

海南岛近300年低温灾害的时空演变特征及其气候背景分析

徐静颖¹, 吴 晶², 邢益航¹, 杨德石¹, 焦 悦¹, 尚 明³, 白 磊^{1,4*}

¹海南大学生态学院, 海南 海口

²兰州中心气象台, 甘肃 兰州

³河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

⁴海南智慧低空气象大数据研究中心, 海南 海口

收稿日期: 2025年7月26日; 录用日期: 2025年8月25日; 发布日期: 2025年9月2日

摘 要

本研究基于系统整理的历史文献资料, 重建了1507~2000年海南岛低温灾害时间序列, 并结合ENSO指数与多源再分析数据, 从演变趋势、气候背景与空间响应三个层面开展分析。结果表明, 该区域低温灾害具有显著的阶段性与区域性, 1644~1911年与1949~2000年为两个高发期, 累计49起灾害, 占总数的68%。灾害主要集中在1月, 1949年后向12月与2月扩展, 形成1月和2月双爆发期。北部为长期低温灾害发生高频区, 现代以来西部与中部灾害次数分别增至12起与13起。灾害多发生于ENSO冷相位, 1940年后灾害发生更为集中。再分析数据对灾害响应存在差异, 20CRv3与ERA-20C可较好反映低温灾害的冷距平特征, 相关系数分别为-0.36与-0.40, ERA-20CM响应偏弱。典型灾害年距平图显示, 灾害等级越高, 气温异常幅度越大, 冷中心区域由北部丘陵向中部及南部扩展, 气温距平在-2℃至-7℃不等, 白沙为降温最显著、冷中心最集中的区域。整体呈现出局部集中逐渐发展为覆盖范围更大的空间格局, 反映出海南岛对极端低温事件的响应与空间异质性。

关键词

历史低温灾害, 灾害叙事文本, 文献重建, ENSO指数, 再分析数据

Spatiotemporal Evolution of Cold Weather Disasters in Hainan Island over the Past 300 Years and Their Climatic Background

Jingying Xu¹, Jing Wu², Yihang Xing¹, Deshi Yang¹, Yue Jiao¹, Ming Shang³, Lei Bai^{1,4*}

¹School of Ecology, Hainan University, Haikou Hainan

*通讯作者。

文章引用: 徐静颖, 吴晶, 邢益航, 杨德石, 焦悦, 尚明, 白磊. 海南岛近 300 年低温灾害的时空演变特征及其气候背景分析[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(5): 877-891. DOI: 10.12677/ccrl.2025.145088

²Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou Gansu³School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei⁴Hainan Intelligent Low-Altitude Meteorological Big Data Research Centre, Haikou HainanReceived: Jul. 26th, 2025; accepted: Aug. 25th, 2025; published: Sep. 2nd, 2025

Abstract

Based on systematically collated historical literature, this study reconstructed the time series of low temperature disasters in Hainan Island from 1507 to 2000, and combined with the ENSO index and multi-source reanalysis data, analyzed from three levels: evolution trend, climate background and spatial response. The results show that low temperature disasters in the region are significantly staged and regional. 1644~1911 and 1949~2000 are two high-incidence periods, with a total of 49 disasters, accounting for 68% of the total. Disasters are mainly concentrated in January, and after 1949, they extend to December and February, forming a double outbreak period in January and February. The north is a high-frequency area for long-term low temperature disasters. Since modern times, the number of disasters in the west and central regions has increased to 12 and 13 respectively. Disasters mostly occur in the cold phase of ENSO, and disasters are more concentrated after 1940. There are differences in the response of reanalysis data to disasters. 20CRv3 and ERA-20C can better reflect the cold anomaly characteristics of low temperature disasters, with correlation coefficients of -0.36 and -0.40 , respectively, and ERA-20CM has a weak response. The anomaly map of typical disaster years shows that the higher the disaster level, the greater the temperature anomaly. The cold center area extends from the northern hills to the central and southern parts, and the temperature anomaly ranges from -2°C to -7°C . Baisha is the area with the most significant cooling and the most concentrated cold center. The overall pattern shows that the local concentration gradually develops into a larger coverage spatial pattern, reflecting the response and spatial heterogeneity of Hainan Island to extreme low temperature events.

Keywords

Historical Cold Disasters, Disaster Narrative Texts, Documentary Reconstruction, ENSO Index, Reanalysis Data

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

低温灾害是中低纬度地区常见极端气候事件之一。近年来,中国平均气温呈显著升高趋势[1],但区域低温灾害的时空格局也开始发生变化[2][3]。海南岛地处热带,气候系统具有复杂的时空演变特征[4]。在冬季,北方冷空气入侵,造成低温灾害,对热带农业和社会生产产生了严重影响[3][5]。一般海南岛极端低温事件主要发生在12~2月,低温灾害持续时间和低温灾害强度均呈现上升趋势[6]。但由于现有器测资料时间序列过短,较难评估低温事件长时序的趋势变化。利用文献资料研究长时间序列气候,是对现有器测定量研究的补充[7][8]。

针对低温灾害,国内外已有大量系统性研究。在1961~2012年间,中国东部极端低温事件增加与西伯利亚高压增强相关[9]。2008年1月,长江中下游遭受罕见低温灾害,可能与欧亚环流异常有关[10],

在北极气温变化与海冰消融过程,显著影响东亚范围内冷空气强度和运动轨迹[11] [12]。近 50 年,海南岛气温呈现显著上升趋势[13],低温极端事件数量呈现减少趋势,高温极端事件数量呈现增加趋势[14]。尤其在海南岛中部山地,由于“冷湖”效应,更易形成低温灾害[3] [15]。在海南的低温灾害常与全国大范围的低温灾害相关[16] [17]。根据 1960 年以来的观测数据,ENSO 指数表现出显著增强趋势,全球强厄尔尼诺事件数量显著增多[18]。在中国,不同区域的冬季气温与 ENSO 有着显著相关性[19]。同时,基于长时序气候数据的研究表明,在“小冰期”时期,中国的气候异常与寒潮、梅雨和极端降水有显著联系[7] [20]。综上所述,关于热带海岛地区的低温灾害研究存在明显不足,一方面是现有研究的分析时间更多在 1950~2010 年的器测资料阶段,缺乏长时间序列的趋势和时空格局分析,另一方面是分析维度仅限于器测资料的定量化分析,缺乏多源数据多维度分析。

为此,本研究利用 1507~2000 年海南岛历史文献材料中低温灾害相关记载、长时间序列再分析数据和 ENSO 指数数据,系统分析了低温灾害的时空演变特征,多尺度的变化趋势。研究将丰富热带海岛地区极端气候灾害研究体系,并为灾害风险管理提供科学支撑。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源

