

基于历史数据从1368年至今海南岛暴雨洪涝灾害趋势分析

徐静颖¹, 邢益航¹, 杨德石¹, 尚明², 吴晶³, 焦悦¹, 施晨晓^{4*}, 白磊^{1,5*}

¹海南大学生态学院, 海南 海口

²河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

³兰州中心气象台, 甘肃 兰州

⁴海南省气象信息中心/海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南 海口

⁵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6月14日; 录用日期: 2025年7月11日; 发布日期: 2025年7月18日

摘要

本研究基于《中国气象灾害大典·海南卷》重建了1368~2000年间海南岛暴雨洪涝灾害的连续序列, 揭示了其时间演变规律、空间分布特征及气候驱动机制。结果表明, 暴雨事件主要集中在5~10月, 尤以9~10月最为频繁。1949~2000年间10月暴雨事件高达24次, 显著高于历史同期, 反映出现代时期暴雨频率与季节波动性均增强, 区域极端降水过程的不稳定性加剧。空间上, 万宁市暴雨发生频次与类型显著高于其他地区, 暴雨与大暴雨占比达67%。反映其受地形与气候条件双重影响显著。暴雨和大暴雨为主要类型, 占总事件数的主导地位, 区域差异性明显。清代时期定安、万宁、琼中、海口等地区大暴雨、特大暴雨与持续性暴雨发生频率普遍较高, 而明代与1912~1949年间受气候波动及记录局限性影响, 暴雨事件数量显著偏少。1870~2000年间, 92.3%的暴雨月份对应正相位ENSO, 表明ENSO暖相位对海南海南极端降水具有显著的增强效应。

关键词

历史暴雨洪涝, 灾害叙事文本, 文献重建, 厄尔尼诺与南方涛动

Trend Analysis of Rainstorm-Induced Flood Disasters in Hainan Island Based on Historical Data from 1368 to Present

Jingying Xu¹, Yihang Xing¹, Deshi Yang¹, Ming Shang², Jing Wu³, Yue Jiao¹,
Chenxiao Shi^{4*}, Lei Bai^{1,5*}

¹School of Ecology, Hainan University, Haikou Hainan

*通讯作者。

文章引用: 徐静颖, 邢益航, 杨德石, 尚明, 吴晶, 焦悦, 施晨晓, 白磊. 基于历史数据从1368年至今海南岛暴雨洪涝灾害趋势分析[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(4): 690-701. DOI: 10.12677/ccrl.2025.144069

²School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

³Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou Gansu

⁴Hainan Meteorological Information Center/Hainan Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Haikou Hainan

⁵Hainan Intelligent Low-Altitude Meteorological Big Data Research Centre, Haikou Hainan

Received: Jun. 14th, 2025; accepted: Jul. 11th, 2025; published: Jul. 18th, 2025

Abstract

Based on the Compendium of Meteorological Disasters in China: Hainan Volume, this study reconstructs a continuous series of rainstorm-induced flood events on Hainan Island from 1368 to 2000, and analyzes their temporal evolution, spatial distribution, and climatic drivers. The results show that rainstorm events were concentrated from May to October, with a peak in September-October. During 1949~2000, 24 events occurred in October alone—significantly exceeding the historical average—indicating increased frequency, stronger seasonality, and greater instability of extreme precipitation in the modern period. Spatially, Wanning City experienced the highest frequency and diversity of rainstorms, with rainstorms and heavy rainstorms accounting for 67% of total events, highlighting the combined influence of topography and climate. Regional differences were evident, with rainstorms and heavy rainstorms being the dominant types across the island. During the Qing Dynasty, the regions of Ding'an, Wanning, Qiongzong, and Haikou experienced a relatively high frequency of heavy, extreme, and persistent rainstorm events. In contrast, the number of such events was significantly lower during the Ming Dynasty and the period from 1912 to 1949, likely due to climatic variability and limitations in historical documentation. From 1870 to 2000, 92.3% of rainstorm months corresponded to positive ENSO phases, indicating that warm-phase ENSO significantly enhances extreme precipitation over Hainan Island.

Keywords

Historical Torrential Rain and Flood Events, Disaster Narrative Texts, Document-Based Reconstruction, El Niño-Southern Oscillation (ENSO)

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

在全球气候变暖加剧与极端天气事件常态化的背景下，暴雨洪涝已成为我国自然灾害防治体系中亟待破解的重大课题。作为全国唯一处于热带地区的省份，海南岛因其特殊的地理区位与气候特征成为暴雨洪涝灾害研究的关键区域。受热带季风气候与全球气候变化叠加影响，该区域暴雨洪涝灾害呈现频发态势[1][2]。其中近 30 年由于台风极端降水事件逐渐呈现“三增”特征(频次+15%、强度+10%、非传统雨季事件增多)，进一步增加了洪涝灾害的可能性[3]-[5]。暴雨洪涝灾害严重威胁海南岛生态系统、热带农业经济，进而对人类社会生产生活造成深远影响[6][7]。因此，深入开展暴雨洪涝灾害的长期趋势研究，不仅对完善热带岛屿灾害形成理论具有科学价值，更能对保障国家重大战略实施、促进人地关系协调发展、为区域防灾减灾体系构建提供科学依据。

