

基于史料的海南岛历史干旱时空分布

李瑞娟¹, 宁嘉泉¹, 邢益航¹, 杨德石¹, 徐静颖¹, 尚 明², 吴 晶³, 焦 悅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12月29日; 录用日期: 2026年1月28日; 发布日期: 2026年2月10日

摘要

气候变化背景下, 理解热带地区长时段的干旱演变规律对于评估未来风险至关重要。本研究基于《中国气象灾害大典·海南卷》, 通过建立标准化的强度等级与结构类型划分体系, 分析了海南岛公元805年至2000年的干旱历史。结果表明: 1) 在时间上, 干旱事件的发生频率呈显著上升趋势。但是由于史料记载完整性的影响, 早期(如唐代)的干旱记录可能严重低估。若以“有记录年份中的干旱发生比例”进行估算, 仍可观察到干旱频率自明清以来明显增加, 并在现代(1949~2000年)达到高峰, 年均记录频率为2.04次/年。2) 从干旱强度上看, 干旱强度已经从单季节性干旱为主转为现代跨季节连续性干旱为主。其中, 连续性干旱(≥ 2 季)转变为“大旱”强度的概率(即在整个时期内, 连续性干旱中达到“大旱”强度的事件数占连续性干旱总事件数的比例)为95.2%, 远高于单季节干旱转变为“大旱”强度的70.7%。3) 在空间上, 东部以单季节干旱(占东部全部干旱事件的44.1%)为主, 西部(三季连旱占西部总干旱事件的47.9%)和南部(三季连旱占南部总干旱事件的46.7%)以长期干旱为主, 而北部的单季节干旱、两季连旱和三季及以上连旱的发生频率较为均衡(分别占北部总干旱事件的34%、33%和33%), 三种干旱类型的分布比例相对接近。整体形成了以西部沿海为核心的、以长周期结构性干旱为主的重灾区。从文献记录分析, 海南的旱灾已从偶发季节性威胁演变为常态化、结构性持续干旱为特征的系统性风险, 但早期史料缺失可能会影响结果的客观性。

关键词

季风系统, 历史演变, 区域异质性, 持续干旱, 气候变化, 水资源风险

Spatiotemporal Distribution of Historical Droughts on Hainan Island Based on Historical Records

*通讯作者。

Ruijuan Li¹, Jiaquan Ning¹, Yihang Xing¹, Deshi Yang¹, Jingying Xu¹, Ming Shang²,
Jing Wu³, Yue Jiao¹, Chenxiao Shi^{4*}, Lei Bai^{1,5*}

¹School of Ecology, Hainan University, Haikou Hainan

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

³Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou Gansu

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

⁵Hainan Smart Low Atmosphere Meteorological Big Data Research Center, Haikou Hainan

Received: December 29, 2025; accepted: January 28, 2026; published: February 10, 2026

Abstract

Against the backdrop of climate change, understanding the long-term evolution of drought patterns in tropical regions is crucial for assessing future risks. This study, based on the Encyclopedia of Meteorological Disasters in China: Hainan Volume, analyzes the drought history of Hainan Island from 805 to 2000 AD by establishing a standardized classification system for drought intensity and structural types. The results indicate that: 1) Temporally, the frequency of drought events shows a significant increasing trend. However, due to limitations in the completeness of historical records, early drought documentation (e.g., during the Tang Dynasty) may be substantially underestimated. When estimated based on the “proportion of years with recorded droughts”, a clear increase in drought frequency is still observable from the Ming and Qing dynasties onward, peaking in the modern period (1949~2000) with an average annual recorded frequency of 2.04 events per year. 2) In terms of drought intensity, the dominant pattern has shifted from single-season droughts to modern multi-season continuous droughts. The probability of continuous droughts (lasting ≥ 2 seasons) intensifying into “severe droughts”—defined as the proportion of continuous drought events that reached severe intensity relative to the total number of continuous droughts over the entire period—is 95.2%, significantly higher than the 70.7% probability for single-season droughts. 3) Spatially, the eastern region is primarily characterized by single-season droughts (accounting for 44.1% of all drought events in the east), while the western (47.9% as three-season droughts) and southern (46.7% as three-season droughts) regions are dominated by prolonged droughts. The northern region shows a relatively balanced distribution among single-season droughts, two-season consecutive droughts, and droughts lasting three or more seasons (34%, 33%, and 33%, respectively), with the three types occurring in comparable proportions. Overall, a high-risk zone centered on the western coast has formed, characterized by long-term structural droughts. Analysis of historical records suggests that drought disasters in Hainan have evolved from occasional seasonal threats into systemic risks marked by normalized, structurally persistent droughts. However, the absence of early historical materials may affect the objectivity of the findings.

