对 1991~2014 年标准化的云南东北部冬季冻雨发生次数 y 进行预报，得到预报方程为： $y_1 = -0.575x_1 + 0.2327$ 。

对于降水偏少的年份(图 12(c) (d))选取前一年秋季关键区的西北太平洋和太平洋中部的海温距平和喀拉海、东西伯利亚海、拉普捷夫海、格陵兰海、巴芬湾、波弗特海的海冰距平作为预报因子(表 1)，使用逐步回归方法筛选出西北太平洋海温距平和巴芬湾海冰距平作为有效预报因子。采用二元线性回归方法对 2015~2021 年标准化的云南东北部冬季冻雨发生次数进行预报，得到预报方程为： $y_2 = 0.1576 - 1.2987x_7 + 2.4777x_{10}$ 。

Table 1. Distribution of key forecast areas of the years of more and less ZR during 1991~2014 and 2015~2021
表 1. 1991~2014 年和 2015~2021 年冻雨发生偏多和偏少年的预报关键区分布

| 年份 | 关键区 | 经度 | 纬度 |
|-----------|-----------------|-----------------|---------------|
| 1991~2014 | 赤道中东太平洋 x_1 | 180°~100°W | 6N~8S |
| | 喀拉海 x_2 | 63.5°E~69.5°E | 74.5°N~73.5°N |
| | 北极中央 x_3 | 125.5°W~119.5°W | 82.5°N~90°N |
| | 东西伯利亚海 x_4 | 120°E~133°E | 70°N~72°N |
| | 楚科奇海 x_5 | 163.5°E~178.5°E | 63.5°N~77.5°N |
| | 巴芬湾 x_6 | 166°W~180°W | 72°N~48°N |
| 2015~2021 | 西北太平洋 x_7 | 91.5°W~72.5°W | 67.5°N~76.5°N |
| | 太平洋中部 x_8 | 160°W~152°W | 2°N~44°N |
| | 格陵兰海 x_9 | 23.5°W~4.5°E | 69.5°N~79.5°N |
| | 巴芬湾 x_{10} | 90.5°W~60.5°W | 60.5°N~80.5°N |
| | 波弗特海 x_{11} | 176.5°W~122.5°W | 65.5°N~79.5°N |
| | 喀拉海 x_{12} | 68.5°E~72.5°E | 67.5°N~73.5°N |
| | 拉普捷夫海 x_{13} | 92.5°E~135.5°E | 70.5°N~79.5°N |
| | 东西伯利亚海 x_{14} | 157.5°E~167.5°E | 70.5°N~80.5°N |



((a): Key forecast areas of sea surface temperature of the years of more ZR, (b): Key forecast areas of sea ice intensity of the years of more ZR, (c): Key forecast areas of sea surface temperature of the years of less ZR, (d): Key forecast areas of sea ice intensity of the years of less ZR) ((a): 偏多年海温预报关键区, (b): 偏多年海冰密集度预报关键区, (c): 偏少年海温预报关键区, (d): 偏少年海冰密集度预报关键区)

Figure 12. Distribution of key forecast areas (blue box) of sea surface temperature and sea ice intensity of the years of more and less ZR

图 12. 冻雨发生偏多和偏少年的海温和海冰密集度预报关键区(蓝框)分布

冻雨发生偏多的年份的预报值 y_1 与实际冻雨发生次数的标准化距平的相关系数为 0.4740，冻雨发生偏少的年份的预报值 y_2 与实际冻雨发生次数的标准化距平的相关系数为 0.9225。模型对于降水偏少年模拟较好，但对降水偏多年模拟效果较差，未能有效模拟极值。

5. 结论与讨论

本文依据 1991~2021 年云南东北部冻雨相关观测日值数据，分析了云南东北部冻雨天气的发生规律和影响因子。研究结论如下：

云南东北部冻雨主要发生在 12 月至 1 月，呈现约 3.1 年的变化周期。从 1991 年到 2021 年，冻雨发生次数总体呈现减弱趋势，近年冻雨发生次数较少。冻雨发生次数在 2014/2015 年出现显著突变，1991 年~2014 年冻雨发生次数偏多，而 2015 年~2021 年冻雨发生次数偏少。

对冻雨发生偏多和偏少年份的大气环流进行合成分析发现，在偏多年欧亚上游乌拉尔山附近阻塞高压及其南侧的切断低压系统强度偏强，整个北极地区和西南地区的位势高度呈负距平，亚欧大陆位势高度呈现西北高东南低的特征，有利于冷空气从北极向云南东北部输送；在偏少年阻塞低压的位置偏东，位势高度异常分布与偏多年份相反。对偏多和偏少年的各层温度场和风场进行合成分析发现，偏多年欧亚地区大范围呈现负距平，且云南东北部低层温度偏低。从风场来看，欧洲东部的强反气旋式环流有利于冷空气从极地向西伯利亚移动，在寒潮关键区积累；偏少年温度场的异常分布与冻雨偏多时相反。