过去几十年里,全球变暖将加剧极端降水事件的不确定性[8][9]。气象观测数据和基于历史文献的数据分析极大的推动了暴雨洪涝灾害趋势分析。一些研究人员基于历史灾害资料分析了暴雨洪涝灾害趋势并进行风险评估,同时通过分析气象观测站资料揭示了海南岛强降水的时间和空间分布特征[10][11]。有研究还通过融合多年积累的遥感和地面数据进一步分析暴雨洪涝风险趋势[12]。

相比于长江流域、珠三角地区等洪涝灾害多发区的时空演变趋势研究上[13][14],现有海南岛区域研究多集中于短时序暴雨洪涝灾害分析。大多数研究通过分析历史文献和现代观测数据,指出台风是导致海南岛暴雨洪涝的主要气象因素,其中,台风所引发的暴雨主要集中在7~9月,多发生在海南岛东部和北部地区[15][16]。同时有研究还发现季风环流异常也是引发海南岛暴雨的重要因素,尤其是夏季西南季风与冬季东北季风的转换期,更易形成持续性强降水[17]。此外,厄尔尼诺-南方涛动(ENSO指数)等大尺度气候模态显著影响其降水以及长时间时序暴雨灾害趋势分析[18]-[20]。然而,对于热带海岛地区在暴雨洪涝历史演变研究方面仍显薄弱,目前还缺乏系统的研究。

现有研究多集中于某几次重大灾害事件的灾后评估或某一阶段的气候统计分析,缺乏系统性和长时间尺度的综合研究。因此尽管在风险评估模型(如GIS空间分析、SWMM城市内涝模拟)、数据库建设(600年历史灾害数据库)和防灾策略(海绵城市建设、区域联防机制)等方面取得进展,现有研究仍存在三方面局限:①全岛尺度长时序演变规律的系统性分析不足;②历史文献数据挖掘与多源数据融合深度不够;③气候-水文过程与社会经济因素的耦合研究薄弱。

基于上述背景,本研究创新性构建“历史文献-观测数据-代用资料”三位一体的暴雨洪涝数据库,系统解析1368~2000年海南岛暴雨洪涝的演变规律及其气候驱动机制,重点整合历史文献记录 and 现代观测数据,系统分析海南岛暴雨洪涝灾害的时空分布特征及其长期演变趋势,为海南岛防灾减灾工作提供科学依据。具体将围绕以下几个方面展开:(1)建立完整的海南岛历史暴雨洪涝灾害数据库,包括明清时期至现代的暴雨事件记录;(2)分析海南岛暴雨洪涝灾害的时空分布特征及其变化规律;(3)探讨气候变化对海南岛暴雨洪涝灾害的影响机制。

2. 评估方法与数据

2.1. 数据来源

本研究数据主要来源于《中国气象灾害大典·海南卷》,采用百度飞桨OCR技术将文献数字化,并使用Python nltk自然语言处理工具进行文本分析处理。《中国气象灾害大典·海南卷》汇集了丰富的历史灾害记录,其资料覆盖范围广泛全面,包括《海南省志·气象志》《海南岛志》《琼山县志》《琼州志》等20余部地方志书,以及《广东省自然灾害史料》《海南省千年自然灾害史料集》等专门灾害史料汇编。此外,该资料还整合了各市县灾情报告、民政部门、“三防”部门、农业部门、农垦部门、林业部门的灾情与救灾报告,以及气象部门的气象服务总结等官方记录,为确保历史数据的一致性与可比性,本研究对原始资料进行了系统性处理:首先,针对明朝(1368~1644年)、清朝(1644~1911年)、民国时期(1912~1949年)和中华人民共和国(1949~2000年)的历史纪年,保留明代和清代的农历时间,将民国时期农历时间转换为公历,以便与现代气象记录进行对比分析;其次,对提取的史料记录进行标准化整理,确保暴雨事件的时间、地点、强度等关键信息得到准确提取;最后,建立结构化数据库,并通过DOI:10.5281/zenodo.15204769进行公开共享,以支持后续研究验证与拓展。

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(数据来源:https://psl.noaa.gov/data/timeseries/month/DS/Nino34_CPC/)。这一指数是基于ERSST v5海表面温度数据,用170°W~120°W,5°N~5°S范围内的海表温度进行计算,时间尺度为1870~至今。

2.2. 灾害叙事文本量化转化方法

2.2.1. 灾害叙事文本数据库构建与关键词提取

历史文献中对暴雨灾害的记载多以描述性文字为主，需将其转化为可量化指标。整理历代文献中关于暴雨灾害的叙述(如“淫雨数月”“山洪暴发”“田禾尽淹”)，建立暴雨灾害叙事数据库。依据表 1 对文本进行初步分类与标记(如“持续性暴雨”“特大暴雨”)。对文本进行分词处理，提取与灾害破坏相关的关键词(如“城崩”“沙压田地”“溺死数千”)。构建暴雨灾害关键词库，涵盖建筑损毁、农业损失、人员伤亡等维度。