本研究采用《中国气象灾害大典·海南卷》作为基础数据来源[21],采用百度飞桨 OCR 系统实现文献数字化,采用 Python 中 nltk 库对文本进行自然语言处理,该海南卷气象灾害大典汇集了完整的历史灾情记录,文献收录范围既广泛全面,包括《海南省志·气象志》《海南岛志》《琼山县志》和《琼州志》等 20 部以上地方志,以及《广东省自然灾害史料》与《海南省千年自然灾害史料集》等专业灾害史料合集。该数据集合成了地方政府灾情档案,结合民政、三防及农林相关部门的救灾工作文档,及气象主管部门整理的气象监测总结等备案记录,以实现历史资料的一致性与可比分析,本文采用系统方法对原始资料进行整理:针对 1507~1644 年、1644~1911 年、1912~1949 年和 1949~2000 年的历史纪年,对农历日期实施公历转换,以实现与现代气象记录的横向比较;对原始史料实施标准化加工,对低温事件的时间标记、空间位置及严重程度等要素进行关键词采集。本论文对数据进行标准化存储,依托 DOI 10.5281/z.15412263 完成资源共享,便于后续研究的检验与进一步拓展。

本研究使用了美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的 Niño 3.4 指数数据[22]。这一指数是基于 ERSST v5 海表面温度数据,时间覆盖为 1870~2024 年。NOAA 20CRv3 数据来自于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)地球系统研究实验室(ESRL)提供的 20 世纪再分析(20th Century Reanalysis Version 3) [23]。时间覆盖 1806~1980 年,空间分辨率为 1°,适用于长时间气候序列研究。ERA-20C 数据由欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供[24]。ERA-20C 通过同化地面气压和海上风速等观测资料生成,再现了 1900~2010 年期间的大气状况,空间分辨率为 1.25°。ERA-20CM 数据同样来源于(ECMWF) [25],是 ERA-20C 对应的集合模拟产品。该数据不包含观测同化,仅由边界条件(如海温、海冰)驱动而成,具有 10 个集合成员,可用于评估再分析内部不确定性。本研究使用其集合平均结果,时间覆盖 1900~2010 年,分辨率为 1.25°。HNR (Hainan Regional Reanalysis)数据为本研究基于现有逐日高分辨率再分析数据裁剪得到的海南区域代表性气温资料[26]-[28]。数据覆盖 1940~2022 年,提取 1 月逐日气温序列后,在海南地区(108~111°E, 17~21°N)范围内进行空间平均,并计算出每年 1 月最低日气温及其距平结果,表征区域实际冷事件响应特征。

2.2. 灾害叙事文本量化转化方法

古代文本对严寒灾害的呈现以叙述为主,需转化为可分析的量化数据,对历史文献记载的低温灾害

进行系统梳理开发冷冻灾情叙事数据集，采用表 1 方法对文本初步分类与对文本内容进行词汇分割，抓取灾害破坏性词汇(如“数百吨种子腐坏”、“秧苗全田绝收”)，开发低温灾害相关关键词集合，从人畜安全、农作物生产、水产养殖等维度展开。

为全面衡量低温灾害的负面影响，采用历史文献中的语义特征进行解析，搭建了五维度灾害叙事评价架构，人员及牲畜伤亡状况，耕地受灾实情，水产养殖受灾程度，植被破坏现状，针对各指标，按照其描述的严重程度给予赋值设定差异赋分，总分反映灾害强度综合值，参照现代低温分级制度实施转换。

Table 1. Table of low temperature intensity levels and corresponding disasters in ancient Chinese literature
表 1. 中国古代文献中低温强度等级与灾情对照表

灾害等级	天气描述词	人畜损失描述词	农作物损失描述词	水产影响描述词	植被影响描述词
严重	·大寒	·六畜冻死	·农作物死亡率大于 50% ·烂秧绝收 ·种子烂种数百吨	·鱼虾死亡数百万	·经济作物等大片凋亡
	·霜冻数日	·人冻死			
	·寒潮持续	·耕牛死亡数百			
	·凝结如盐	·猪鸡羊大量冻死			
重度	·严寒	·耕牛冻死数十头 ·小型牲畜死亡明显	·秧苗死亡率 30%–50% ·冬种作物普遍冻伤	·水产零星死亡或减产	·果树落叶 ·芒果失收 ·裂果现象
	·雨雪多天				
	·阴雨连绵				
	·飞霜				
中度	·霜萎	·个别耕牛冻死 ·少量猪禽死亡	·叶黄叶白 ·生长缓慢 ·部分苗枯 ·秧苗返青迟缓	·水产厌食生病 ·少量死亡	·局部植被黄化 ·部分作物花腐果落
	·干冷				
	·低温寡照				
	·冷空气反复				
轻度	·阴冷	·牛猪个别冻伤 ·小规模防寒有效	·秧苗长势差 ·少量枯黄、影响不大	·无明显损失或影响较小	·局地叶片黄化 ·无大规模死亡现象
	·轻霜				
	·降温较大				

天气严重情况：表 2 根据低温情况进行分级。例如：“大寒、霜冻数日、寒潮持续、凝结如盐”赋分 6 分，“阴冷、轻霜、降温较大、温度偏低”赋 1~2 分进行赋分。

Table 2. Low temperature condition indicator table
表 2. 低温情况指标表

分值	特征描述	典型关键词	低温灾害等级
6	·极端低温天气	·大寒	严重
	·连续霜冻，寒潮影响	·霜冻数日	
	·伴随结冰	·寒潮持续	
	·气温接近冰点	·凝结如盐	
4~5	·强寒潮	·严寒	重度
	·寒风	·寒风凛冽	
	·飞霜多日	·飞霜	
	·气温持续大幅低于常年	·强冷空气	
2~3	·阴雨、干冷寡照	·干冷	中度
	·连续低温持续数日	·低温寡照	
	·有一定冷害表现	·阴雨连绵	
1	·轻霜、短时低温	·阴冷	轻度
	·气温略低但灾害影响轻微	·轻霜	

人畜伤亡：表 3 按伤亡规模与伤亡情况分级。按伤亡规模与伤亡情况分级。“六畜冻死”“猪鸡羊大量冻死”等大规模死亡事件赋 6 分；局部性“耕牛冻死数十头”或“小型牲畜死亡明显”赋 3~4 分；轻微伤亡如“牛猪个别冻伤”仅赋 1~2 分。

Table 3. Casualty indices
表 3. 人员伤亡指标表

分值	特征描述	典型关键词	低温灾害等级
5~6	·大规模死亡事件 ·牲畜死亡数百 ·人畜均受害	·六畜冻死 ·人冻死 ·猪鸡羊死亡上百	严重
4	·局部牲畜大面积死亡 ·耕牛冻死数十头 ·小型牲畜死亡明显	·耕牛冻死数十头 ·小型牲畜死亡明显 ·畜禽死亡较多	重度
2~3	·多个区域出现牲畜冻伤或轻度死亡 ·影响有限	·冻死十头以下 ·牲畜受冻较普遍但数量有限	中度
1	·个别牲畜冻伤 ·零星个例 ·无显著灾害影响	·牛猪个别冻伤 ·小范围个例死亡	轻度