通过研究海温和海冰对冻雨发生次数的影响，发现冻雨发生时赤道中东太平洋区域存在 La Niña 型的海温异常，北大西洋海区存在三极子型的海温异常，这与乌拉尔山附近阻塞高压的加强有关，进而影响云南东北部地区的冻雨发生。1991~2014 年冻雨发生次数与赤道中东太平洋海温关系较为显著，2015~2021 年冻雨发生次数则与西北太平洋海温及巴芬湾的海冰关系更加密切。建立的冻雨预报模型对 2015~2021 年冻雨发生次数的模拟效果较好，但对 1991~2014 年的模拟效果较差。未来的研究应进一步探讨 1991~2014 年冻雨发生次数的预报因子，并对环流与云南东北部冻雨发生的关系进行深入分析。

基金项目

国家自然科学基金(42075024)；国家重点研发计划(2019YFA0607004)；山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2019ZD12)。

参考文献

- [1] 王遵娅, 张强, 陈峪, 赵珊瑚, 曾红玲, 张勇, 刘秋锋. 2008 年初我国低温雨雪冰冻灾害的气候特征[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(2): 63-67.
- [2] Forbes, G.S., Thomson, D.W. and Anthes, R.A. (1987) Synoptic and Mesoscale Aspects of an Appalachian Ice Storm Associated with Cold-Air Damming. *Monthly Weather Review*, **115**, 564-591.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<0564:samaoa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<0564:samaoa>2.0.co;2)
- [3] Huffman, G.J. and Norman, G.A. (1988) The Supercooled Warm Rain Process and the Specification of Freezing Precipitation. *Monthly Weather Review*, **116**, 2172-2182.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116<2172:tswrpa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<2172:tswrpa>2.0.co;2)
- [4] Martner, B.E., Snider, J.B., Zamora, R.J., Byrd, G.P., Nizioli, T.A. and Joe, P.I. (1993) A Remote-Sensing View of a Freezing-Rain Storm. *Monthly Weather Review*, **121**, 2562-2577.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<2562:arsvoa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<2562:arsvoa>2.0.co;2)
- [5] Rauber, R.M., Ramamurthy, M.K. and Tokay, A. (1994) Synoptic and Mesoscale Structure of a Severe Freezing Rain Event: The St. Valentine's Day Ice Storm. *Weather and Forecasting*, **9**, 183-208.
[https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1994\)009<0183:samsoa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1994)009<0183:samsoa>2.0.co;2)
- [6] Szeto, K.K., Tremblay, A., Guan, H., Hudak, D.R., Stewart, R.E. and Cao, Z. (1999) The Mesoscale Dynamics of Freezing Rain Storms over Eastern Canada. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **56**, 1261-1281.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<1261:tmdofr>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<1261:tmdofr>2.0.co;2)

-
- [7] Rauber, R.M., Olthoff, L.S., Ramamurthy, M.K. and Kunkel, K.E. (2000) The Relative Importance of Warm Rain and Melting Processes in Freezing Precipitation Events. *Journal of Applied Meteorology*, **39**, 1185-1195.
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039<1185:triowr>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<1185:triowr>2.0.co;2)
 - [8] Degelia, S.K., Christian, J.I., Basara, J.B., Mitchell, T.J., Gardner, D.F., Jackson, S.E., et al. (2015) An Overview of Ice Storms and Their Impact in the United States. *International Journal of Climatology*, **36**, 2811-2822.
<https://doi.org/10.1002/joc.4525>
 - [9] 孙建华, 赵思雄. 2008 年初南方雨雪冰冻灾害天气的大气层结和地面特征的数值模拟[J]. 气候与环境研究, 2008b, 13(4): 368-384.
 - [10] 漆梁波, 张瑛. 中国东部地区冬季降水相态的识别判据研究[J]. 气象, 2012, 38(1): 96-102.
 - [11] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 唐东升. 天气学原理与方法[M]. 北京: 气象出版社, 1992: 442-450.
 - [12] 周秀美, 兰兰, 黄进云, 白波. 红河州 2008 年两次冻雨天气特征分析[J]. 云南地理环境研究, 2008, 20(z1): 81-83+88.
 - [13] 王志云, 鲁亚斌, 牛法宝. 云南东北部冻雨的成因分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2008, 30(S2): 324-328.
 - [14] 常蕊, 张庆云, 彭京备. 中国南方多雪年环流特征及对关键区海温的响应[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 468-477.
 - [15] 付建建, 李双林, 王彦明. 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, 2008, 13(4): 478-490.
 - [16] 宗海锋, 张庆云, 布和朝鲁, 纪立人, 陈烈庭. 黑潮和北大西洋海温异常在 2008 年 1 月我国南方雪灾中的可能作用的数值模拟[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 491-499.
 - [17] 刘少锋, 陈红, 林朝晖. 海温异常对 2008 年 1 月中国气候异常影响的数值模拟[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 500-509.
 - [18] 王玥彤. 中国西南地区冻雨的气候异常特征及其影响因子[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
 - [19] 牛璐, 黄菲, 周晓. 北极海冰的年代际转型与中国冻雨年代际变化的关系[J]. 海洋学报, 2015, 37(11): 105-117.
 - [20] 谷富, 勾晓华, 邓洋, 苏佳佳, 林伟, 于爱灵. 云贵高原地区 1960-2014 年气温时空变化特征分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, 54(6): 721-730.