2.2.2. 灾害叙事指标体系构建与灾害强度评分方法

为系统量化暴雨灾害的破坏程度，本研究从历史文献中提取语义特征，构建了涵盖六个维度的灾害叙事指标体系，包括建筑物破坏、植被和农业损失、人员伤亡、洪涝与次生灾害、灾害描述强度及灾害持续时间。每个指标依据描述的严重程度赋予差异化分值，总分反映灾害综合强度，并映射至现代暴雨等级标准。

Table 1. Comparative classification of rainstorm intensity and associated disaster descriptions in ancient Chinese historical texts

表 1. 中国古代文献中暴雨强度分级与灾害描述对照表

暴雨类型	雨描述词	建筑物破坏描述词	人员伤亡描述词	农田破坏描述词	河流水位描述词
暴雨 (≥50 毫米)	• 大雨 • 淫雨	• 局部受损	• 轻微伤亡	• 局部积水	• 水位上涨
大暴雨 (>100 毫米)	• 霖雨 • 大涝	• 部分倒塌	• 较多转移	• 部分被淹	• 河水泛滥
特大暴雨 (≥200 毫米)	• 非常涨溢 • 洪水暴涨	• 大量倒塌	• 较多伤亡	• 大面积被淹	• 河道改道 • 山洪暴发
持续性暴雨	• 连日雨积雨数月	• 持续性受损	• 持续性转移	• 持续性积水	• 水位持续上涨

建筑物破坏：表 2 根据损毁范围与不可逆性分级。例如，“城崩数百丈”“民居荡然无存”等描述因涉及公共设施崩溃或群体性居住破坏，赋最高 6 分；而“屋瓦飞落”“低洼浸水”等局部或可修复性破坏，赋 1~2 分。

Table 2. Building damage indices table

表 2. 建筑物破坏指标表

分值	特征描述	典型关键词	对应暴雨类型
6 分	极端破坏	• 城崩数百丈 • 民居荡然无存 • 桥梁全毁 • 堤坝溃决成灾	持续性暴雨
5 分	严重破坏	• 大量房屋倒塌 • 店铺冲决 • 公廨倾圮 • 山洪冲毁村落	特大暴雨(≥200 毫米)

续表

3~4 分	中等破坏	• 局部房屋倒塌 • 城垣倾圮 • 低洼区浸塌	大暴雨(>100 毫米)
1~2 分	轻微破坏	• 屋瓦飞落 • 墙壁裂缝 • 临时建筑受损	暴雨(≥50 毫米)
0 分	无明显记载	未提及建筑破坏	暴雨及以下(<50 毫米)

植被和农业损失: 表 3 以土地功能丧失程度为核心标准。如“农田沙压不可复耕”“陵谷变迁成塘”等永久性损毁赋 6 分;“禾稼一空”“五谷不登”等全年绝收现象赋 5 分;短期影响的“禾苗浸伤”“减产三成”则赋 3~4 分。

Table 3. Vegetation and agricultural loss indices table

表 3. 植被和农业损失指标表

分值	特征描述	典型关键词	对应暴雨等级
6 分	永久性损毁	• 沙压田地不可复耕 • 陵谷变迁成塘 • 农田荒废十年	持续性暴雨
5 分	全年绝收	• 禾稼一空 • 五谷不登 • 失收绝粮 • 田禾殆尽	特大暴雨(≥200 毫米)
3~4 分	严重减产	• 禾苗浸腐 • 瓜菜全淹 • 减产七成	大暴雨(>100 毫米)
1~2 分	局部影响	• 低田积水三日 • 坡稻受浸 • 暂缓播种	暴雨(≥50 毫米)
0 分	无明显记载	未提及建筑破坏	暴雨及以下(<50 毫米)

人员伤亡: 表 4 按伤亡规模与社会影响分级。“溺死数千人”“道殣相望”等大规模死亡事件赋 6 分;局部性“溺死十余人”或“灾民流离”赋 3~4 分;轻微伤亡如“牲畜淹毙”仅赋 1~2 分。

Table 4. Casualty indices table

表 4. 人员伤亡指标表

分值	特征描述	典型关键词	对应暴雨等级
6 分	大规模死亡	• 溺死数千人 • 压死无算 • 道殣相望(饿殍遍野)	持续性暴雨
5 分	群体伤亡	• 失踪数百人 • 灾民流离失所 • 全家覆没	特大暴雨(≥200 毫米)

续表

3~4 分	局部伤亡	• 溺死十余人 • 压伤数十人 • 饥民菜食	大暴雨(>100 毫米)
1~2 分	轻微伤亡	• 牲畜淹毙 • 个别轻伤 • 避灾转移	暴雨(≥50 毫米)
0 分	无明显记载	未提及人员伤亡	暴雨及以下(<50 毫米)

洪涝与次生灾害：表 5 重点关注地理形态改变与灾害叠加效应。“河道改道”“山崩成渠”等永久性地形剧变赋 6 分；“海水倒灌 + 山洪暴发”等多重并发灾害赋 5 分；区域性“河水泛滥”或“田洋成海”赋 3~4 分。