农作物损失：表 4 以农作物减产或死亡程度为核心标准。如“烂秧绝收、种子烂种数百吨”等大规模损毁赋 6 分；“冬种作物普遍冻伤”等普遍现象赋 4~5 分；短期影响的“少量枯黄、影响不大”，则赋 1~2 分。

Table 4. Crop damage assessment index table
表 4. 农作物损毁情况指标表

分值	特征描述	典型关键词	低温灾害等级
6	·大范围绝收或死亡 ·农作物严重减产 ·播种失败	·经济作物死亡率大于 50% ·种子烂种数百吨	严重
4~5	·作物普遍受冻 ·冻伤面积大 ·影响多个地区部分绝收	·冬种作物普遍冻伤 ·秧苗死亡率 30%到 50% ·早稻推迟	重度
2~3	·作物生长受阻 ·局部区域出现冻害或叶枯现象 ·损失有限	·烂根死苗 ·分蘖缓慢 ·秧苗返青迟	中度
1	·影响轻微 ·仅表现为短暂的生长缓慢或少量叶片发黄	·少量枯黄 ·生长缓慢 ·局部苗木受损	轻度

水产影响情况：表 5 以水产如鱼、虾等死亡或减产程度为核心标准。如“虾苗死亡数百万”等大规模损毁赋 6 分；“零星死亡或减产”等普遍现象赋 3~4 分；短期影响的“无明显损失或影响较小”，则赋 1~2 分。

Table 5. Indicator table for aquatic product losses
表 5. 水产损失情况指标表

分值	特征描述	典型关键词	低温灾害等级
6	·大规模死亡事件 ·鱼虾等水产死亡数量巨大	·虾苗死亡数百万 ·渔业损失严重	严重
4~5	·多地水产出现死亡 ·产量下降显著 ·养殖受损明显	·鱼苗死亡较多 ·水产养殖普遍减产 ·网箱损失显著	重度
2~3	·局部养殖区鱼虾出现死亡或疾病 ·产量略有下降	·水产厌食 ·零星死亡 ·轻度冷害	中度
1	·轻微影响 ·个别网箱或鱼苗生长受限 ·无明显死亡	·无明显损失 ·部分鱼苗生长缓慢 ·死亡稀少	轻度

植被影响：表 6 以土地功能丧失程度为核心标准。如“椰子等大片凋亡”等永久性损毁赋 6 分；“橡胶落叶”“芒果失收”等绝收现象赋 4~5 分；短期影响，如“局地叶片黄化”、“无大规模死亡现象”，则赋 1~2 分。

Table 6. Vegetation loss condition indicator table
表 6. 植被损失情况指标表

分值	特征描述	典型关键词	低温灾害等级
6	·大片经济林果永久性凋亡 ·植被功能彻底丧失 ·长期生态或经济影响显著	·椰子大片凋亡椰树枯死 ·大片果园死亡	严重
4~5	·大面积落叶绝收 ·植株死亡 ·恢复周期长	·橡胶落叶 ·裂果 ·果树冻死	重度
2~3	·植被受损 ·果树叶片脱落 ·局地有冻害	·叶片脱落 ·生长点干死 ·果实减产	中度
1	·局地叶片黄化或生长缓慢 ·无明显死亡或仅短暂抑制	·局地黄化 ·生长减缓	轻度

表 7 根据赋分加权后的数值划分不同低温等级，得出海南历史低温灾害分类典型案例表。

Table 7. Classification table of low temperature disaster severity for typical years
表 7. 典型年低温灾害等级划分表

低温灾害等级	初步赋分估计	年份	地点	典型灾情描述
轻度灾害(6~10)	10	1701	澄迈	·阴雨连绵 ·禾苗失收
	8	1852	定安	·番薯尽伤

续表

中度灾害(11~20)	15	1990	文昌、屯昌	·多轮低温阴雨 ·个别地烂秧死苗
	18	1606	琼山	·大寒 ·百物凋落 ·六畜冻死
	20	1656	琼海	·寒霜大作 ·椰榔凋落 ·民冻死
重度灾害(21~25)	21	1989	全省	·低温 + 清明风 ·受灾面积逾 5 万公顷
	24	1993	澄迈、文昌等	·稻苗冻死 1200 公顷 ·瓜菜损失 800 公顷 ·鱼死亡 90 万尾
极端灾害(26~39)	28	1962	琼中、白沙	·霜冻 + 持续低温 17 天 ·番薯 90% 枯死 ·稻秧苗损毁
	29	1996	琼海、万宁	·瓜菜死亡超 6000 公顷 ·牛猪冻死 318 头 ·虾苗死亡百万
	30	1999	中北部等	·蔬菜秧苗损失 ·直接损失超亿元

2.3. 基于历史地名的空间重建方法

历史文献中灾害记载多采用古代地名，为实现空间分析，需将其与现代行政区划进行对应。琼海市由原会同县与乐会县合并组建；古代称作昌化的地区，现为昌江黎族自治县；万宁市旧称万州；三亚市旧时名为崖州，作为南部举足轻重的政经枢纽；现今海口市对应古琼山地界，又称琼州，文昌市现名与古称文州一脉相承，儋州市的建置可追溯至儋耳、儋州时期；东方市旧称感恩县；临高县旧称临城，也名临高郡；澄迈县前身为苟中县；定安县的前身名为定城县；陵水黎族自治县原名陵南县；保亭黎族苗族自治县过去以保城县为名；琼中黎族自治县以所处琼崖中部的地理位置命名；乐东黎族自治县早期称作乐安县；该地区最初名为通什，现称五指山，因其地处五指山周边而得名。

3. 结果

3.1. 海南岛历史低温灾害统计分析

1507~2000 年间海南岛低温灾害呈阶段性分布，图 1 显示 1644~1911 年与 1949~2000 年，灾害总数记录为 23 起和 26 起，占比接近七成，形成两个集中爆发期，1507~1644 年记录灾害 5 起，1912~1949 年则为 8 起，早期数据较少或与史料残缺及记载中断有关，海南低温灾害数据展现出历史时期灾害集中、现代阶段灾害多发的特点，显示出当前极端冷事件发生更频繁和灾害记录数据更完善的情况。

图 2 显示了 1507~2000 年间海南岛低温灾害在各历史时段的月份分布规律，1 月呈现出灾害集中特征。1644~1911 年间与 1949~2000 年间各有 11 起和 12 起记录，可见此时冷空气活动强度最大。2 月发生的低温灾害当前时期累计 8 起，1644~1911 年间达 6 起，可见冷空气入侵可多持续到新春前后；反观 11

月同3月若干周期内有极少数量的低温灾害文献记载,可见初冬及早春受影响有限。整体上,1949~2000年间低温灾害的影响时段明显延长,1~2月发生的低温灾害显著多余其他月份,呈现冷空气波及范围的时间延长趋势。