Keywords

Monsoon System, Historical Evolution, Spatial Heterogeneity, Persistent Drought, Climate Change, Water Resource Risks

Copyright © 2026 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

在全球气候变化背景下,理解过去气候变化的规律,已成为应对未来气候变化挑战的迫切需求[1][2]。但现代观测记录时间覆盖长度有限,难以反映极端事件(如干旱)的长期规律[3]。因此,古气候资料重建成为延伸现有观测资料的关键。气候重建主要利用两类资料:一是树木年轮、冰芯、湖沼沉积、石笋等代用资料[4][5];二是在历史时期人类活动留下的各类文字记录[6]。

近些年,基于树轮数据已重建了亚洲季风区过去数百年的干旱历史[7][8]。刘禹等人利用中国大范围的树轮资料,重建了中国地区过去三百年的干旱指数[9]。除了树轮,中国拥有世界上连续时间最长、内容最为丰富的历史文献(如地方志和个人日记等),为古气候重建提供了参考资料[10][11]。这些文献以文字形式记录了大量气候异常现象(旱、涝、冷、暖等),具有相对较高的时空分辨率[12]。

上个世纪竺可桢利用历史文献重建中国近五千年气候变化[13],随后又有旱涝事件重建研究[14][15],已成功构建了覆盖全国范围的长时间序列旱涝数据集[16]-[18]。随后,区域性历史干旱演变研究也日益深入。例如,在华东地区,针对长江三角洲的研究揭示了该区域过去千年干旱事件的发生频率和强度存在显著的年代际波动[19][20]。在华北地区,识别出多个干旱高发期[21][22]。

海南岛作为中国最南端的热带大型岛屿,其气候系统对海温变化、季风进退及热带气旋活动极为敏感[23]。独特的地理位置和地形造就了岛内显著的气候时空差异[24]。现有的研究多侧重于应用现代气象观测数据分析干旱事件,缺乏长时间序列数据分析海南岛干旱事件的年代际时空变化特征,如干旱事件是否在频率、强度上呈现趋势性变化?其干旱类型是否从单一的季节性干旱,演变为更为复杂的跨季节、多年度的“复合型干旱”?不同区域的干旱演变是否存在显著差异?这些问题的解答,对于全面评估海南岛的气候脆弱性与适应性至关重要。

为此,本研究整理文献资料构建了公元 805 年至 2000 年海南岛历史干旱事件数据库。通过建立标准化的干旱等级评定体系,分析 1200 年间干旱事件在时间尺度上的频率、强度和类型结构的演变规律,并深入分析其空间分布的异质性及其动态演化,为理解现代气候变化背景下海南岛日益严峻的干旱风险提供科学依据。

2. 数据与方法

2.1. 资料来源与数据库构建

本研究数据源于《中国气象灾害大典·海南卷》,该文献整合了《海南省志·气象志》《海南岛志》《琼山县志》《琼州志》以及《广东省自然灾害史料》《海南省千年自然灾害史料集》等二十余部地方志、灾害汇编及史料集。这些文献覆盖了从宋代至现代历史记录,内容涵盖官方灾情报告、农业损失评估与社会救灾记录。在数据处理流程中,本研究采用光学字符识别(OCR)技术对纸质文献进行批量数字化。随后,应用自然语言处理(NLP)技术,借助 Python 编程语言及其 NLTK (Natural Language Toolkit)库,对数字化文本进行自动化的分词、去噪和关键信息提取。针对宋至清时期的史料,将文献中的农历时间统一转换为公历,以保证时间基准的一致性。最终,每一条有效的干旱记录被整理为包含时间、地点、持续季节、强度等级、灾情描述等核心字段的标准化条目,构成了结构化的海南历史干旱事件数据库。为遵循开放科学原则,该数据库已通过 Zenodo 平台公开共享(DOI: 10.5281/zenodo.14979189)。