Table 5. Storm surge and flooding indices table
表 5. 风暴潮与洪涝指标表

分值	特征描述	典型关键词	对应暴雨等级
6 分	地形剧变	• 河道改道 • 山崩成渠 • 海口冲射南徙	持续性暴雨
5 分	多重灾害	• 海水倒灌 + 山洪暴发 • 潮水泛涨 + 堤防决口 • 洪水与泥石流并发	特大暴雨(≥200 毫米)
3~4 分	严重洪涝	• 河水泛滥淹没城池 • 田洋成海 • 低洼区水深数米	大暴雨(>100 毫米)
1~2 分	局部内涝	• 街道积水三尺 • 村舍浸水 • 短暂积水	暴雨(≥50 毫米)
0 分	无明显记载	未提及风暴潮或洪涝	暴雨及以下(<50 毫米)

灾害描述强度：表 6 结合历史语境与极端表述。“亘古未有之灾”“百年罕见”等突破性描述赋 6 分；“水势滔天”“漂荡民舍”等高强度破坏性描述赋 5 分；量化损失如“毁田万顷”赋 3~4 分。

Table 6. Disaster description intensity indices table
表 6. 灾害描述强度指标表

分值	特征描述	典型关键词	对应暴雨等级
6 分	历史性极端	• “从无若比此甚” • “百年罕见” • “亘古未有之灾”	持续性暴雨
5 分	高强度破坏	• “漂荡民舍如洗” • “水势滔天” • “灾情惨烈空前”	特大暴雨(≥200 毫米)

续表

3~4 分	量化损失	• “直接经济损失亿两” • “毁田万顷” • “减产九成”	大暴雨(>100 毫米)
1~2 分	局部描述	• “局部暴雨伤稼” • “数村受灾” • “低田受损”	暴雨(≥50 毫米)
0 分	无强度描述	仅记录降雨量，无灾情描述。	暴雨及以下(<50 毫米)

灾害持续时间：表 7 以灾害连锁效应为评判依据。“淫雨数月”“积雨经年”等长期灾害导致社会结构崩溃赋 6 分；“连旬暴雨”或“七日不退”等中短期事件赋 3~4 分；瞬时性“半日暴雨”则赋 1~2 分。

Table 7. Disaster duration indices table

表 7. 灾害持续时间指标表

分值	持续时间	典型表述	对应暴雨等级
6 分	持续数月	• 连日 • 三昼夜 • 昼夜不息	持续性暴雨
5 分	连旬不止	• “旬日飓风暴雨” • “连作大水七次” • “暴雨兼旬，江河屡溢”	特大暴雨(≥200 毫米)
3~4 分	中短期影响	• “暴雨七日不退” • “三日水涨未消” • “昼夜倾溢”	大暴雨(>100 毫米)
1~2 分	中等时间	• “一时骤雨成涝” • “夜半山洪突发” • “半日暴雨”	暴雨(≥50 毫米)
0 分	短时间/未提及	仅记录单日降雨	暴雨及以下(<50 毫米)

暴雨灾害等级划分：表 8 展示了基于降雨强度及灾害特征的暴雨灾害等级划分。

Table 8. Classification system table for rainstorm-induced disasters

表 8. 暴雨灾害等级划分表

得分范围	灾害等级	对应暴雨等级	24 小时降雨量	灾害特征描述
≥25 分	I 级 (极端灾害)	持续性暴雨	持续≥3 日，累积 ≥500 毫米	长期暴雨叠加多重次生灾害(如山洪、泥石流、地质塌陷)，导致： • 地形永久改变(河道改道、山体崩裂) • 基础设施完全瘫痪(桥梁全毁、城市淹没) • 全域性饥荒、人口大规模迁移
20~24 分	II 级 (特大灾害)	特大暴雨 + 持 续性	单日≥300 毫米	极端降雨引发： • 山洪暴发 + 河道决堤 • 大量房屋倒塌、农田永久损毁 • 数百人伤亡或失踪。

续表

15~19 分	III级 (重大灾害)	特大暴雨	200~299 毫米	高强度短时降雨导致： • 区域基础设施严重损毁(桥梁冲毁、堤坝溃决) • 农作物绝收 • 数十人伤亡。
10~14 分	III级 (较大灾害)	大暴雨	100~199 毫米	区域性洪涝灾害： • 局部房屋倒塌 • 农作物减产 50%以上 • 人员伤亡可控(十人以内)。
5~9 分	IV级 (一般灾害)	暴雨	50~99 毫米	局部内涝： • 低洼区房屋浸水 • 农田短期积水 • 需少量人员转移。
<5 分	V级 (轻微灾害)	普通降雨	<50 毫米	短暂积水或零星损坏： • 道路短暂中断 • 无人员伤亡。

2.3. 基于历史地名的空间重建方法

历史文献中的暴雨灾害事件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。琼海市由古代的会同、乐会两县合并而成；昌江黎族自治县对应古代的昌化；万宁市在古代称为万州；三亚市古称崖州，是南部重要的政治经济中心；海口市对应古代的琼山，又称琼州；文昌市保留了古名，古称文州；儋州市源自古代的儋耳、儋州；东方市对应古代的感恩县；临高县古称临城或临高郡；澄迈县名称延续古代，但曾称白沙县；定安县古称定城县；屯昌县名字源于“屯田昌盛”；陵水黎族自治县古称陵南县；保亭黎族苗族自治县古称保城县；琼中黎族苗族自治县取名自琼崖中部地区；白沙黎族自治县名字来源于白沙岭；乐东黎族自治县古称乐安县；五指山市早期称为通什，因地处五指山地区而得名。