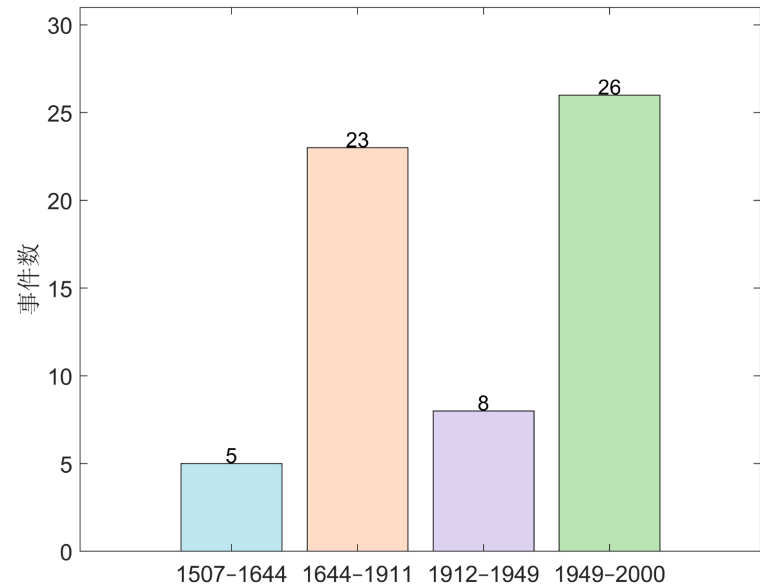


Figure 1. The total number of low temperature disasters in Hainan Island during different historical periods (1507~2000)
图 1. 1507~2000 年海南岛不同历史时期低温灾害总数

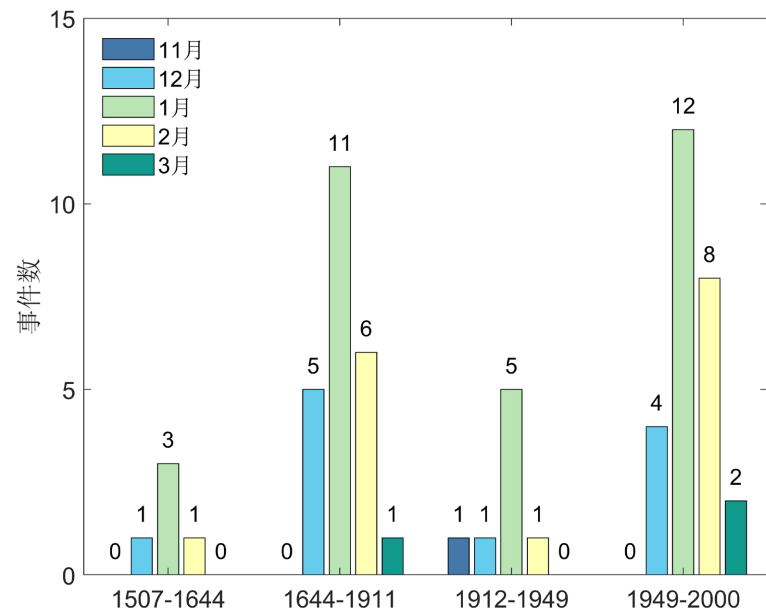


Figure 2. Monthly distribution characteristics of low temperature disasters in Hainan Island during different historical periods (1507~2000)
图 2. 1507~2000 年海南岛低温灾害不同历史时期的月分布特征

在图 3 中可以看出不同时期低温灾害的空间分异显著。在 5 个区域中,海南岛北部地区低温灾害发生数量最高,尤其在 1644~1911 年间(16 起)及 1949~2000 年间(20 起)。而 1507~1644 年间发生 3 起,

1912~1949 年间发生 4 起, 反映出灾害持续活跃的空间格局。东部地带 1644~1911 年共出现 7 起低温灾害, 1949~2000 年间增至 14 起, 除北部地区外灾害发生数排第二。1507~1644 年与 1912~1949 年间, 各地灾害统计数量普遍偏低, 若干区域毫无数据留存, 因该时期文献保存不完善或记录零散所致, 现有数据难以充分体现灾情实态, 历史文献的保存完整度直接影响早期灾害分布解读。1949~2000 年间, 海南中西两地区的灾害记录数量显著攀升, 数量为 13 起和 12 起, 体现了灾情空间扩散的格局, 两处地点早期未见灾害记载, 凸显当代极端低温灾害范围超出传统地理边界。南部灾害出现次数最低, 1949~2000 年间仅发生 5 起, 其余时期均无数据留存, 海南岛低温灾害的空间分布表现为北部多南部少、东部高西部低的特点, 自 1949 年起呈现空间分布扩展与发生频次总体上升的趋势。

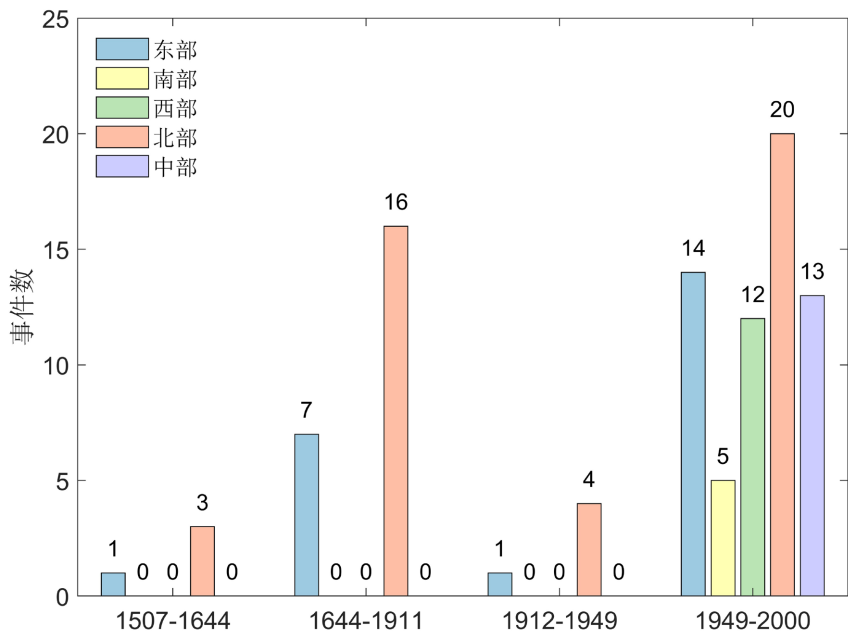


Figure 3. Changes in the spatial distribution of cold weather disasters over Hainan Island across different historical periods
图 3. 不同历史时期海南岛低温灾害区域分布变化