2.2. 干旱事件的分类与等级评定

为实现对异质历史记录的量化分析,本研究建立了一套包含强度等级和结构类型的双重分类体系。

2.2.1. 强度等级评定

本文基于历史文献记载的特点,采用综合分级法对干旱事件的严重程度进行划分。评定过程结合了

文献描述、社会影响及灾害范围等多个维度: a) 文献中提及“小旱”、“轻旱”等, 且无明确社会灾害影响的记录, 辨识为小旱。b) 文献中提及“旱”或“干旱”, 并记录有民众饥饿、水源短缺、作物减产或局部救灾行动, 辨识为中旱。c) 文献中明确记载“大旱”、“亢旱”, 或描述了严重社会后果, 如人口死亡(“饿殍遍野”)、粮价暴涨、水源枯竭(“井泉干涸”)、大范围作物绝收(“颗粒无收”)以及政府大规模赈灾等, 辨识为大旱。在综合评定中, 若多个指标冲突, 优先选择灾害影响程度更高的等级。

2.2.2. 结构类型划分

为深入分析干旱的持续性特征, 本研究依据干旱事件所跨越的时间, 将其划分为不同的强度类型。

1) 仅在春、夏、秋、冬某一个季节内发生的干旱事件, 为单季节干旱。2) 指持续时间跨越两个或两个以上季节的干旱事件, 为连续性干旱。根据其持续时间, 又可进一步细分为: a) 两季连旱(如“冬连春旱”、“春连夏旱”等); b) 三季连旱(如“秋连冬春旱”、“春连夏秋旱”等); c) 四季及以上连旱(包含所有持续四个及以上季节的极端干旱)。

2.3. 气候季相划分

为更精准地揭示单季节干旱的发生规律, 本研究不使用传统的温带“四季”划分, 采用了更符合海南热带季风气候特征的“旱季-雨季-过渡季”三季时间划分方法。这样能更好地反映主导季风转换所带来的气候节律变化。具体如下: a) 每年 11 月至次年 4 月为旱季。该时期受干冷的大陆冬季风控制, 降水稀少。原始记录中的“冬旱”与“春旱”事件被归入此类。b) 定义为每年 5 月至 9 月为雨季。该时期受湿热的南海夏季风和台风影响, 降水集中。原始记录中的“夏旱”事件被归入此类。c) 每年 10 月为过渡季。该时期是夏冬两季主导风系转换的月份, 气候不稳定。原始记录中的“秋旱”事件被归入此类。

2.4. 空间分析单元的界定

历史文献中的干旱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精确对应。本研究依据《中国历史地图集》及相关地方志, 考订了如“崖州”对应“三亚市”、“感恩”对应“东方市”、“琼山”对应“海口市”等古今地名关系。在完成地名考订的基础上, 为更好地揭示干旱分布的空间格局, 本研究参考海南岛的自然地理分区与气候特征, 将涉及的市县进一步归入五个分析区域: 1) 东部沿海: 文昌、琼海、万宁; 2) 西部沿海: 东方、昌江、澄迈、儋州; 3) 北部沿海: 海口(琼山)、定安、临高; 4) 南部沿海: 三亚、陵水、乐东; 5) 中部山区: 琼中、屯昌、五指山、保亭、白沙。