3. 结果

3.1. 海南岛暴雨事件季节分布的朝代演变分析

本研究基于历史文献中记录的暴雨事件，对海南岛自明代以来的季节性分布演变特征进行了系统分析(图 1)。结果表明，海南岛的暴雨事件整体上集中在 5~10 月之间，呈现显著的季节性特征。明代在 9 月记录了暴雨事件 13 次，清代在 9 月和 10 月的暴雨事件高发，分别为 11 和 13 次；民国时期暴雨频次下降，9 月仅有 4 次；而新中国成立后，暴雨事件在多个时段显著增加，10 月高达 24 次，明显高于历史同期。各时期对比显示，现代阶段暴雨分布月际波动增强，极端降水呈现出更强的集中性与不稳定性。

3.2. 海南岛各地区暴雨类型分布

图 2 中数据显示，万宁市同时遭受大暴雨和持续性暴雨的双重威胁，在暴雨和大暴雨事件的发生次数上显著高于其他市县，记录到 18 次大暴雨和 15 次暴雨，远高于白沙县和保亭县的记录次数，这种显著差异可能部分归因于万宁市的地理位置和地形特征，但也反映了气候条件对暴雨发生频率的实质性影响。从暴雨类型组合来看，暴雨和大暴雨在各个市县均占据主导地位，尤其在万宁市，此类暴雨数量达到 33 起，占总暴雨事件的 67%。

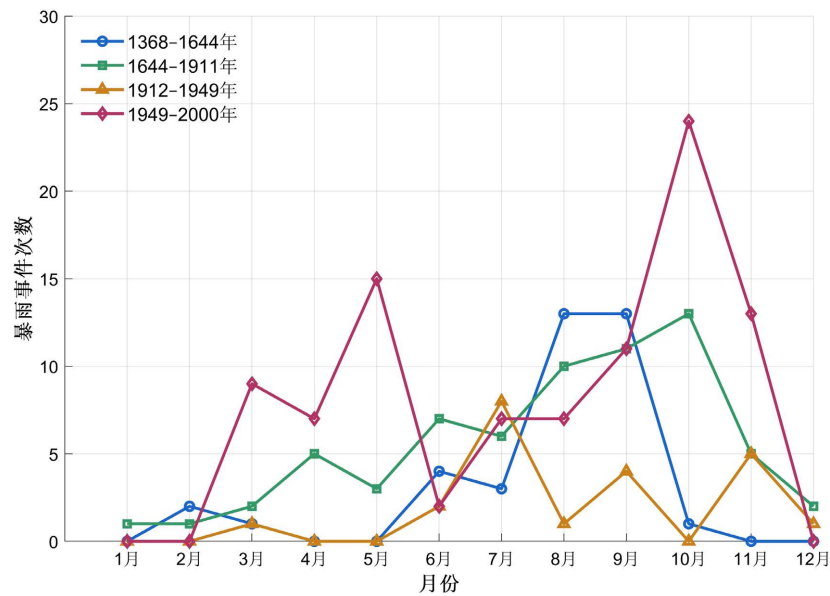


Figure 1. Dynastic evolution of the seasonal distribution of rainstorm events in Hainan Island
图 1. 海南岛暴雨事件季节分布的朝代演变

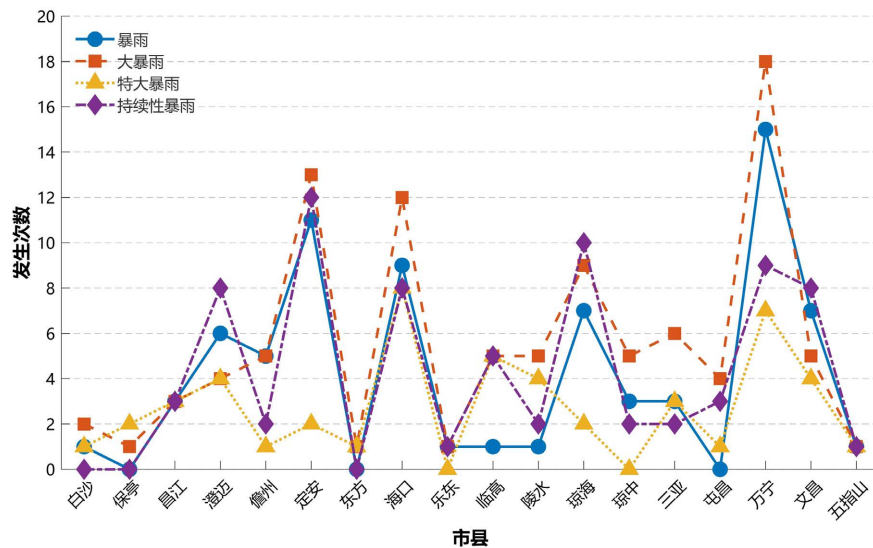


Figure 2. Regional distribution of rainstorm types in Hainan Island
图 2. 海南岛各地区暴雨类型分布