图 4 展示了 1507~2000 年间海南岛不同等级低温灾害的阶段性分布。各灾害等级对应的发生频次差别明显, 整体呈现 1644~1911 年间多发, 1949~2000 年再现的时空格局, 1644~1911 年阶段集中出现了轻度灾害, 其他阶段发生次数不多, 1507~1644 年间无灾害事件记录。自 1912 年开始中度灾害发生次数明显上升, 1949~2000 年间共计 10 起, 占该档位全部案例的 45%。重度灾害在 1949~2000 年间呈现高峰值, 反映出 1949~2000 年间强冷天气频次上升的趋势。1912~1949 年间, 四类灾害的发生频率均呈现低位, 或源于战时档案损毁及记录疏漏。海南地区低温灾害在 1644~1911 年间及 20 世纪后期形成两个高发期。梳理早期历史数据时, 要考虑历史文献记录的完整度对灾情分析的影响, 特别是 1507~1949 年时期的灾害数存在少计的情况。

3.2. ENSO 与低温灾害的关系

图 5 展示了 1870~2000 年 ENSO 指数的时间序列, 并叠加历史文献记录中的低温灾害发生月份。结果表明, 低温灾害在时间上相对更集中于 ENSO 指数为负的阶段, 表现出明显的响应特征。其中, 低温灾害事件相对更集中于 1940~2000 年且 ENSO 低于 0℃ 的冷相位阶段, 表现出与 ENSO 的明显响应性及冷相位相关的特征。同时, ENSO 冷相位时期海南地区低温灾害的发生频次相对较高, 低温灾害频发时

段与 ENSO 极值区间高度重合，部分灾害发生在 ENSO 指数正负状态更替的过渡区段。图 5 展示了低温灾害发生年份与 ENSO 异常阶段之间的时序对应关系。海南低温灾害在时间上呈现阶段性特点，在空间上则表现出相对集中的分布趋势。1940 年起，灾害的月度分布密度与年际发生频率均有上升趋势。

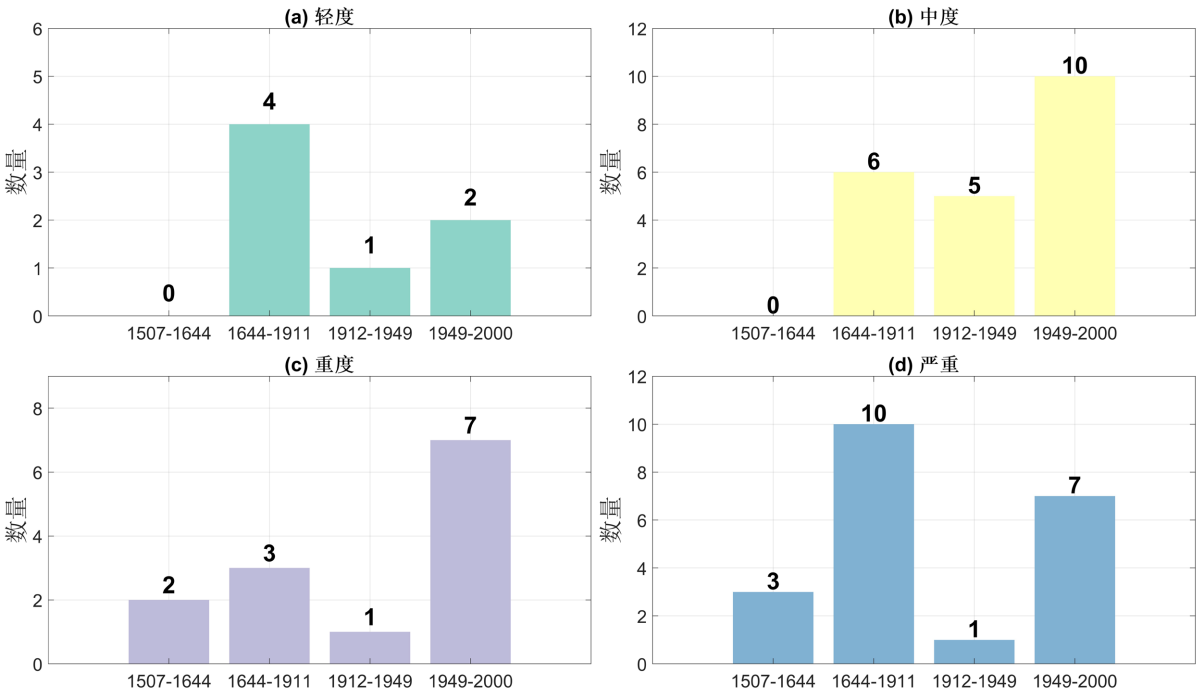


Figure 4. Distribution of historical low temperature disasters in Hainan Island during different periods, (a) mild disasters, (b) moderate disasters, (c) severe disasters, and (d) extreme disasters

图 4. 不同时期海南岛历史低温灾害等级分布图，(a) 为轻度灾害，(b) 为中度灾害，(c) 为重度灾害，(d) 为严重灾害

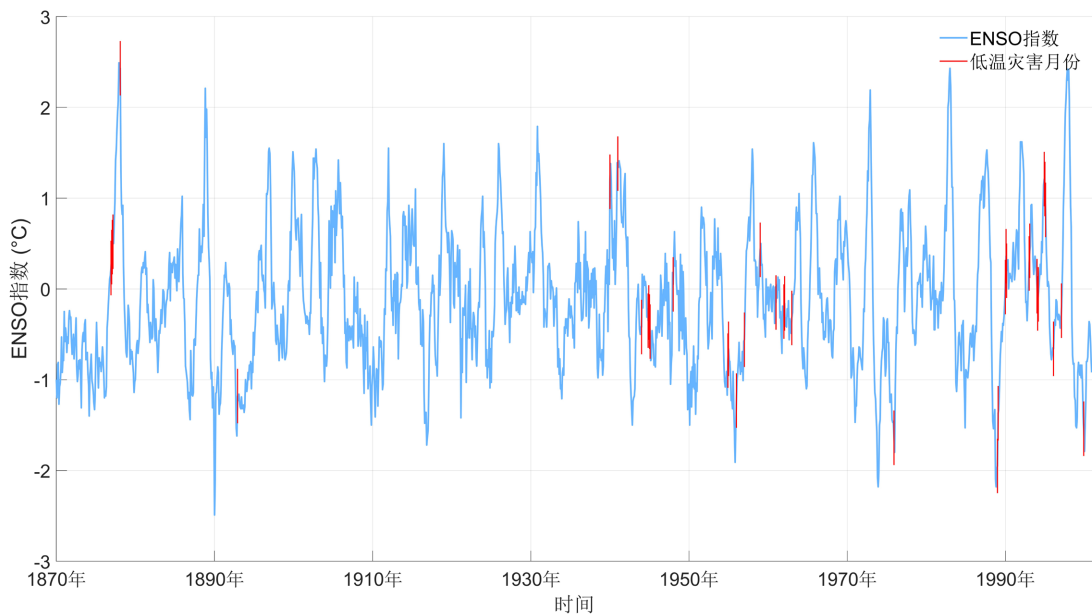


Figure 5. Time series of ENSO index and low temperature events in Hainan Island during 1870~2000

图 5. ENSO 指数与海南岛低温事件时间序列图(1870~2000 年)

3.3. 最低气温距平及低温灾害年份对应性分析

图 6 展示了基于四种近现代典型再分析数据集(美国国家海洋和大气管理局 20 世纪再分析数据集第 3 版 NOAA 20CRv3、欧洲中期天气预报中心 20 世纪大气再分析数据 ECMWF ERA-20C、欧洲中期天气预报中心驱动型 20 世纪气候模拟数据 ERA-20CM 以及海南区域高分辨率重建数据 HNR)构建的 1950~2000 年海南岛 1 月最低气温距平序列,并标记了在 1 月发生的低温灾害。时序图表明各序列的年际振荡特征基本吻合,然而在严寒年份的气候响应强度及变化幅度存在明显分化。

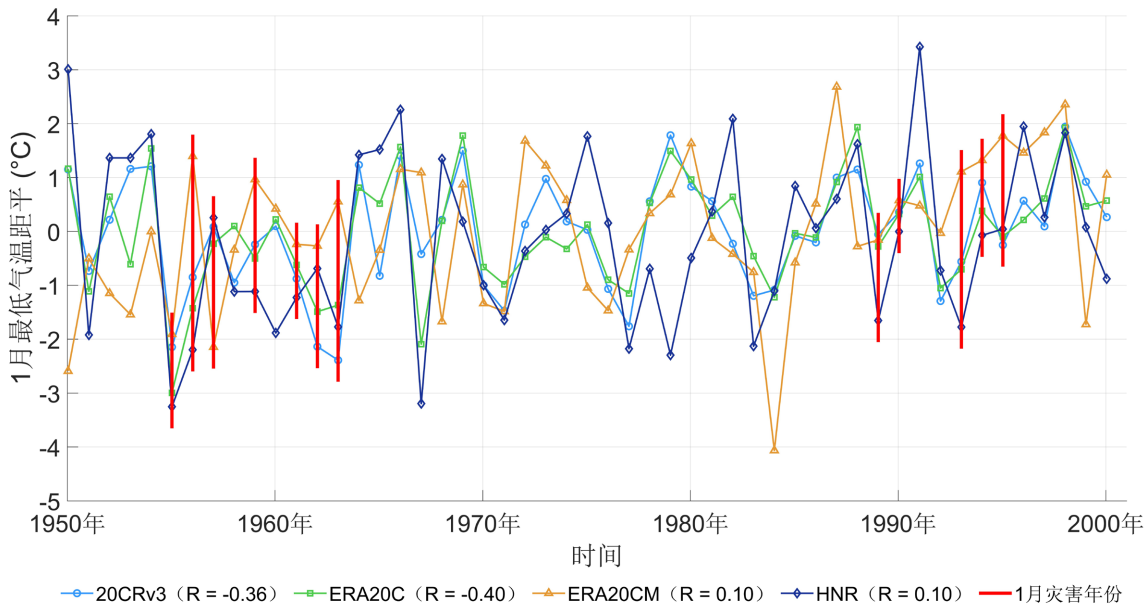


Figure 6. Relationship between January minimum temperature anomalies in Hainan and January-specific low temperature disaster years based on four reanalysis datasets during 1950~2000

图 6. 不同再分析数据 1950~2000 年海南 1 月最低气温距平与 1 月灾害年份关系图

1955 年及后续 1963 年等五个显著冷年份, 20CRv3 与 ERA-20C 再分析数据同步显现出明显负温度距平, 偶现 -3°C 以下的强负距平, 相较之下 ERA-20CM 的寒冷信号强度偏低, 温度距平甚至转为正值, 说明其对强冷事件的响应较弱。低温灾害事件主要出现在四套数据均显示明显负距平的时期, 说明海南岛低温灾害与气候条件存在明显关联, 通过数据相关分析可见, 20CRv3 与 ERA-20C 存在 -0.36 和 -0.40 的负相关性, 均观测到明显负相关, 说明二者皆可较好地呈现区域低温灾害特点; 而 ERA-20CM 与 HNR 的相关性都为 0.10 , 表明该数据在低温灾害与气温的相关性较差。

图 7 的时间序列演变上, 20CRv3 和 ERA-20C 在多个历史低温事件年份均表现出显著的气温负距平特征, 其中异常气温达 -2°C 至 -4°C 。HNR 序列在灾害年份普遍气温较低, 与 20CRv3 和 ERA-20C 趋势基本一致, 表明高分辨率数据对灾害年份气温异常显著相关。相比之下, ERA-20CM 在多个灾害年份未表现出明显气温负距平, 甚至在部分年份(如 1956 年、1963 年、1993 年)呈现气温正距平, 较其他数据的响应相对较弱。相关性分析结果 ERA-20CM 与 HNR 仅为 0.11 , 进一步表明 ERA-20CM 在海南区域的极端低温灾害响应能力相对较差。此外, 在低温灾害年份对应性分析叠加了 12 月至次年 2 月低温灾害发生年份的标记(红线), 灾害年份主要集中于气温负距平阶段, 且多数年份在两套数据(20CRv3 和 ERA-20C)中均呈现负相关。这一结果表明在典型的负距平年份更容易发生低温灾害事件, 多源资料对此表现出较高的一致性。

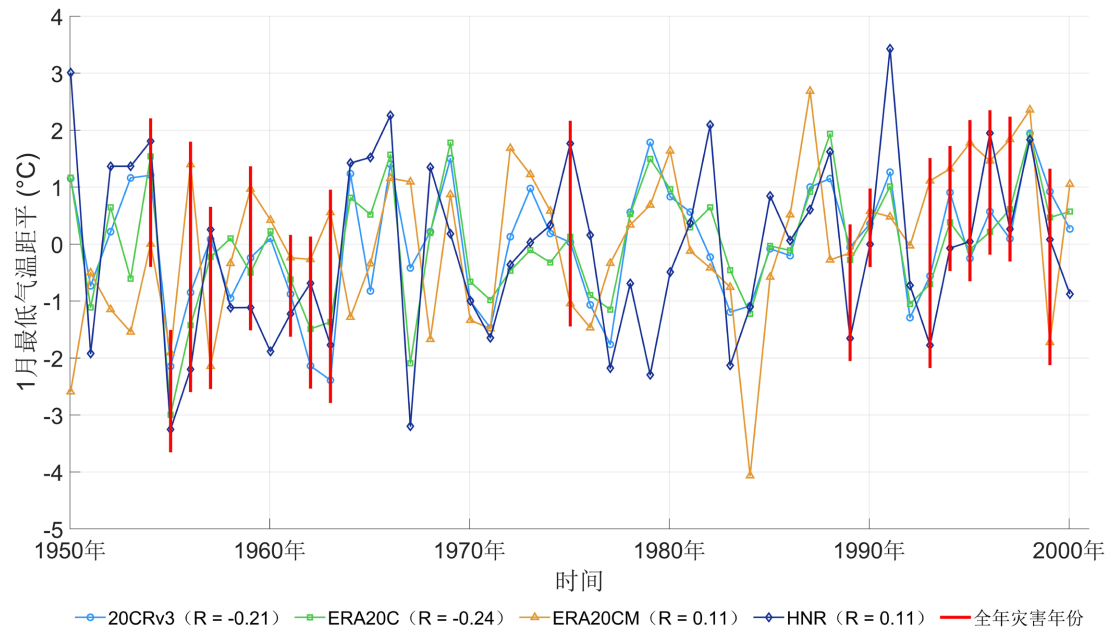


Figure 7. Relationship between January minimum temperature anomalies in Hainan and low temperature disaster years (any month) based on four reanalysis datasets during 1950~2000
图 7. 不同再分析数据 1950~2000 年海南 1 月最低气温距平与全年低温灾害年份关系图