3.3. 海南岛各城市不同时期暴雨等级统计

图 3 所示, 清朝时期海南岛暴雨事件频次普遍较高, 尤其在定安和万宁, 暴雨(图 3(a))次数分别达 8 次和 11 次; 大暴雨(图 3(b))在万宁多达 14 次, 在琼中达 6 次; 特大暴雨(图 3(c))以海口为最, 达 5 次; 持续性暴雨(图 3(d))则集中于澄迈和定安, 频次超 4 次。相比之下, 明朝与民国时期各等级暴雨事件普遍偏少, 大多数城市的记录在 2 次以下。1949 年以后, 虽然海口、文昌和琼中等地在部分暴雨等级上记录增多, 但整体频次仍低于清朝, 反映出现代时期记录能力增强的同时, 尚未超越历史高发阶段。整体来看, 清朝期间海南岛各城市的各类型暴雨事件发生次数普遍较高, 尤其是在暴雨和大暴雨类型。清朝整体处于“小冰期”寒冷阶段, 气候系统不稳定性导致更多极端降水事件, 1830 年后全球

厄尔尼诺事件频率增加,海南岛作为季风区前缘,可能受此影响,加剧了暴雨强度。明朝虽同处小冰期,但其寒冷程度在 16 世纪达到峰值,导致海南岛罕见降雪事件增多,但极端降水可能因冷干气候主导而相对减少。民国时期的暴雨等级次数相对较少,可能因为观测中断与气候过渡期的影响,暴雨记录相对较少。中华人民共和国期间的暴雨事件频次在部分城市有较高的数值,这可能与现代气象观测技术的提高和气候变化有关。

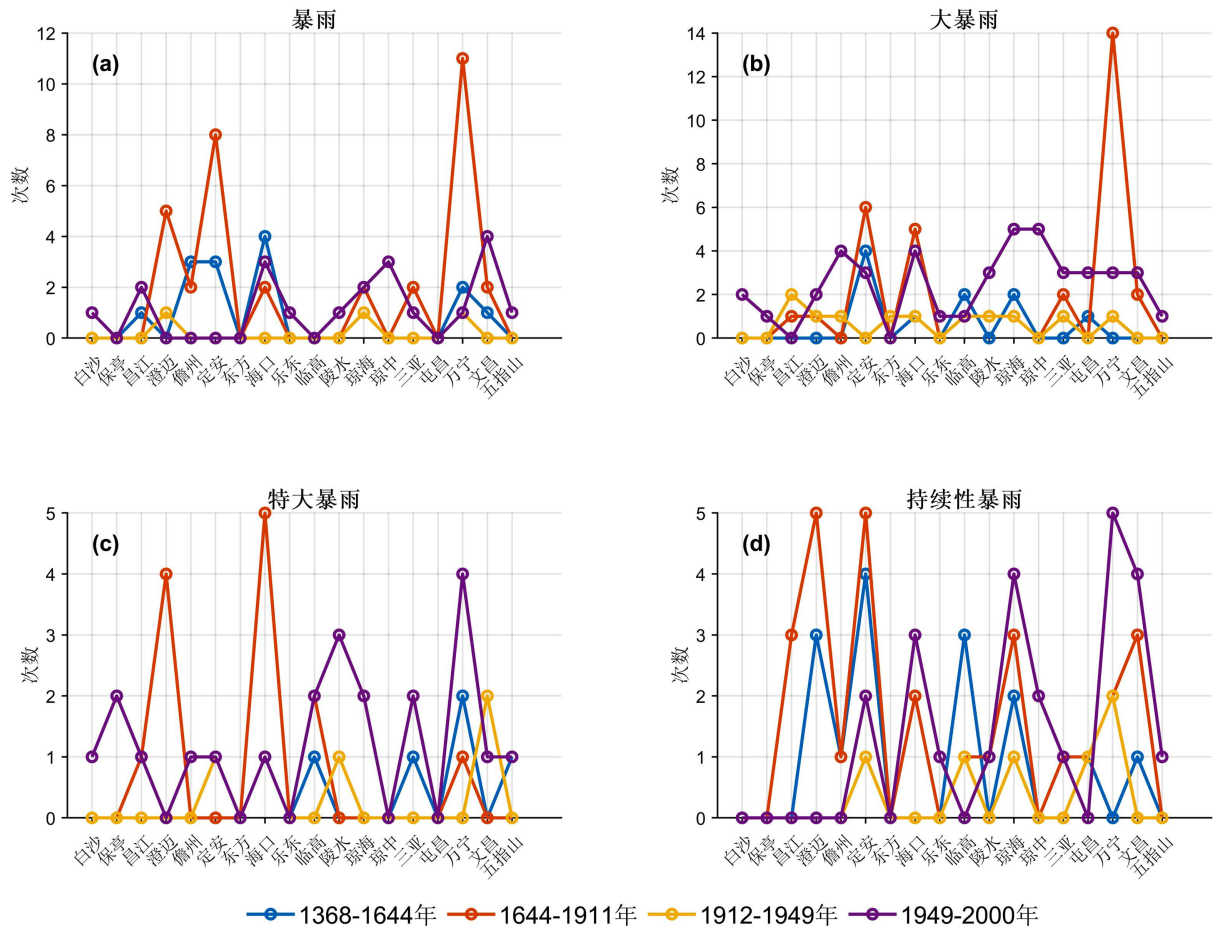


Figure 3. Distribution of rainstorm events of different intensities across cities in Hainan Island during different historical periods