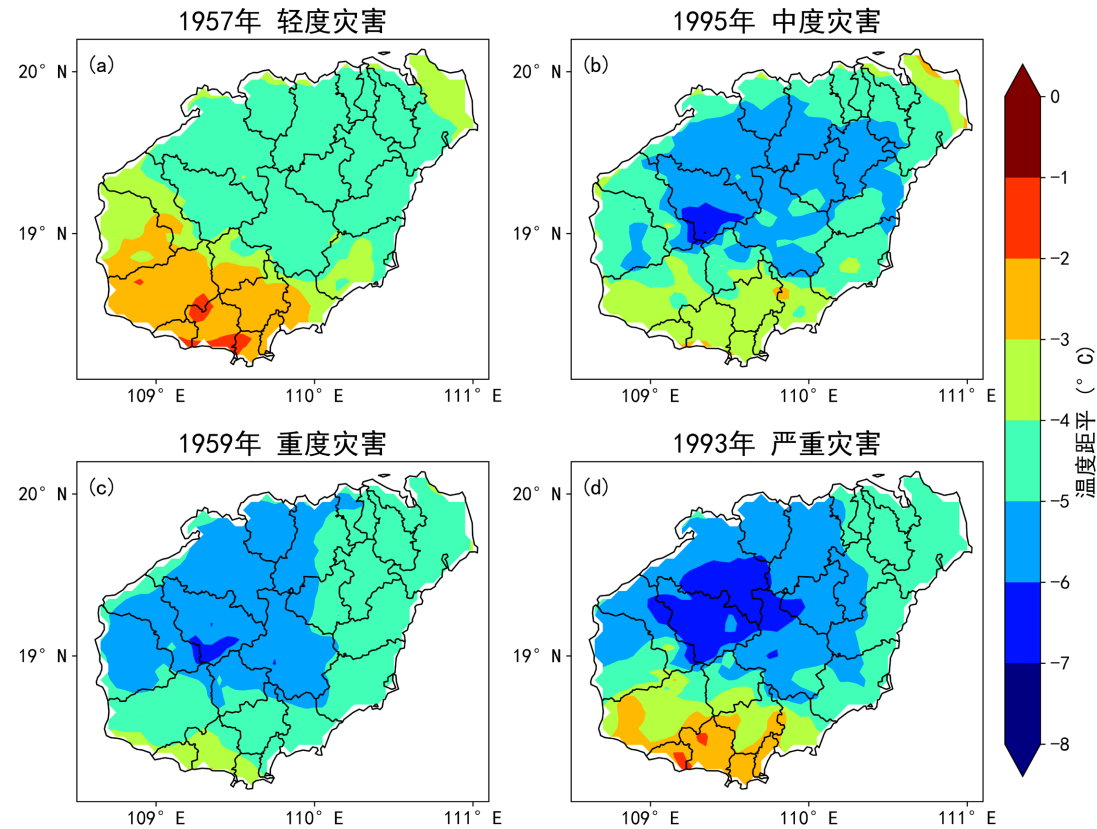


Figure 8. Temperature anomaly maps for January cold-disaster periods in typical years relative to the multi-year mean in Hainan
图 8. 海南典型年 1 月灾害期与多年均温的气温距平分布图

3.4. 典型低温灾害距平分析

为识别典型低温灾害过程中的气温异常特征,本研究采用逐日气温数据,生成了区域平均温度序列,采用海南热带作物受冷临界值,界定四个灾害典型年的低温灾害受灾时间:1957年1月17~18日、1995年1月4~6日、1959年1月10~13日加上1993年1月15~19日,计算灾害发生时期内的日平均气温与1950~2000年1月平均气温的距平分布图。

图8显示四个典型年均空间连续的负距平,说明冷空气波及整个岛屿,呈现显著的全域一致性及梯度分布格局,1957年(灾害程度较轻)气温下降幅度不大,气温距平分布以 -2°C 到 -5°C 为主,空间格局未见突出的冷区核心。1995年(中度灾害年)观测到负距平持续强化,全岛范围普遍出现 -4°C 到 -5°C 的气温距平,中北部(白沙黎族自治县南部)出现小范围低温集中现象。1959年(重度灾害年)灾情持续阶段,降温幅度更大且覆盖范围更广,中部及以北地区构成连贯的冷区,普遍出现 4°C ~ 6°C 的降温,白沙南部出现全岛最低的气温距平值。1993年(严重灾害年)的降温最为剧烈,中西部地区气温距平突破 -6°C ,冷中心空间分布广泛且密集,冷中心主要集中在儋州、白沙和琼中等中部高地区域,由于受地形抬升作用影响,冷空气在这些区域滞留的时间较长。典型灾害年的气温距平图,直观反映了低温现象的空间分布差异性,并展现出灾害强度与气温异常幅度之间的高度一致性,冷中心的空间分布随灾害加剧不断向中部地带推移并扩张,空间分布从局地型过渡到广域型,呈现了冷空气入侵的时空演化规律。

4. 结论

本研究通过系统整合历史文献资料,重建了海南岛1507~2000年间的低温灾害的连续序列,现有以下结论:

1) 1507~2000年,海南岛低温灾害演变呈现强度局部上升和空间覆盖扩大的趋势,1644~1911年与1949~2000年两个时期累计发生49起,属于两个明显的活跃期。1月是灾害发生的主要月份,两个活跃期分别有11起和12起低温灾害事件,占比超过50%;1949年之后灾害月份新增12月与2月,形成1月和2月两个集中爆发期。北方灾害发生次数最多,1644~1911年间有16起记录,1949~2000年间达20起;1949年后,西部与中部地区的灾害数量由零分别增加至12起和13起,反映出寒冻灾害带自北部向中西部地区扩展;1949年至今共记录到24起中度及以上的低温灾害事件,表明冬季严寒天气在近几十年更为常见,以北部地区最为突出,近年来的影响范围和强度也有所加重。历史早期文献记载数量有限,对早期灾害频次的统计分析应保持谨慎态度。

2) 从1870~2000年ENSO指数序列与低温灾害事件的叠加分析可知,低温灾害多集中于ENSO指数冷相位(<0)期间,尤以1940年后更为密集,部分灾害还发生在ENSO指数正负转换阶段。整体上,低温灾害在时间上呈阶段性增强,频次与ENSO冷相位存在较明显的对应关系。

3) 对比四套再分析数据可见,20CRv3与ERA-20C在1955年、1963年、1989年和1993年等典型冷年能准确反映出 -2°C ~ -4°C 的显著冷距平,气温异常与灾害年份高度一致。HNR序列表现稳定,趋势与两者基本一致。相比之下,ERA-20CM在多次灾害年份响应偏弱,甚至出现暖距平,其相关系数显著高于ERA-20C(-0.40)与20CRv3(-0.36)。红柱标记显示,大多数灾害年份集中于三个数据均为负距平的时间段,说明海南岛低温灾害事件对气温异常具有一致性响应,20CRv3和ERA-20C数据更能表征区域低温灾害。

4) 灾害期与多年均值的气温距平结果显示,四年均存在全岛性负距平,冷中心随灾害等级增强由北部丘陵向中部、南部扩展。轻度灾害年的距平多为 -2°C ~ -5°C ,无明显冷区核心;中度灾害年降温增强,北部出现大面积冷区;重度灾害年冷区扩展至中南部,距平达 -4°C ~ -6°C ;严重灾害年的降温最为剧烈,儋州、白沙和琼中等地距平突破 -6°C 。距平图清晰地展示了海南低温灾害的空间响应过程与强度分级特征。

基金项目

国家自然科学基金(No. 32260294); 海南大学科研基金资助项目(KYQD(ZR)-22083); 海南省自然科学基金(No. 425RC692)。

参考文献

- [1] 严中伟, 丁一汇, 翟盘茂, 等. 近百年中国气候变暖趋势之再评估[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 370-378.
- [2] 邵伟玲, 陈颖, 田书婷, 等. 气候变暖前后我国西北地区冬季极端低温事件的关键影响因子[J]. 沙漠与绿洲气象, 2024, 18(6): 64-71.
- [3] 张蕾, 霍治国, 黄大鹏, 等. 海南冬季主要瓜菜寒害风险区划[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(10): 1240-1251.
- [4] 孙瑞, 吴志祥, 陈帮乾, 等. 近 55 年海南岛气候要素时空分布与变化趋势[J]. 气象研究与应用, 2016, 37(2): 1-7+122.
- [5] 席承藩. 海南岛综合自然资源特点与热带农业生产的发展[J]. 自然资源学报, 1986(1): 56-64.
- [6] Chen, Z., Kang, J., Gu, C., Xu, Y., Tang, M. and Lu, K. (2018) The Variation of Extreme Low Temperature Events in the Northwest Pacific under the Global Warming. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **171**, Article 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/171/1/012027>
- [7] 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. 中国科学, 1973(2): 168-189.
- [8] 张德二, 梁有叶. 历史寒冬极端气候事件的复原研究——1670/1671 年冬季严寒事件[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(1): 25-30.
- [9] 韩永秋, 周连童, 黄荣辉. 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, 2021, 26(1): 1-17.
- [10] 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(5): 808-825.
- [11] Ayarzagüena, B. and Screen, J.A. (2016) Future Arctic Sea Ice Loss Reduces Severity of Cold Air Outbreaks in Midlatitudes. *Geophysical Research Letters*, **43**, 2801-2809. <https://doi.org/10.1002/2016gl068092>
- [12] 赵进平, 史久新, 王召民, 等. 北极海冰减退引起的北极放大机理与全球气候效应[J]. 地球科学进展, 2015, 30(9): 985-995.
- [13] 许格希, 郭泉水, 牛树奎, 等. 近 50a 来海南岛不同气候区气候变化特征研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(5): 799-810.
- [14] 宾昕, 蒋贤玲, 任晓玥. 近 51 年海南岛极端气温事件分析[J]. 热带气象学报, 2023, 39(3): 424-432.
- [15] 陈敏, 陈晖. 海南岛冬季低温冷害的气候特征[J]. 气象, 1999(3): 40-44+39.
- [16] Chen, X., Li, W., Liang, C., Bai, R. and Wu, H. (2022) Major Agrometeorological Disasters in Hainan and Their Control. *Journal of Tropical Biology*, **13**, 416-421.
- [17] 刘绍凯, 许能锐. 寒害对海南西庆农场橡胶林的影响与防护措施[J]. 林业科学, 2008, 44(11): 161-163.
- [18] 蔡文炬, 耿涛, 贾凡, 等. 全球变暖下的厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)变化及其影响[J/OL]. 科学通报, 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1784.n.20250121.0939.006.html>, 2025-05-16.
- [19] 韩文韬, 卫捷, 沈新勇. 近 50 年中国冬季气温对 ENSO 响应的时空稳定性分析研究[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(1): 97-106.
- [20] 张德二. 中国的小冰期气候及其与全球变化的关系[J]. 第四纪研究, 1991(2): 104-112.
- [21] 吴岩峻. 中国气象灾害大典(海南卷) [M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [22] Slivinski, L.C., Compo, G.P., Sardeshmukh, P.D., Whitaker, J.S., McColl, C., Allan, R.J., et al. (2021) An Evaluation of the Performance of the Twentieth Century Reanalysis Version 3. *Journal of Climate*, **34**, 1417-1438. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0505.1>
- [23] Nigam, S. and Sengupta, A. (2021) The Full Extent of El Niño's Precipitation Influence on the United States and the Americas: The Suboptimality of the Niño 3.4 SST Index. *Geophysical Research Letters*, **48**, e2020GL091447. <https://doi.org/10.1029/2020gl091447>
- [24] Poli, P., Hersbach, H., Dee, D.P., Berrisford, P., Simmons, A.J., Vitart, F., et al. (2016) ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century. *Journal of Climate*, **29**, 4083-4097. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0556.1>

-
- [25] Hersbach, H., Peubey, C., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P. and Dee, D. (2015) ERA-20CM: A Twentieth-Century Atmospheric Model Ensemble. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **141**, 2350-2375.
<https://doi.org/10.1002/qj.2528>
- [26] 焦悦, 黄诗彤, 邢益航, 吴晶, 尚明, 施晨晓, 贺音, 白磊. 热带岛屿地区不同云微物理方案对强降水模拟性能研究——以海南岛为例[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(3): 384-398.
- [27] 焦悦, 邢益航, 黄诗彤, 吴晶, 尚明, 施晨晓, 贺音, 白磊. 热带岛屿多尺度降水系统的积云对流参数化方案模拟性能评估——以海南岛为例[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(3): 321-336.
- [28] 焦悦, 邢益航, 黄诗彤, 吴晶, 尚明, 施晨晓, 贺音, 白磊. WRF 模式海南地区地表要素最优初始化时间研究[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(3): 399-410.