图 3. 海南岛各城市不同时期不同等级暴雨事件的统计分布

3.4. 海南岛暴雨事件对 ENSO 的响应特征分析

图 4 所示,暴雨事件在时间上高度聚集于 ENSO 指数为正的阶段,表现出明显的相位响应特征。1870~2000 年期间共记录到 132 次暴雨事件,其中有 52 个月份发生过暴雨,其中有 48 个月(占比 92.3%)出现在 ENSO 指数高于 0°C 的暖相位阶段,表明暴雨事件高度集中于 ENSO 偏暖时期。这一现象表明海南地区暴雨对 ENSO 具有显著响应性与相位依赖性。ENSO 暖相位时期显著提升了海南地区暴雨事件的发生频率,ENSO 波动对区域极端降水具有主导作用。在 ENSO 冷相位(指数低于 0°C)期间,暴雨事件发生频率明显减少,进一步加强了二者之间的相关性。这种趋势揭示了 ENSO 指数不仅与暴雨事件发生的数量密切相关,而且与其时序分布结构具有较强耦合特征。

进一步分析得出,在典型强厄尔尼诺年份(如 1880~1881 年、1940~1941 年、1982~1983 年、1997~1998

年)前后,暴雨次数显著增多。图中暴雨柱状图在 ENSO 峰值期间常伴随密集分布,部分时段显示出 ENSO 指数变化与暴雨事件响应之间存在约 1~3 个月的滞后,表明热带太平洋海温异常对海南地区降水极端性的影响并非即时,而具有一定的传递过程。

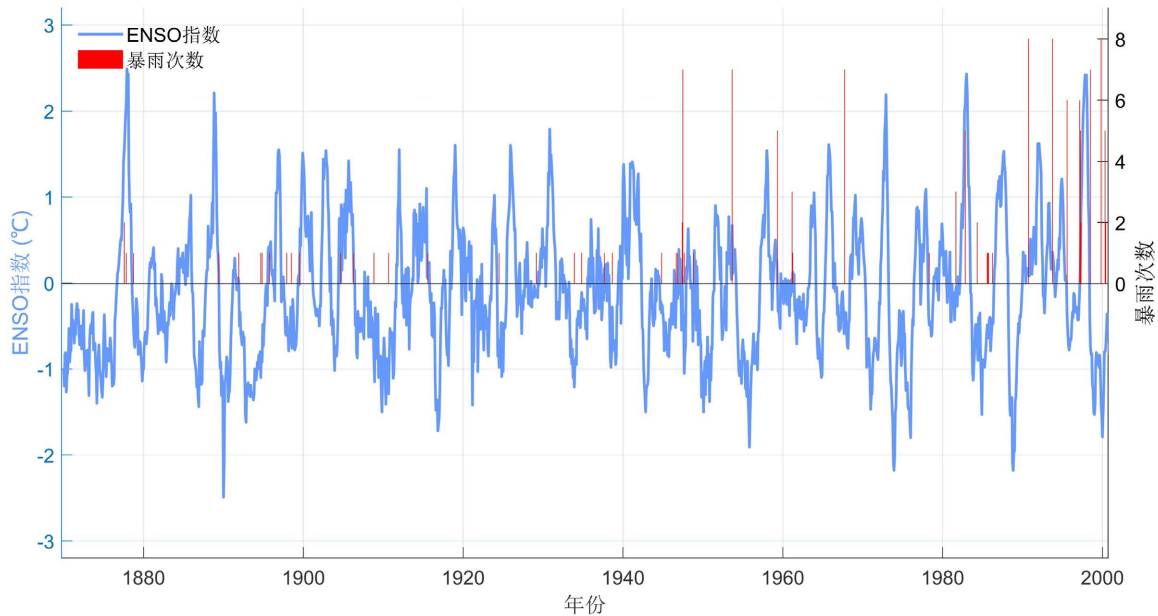


Figure 4. Time series of ENSO index and rainstorm events in Hainan Island (1870~2000 year)
图 4. ENSO 指数与海南岛暴雨事件时间序列图(1870~2000 年)

4. 结论

本研究通过系统整合历史文献资料,重建了海南岛 1368~2000 年间的暴雨受灾连续序列,现有以下结论:

- 1) 海南岛暴雨事件主要集中在 5~10 月,9~10 月尤为频繁。1949~2000 年间,10 月暴雨次数高达 24 次,显著高于历史同期,表明现代时期暴雨事件频率和季节波动性均有增强,反映区域极端降水过程的不稳定性上升。
- 2) 空间分布上,万宁市在暴雨事件发生次数和类型上显著高于其他市县,暴雨和大暴雨占主导地位,数量达 33 起,占总暴雨的 67%。反映其受地形与气候条件双重影响显著。暴雨和大暴雨为主要类型,占总事件数的主导地位,区域差异性明显。
- 3) 清朝期间海南岛各城市(如定安、万宁、琼中和海口)在大暴雨、特大暴雨和持续性暴雨等级中的事件发生次数普遍较高。明朝和民国由于气候条件变化、监测技术不足以及数据记录不完整,导致暴雨事件发生次数显著减少。进入现代,随着气象观测技术的进步和气候变化的影响,一些城市(如海口、文昌和琼中)在部分类型暴雨等级中的事件频次有所增加,但总体仍低于清朝水平。
- 4) 1870~2000 年间,92.3%的暴雨月份发生于 ENSO 指数为正的暖相位阶段,显示出显著的相位响应性。暴雨事件在典型强厄尔尼诺年份显著增多,表明 ENSO 暖相位对海南极端降水具有增强效应。

基金项目

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

参考文献

- [1] 徐宗学, 陈浩, 任梅芳, 等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 713-724.
- [2] Li, W.G., Zhang, J.H., Liu, S.J., Che, X.F., *et al.* (2022) Meteorological Characteristics and Monitoring Index of Drought in Hainan Island. *Journal of Tropical Biology*, **13**, 324-330.
- [3] 吴慧, 胡德强, 邢彩盈, 等. 海南岛夏季不同类型降水特征及其对旱涝的影响[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(5): 558-563.
- [4] 吴梦雯, 罗亚丽. 中国极端小时降水 2010-2019 年研究进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 502-514.
- [5] 贺山峰, 李铮, 陈超冰, 等. 海南省登陆台风特征演变及其危险性分析[J]. 地理科学进展, 2023, 42(7): 1355-1364.
- [6] 聂超甲, 叶回春, 张世文, 郭佳炜, 崔贝, 黄文江. 海南岛农业台风灾害风险评估与可持续发展对策[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 237-246.
- [7] 陈小敏, 李伟光, 梁彩红, 等. 海南岛主要农业气象灾害特征及防御措施分析[J]. 热带生物学报, 2022, 13(4): 416-421.
- [8] Kim, J.B. and Bae, D.H. (2020) Intensification Characteristics of Hydroclimatic Extremes in the Asia Monsoon Region under 1.5 and 2.0 C of Global Warming. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, **2020**, 1-30.
- [9] Du, H., Donat, M.G., Zong, S., Alexander, L.V., Manzanar, R., Kruger, A., *et al.* (2022) Extreme Precipitation on Consecutive Days Occurs More Often in a Warming Climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **103**, E1130-E1145. <https://doi.org/10.1175/bams-d-21-0140.1>
- [10] Hu, P., Chen, B. and Shi, P.J. (2021) Spatiotemporal Patterns and Influencing Factors of Rainstorm-Induced Flood Disasters in China. *Acta Geographica Sinica*, **76**, 1148-1162.
- [11] 柯元惠, 马明明, 符传博, 等. 海南岛强降水特征及降水极值重现期分析[J]. 气象与环境科学, 2022, 45(5): 15-22.
- [12] Zhu, Z., Gou, L., Liu, S. and Peng, D. (2023) Effect of Urban Neighbourhood Layout on the Flood Intrusion Rate of Residential Buildings and Associated Risk for Pedestrians. *Sustainable Cities and Society*, **92**, Article 104485. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104485>
- [13] 刘丙军, 傅健宇, 梁曼琳, 等. 珠江流域旱涝急转灾害时空演变趋势分析[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(6): 12-19+45.
- [14] 王孝慈, 李双君, 孟英杰. 2016-2020 年 6-7 月长江流域主要暴雨过程特征及差异性分析[J]. 干旱气象, 2021, 39(6): 921-929.
- [15] 屠佳雨, 高抒, 周亮, 等. 海南岛东部台风重现期及其时空分布特征[J]. 第四纪研究, 2016, 36(1): 184-195.
- [16] 陆桂荣, 王文, 郑美琴, 等. 海南台风暴雨的时空分布特征[J]. 大气科学学报, 2015, 38(5): 710-715.
- [17] Feng, W., Fu, S.H. and Zhao, F.Z. (2015) Circulation of Extreme Rainstorm and Its Anomalous Characteristics during Post-Flood Period of the Last Decade in Hainan Island. *Meteorological Monthly*, **41**, 143-152.
- [18] 梁有叶, 张德二. 最近一千年来我国的登陆台风及其与 ENSO 的关系[J]. 气候变化研究进展, 2007(2): 120-121.
- [19] Penalba, O.C. and Rivera, J.A. (2016) Precipitation Response to El Niño/la Niña Events in Southern South America—Emphasis in Regional Drought Occurrences. *Advances in Geosciences*, **42**, 1-14. <https://doi.org/10.5194/adgeo-42-1-2016>
- [20] Ward, P.J., Eisner, S., Flörke, M., Dettinger, M.D. and Kummerow, M. (2014) Annual Flood Sensitivities to El Niño-Southern Oscillation at the Global Scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, **18**, 47-66. <https://doi.org/10.5194/hess-18-47-2014>