3. 结果

3.1. 海南历史干旱的时间分布特征

表 1 的数据展示了海南历史干旱的发生频率和强度。首先, 从干旱事件发生频率上看, 干旱事件的发生变得越来越高。受史料保存与记录体系的时代差异影响, 唐代至元代的干旱记录极为稀疏, 年均记录频率低于 0.06 次/年, 可能无法完全反映实际干旱情况。自明代起, 随着文献记载逐渐系统化, 干旱记录频率呈现上升趋势, 清代年均 0.33 次/年, 至现代(1949~2000 年)达到 2.04 次/年。这一变化既可能反映干旱实际频次的增加, 也与史料记录完整性的提升有关。其次, 从强度构成上看, 干旱事件的性质也发生了根本性转变, 即从零星发生转变为以“大旱”为主导的灾害模式。在明代之前的时期, 干旱事件稀少且强度不一。但自明代(1368~1644 年)起, “大旱”在所有干旱记录中占据了绝对主导地位(“大旱”强度占比 86.1%)。在明、清、近现代及现代这四个连续的历史时期中, “大旱”在总干旱事件中的占比分别为 86.1%、79.8%、95.8% 和 89.4%。值得注意的是, “大旱”事件的绝对数量从明代的 31 次, 增加至清代的 71 次, 并在现代增加到 93 次。可以看出, 海南的干旱灾害正经历一个频率和强度同步增长的放大过程。

Table 1. Frequency, intensity, and structural evolution of historical droughts in Hainan (805~2000 AD)
表 1. 海南历史干旱的频率、强度与结构演变(805~2000 年)

时期	时间跨度 (年)	干旱事件总数 (n)	小旱(n)	中旱(n)	大旱(n)	年均频率 (次/年)	大旱占比 (%)
唐代	805~907	1	1	0	0	0.010	0
宋代	960~1279	2	1	0	1	0.006	50.0
元代	1279~1368	5	0	4	1	0.056	20.0
明代	1368~1644	36	0	5	31	0.130	86.1
清代	1644~1911	89	3	15	71	0.333	79.8
近现代前期	1911~1949	24	0	1	23	0.632	95.8
现代	1949~2000	104	1	10	93	2.040	89.4

在表 2 中展示了海南岛的干旱模式在过去千年中从单一、孤立的季节性事件，转变为以多季节、长周期连续性事件为主导。在明代以前近 600 年间，历史文献中记载的干旱全部为单季节干旱，表明早期的干旱系统缺乏持续性。转折点出现在明代(1368~1644 年)，该时期首次记录了占比达 33.3% 的连续性干旱。这一趋势在随后数百年间持续强化，到现代(1949~2000 年)，单季节干旱的比例已降至仅 22.1%，而由两季、三季及四季以上连旱构成的连续型干旱占据了 77.9% 的绝对主导地位。其中，“两季连旱”(39 次)和“三季连旱”(37 次)在现代的明显增加。

Table 2. Duration distribution of different types of drought events in Hainan (805~2000 AD)
表 2. 海南不同类型干旱事件的历时分布(805~2000 年)

时期	时间跨度(年)	总计(n)	单季节干旱	两季连旱**	三季连旱**	四季及以上 连旱***	连旱占比 (%)
唐代	805~907	1	1	0	0	0	0
宋代	960~1279	2	2	0	0	0	0
元代	1279~1368	5	5	0	0	0	0
明代	1368~1644	36	24	6	2	4	33.3
清代	1644~1911	89	53	21	4	11	40.4
近现代前期	1911~1949	24	8	7	5	4	66.7
现代	1949~2000	104	23	39	37	5	77.9
总计(n)		261	116	73	48	24	55.6

注：1) *表示两季连旱，包括冬连春旱、春连夏旱、秋连冬旱、夏连秋旱。2) **表示三季连旱，包括春连夏秋旱、秋连冬春旱、冬连春夏旱。3) ***表示四季及以上连旱，指所有持续时间超过三个季节的极端干旱事件。

3.2. 海南历史干旱的类型特征

表 3 是更符合海南热带季风气候特征的“旱季 - 雨季 - 过渡季”时间划分的干旱强度特征，旱季(11 月~次年 4 月)是海南干旱灾害最主要、最核心的爆发期。在此期间，共记录了 80 次干旱，占所有单季节干旱的 69.0%，其中旱季干旱的强度极为强烈，“大旱”强度的干旱占比高达 78.8%，这与该时期

受干冷大陆冬季风稳定控制、水汽输送严重不足的背景相符,生态系统脆弱,极易发生重度干旱。雨季(5月~9月)期间的干旱则呈现出不同的特征。其发生频率(28次)远低于旱季,但强度依然不容小觑,“大旱”占比达到了60.7%。这表明雨季干旱属于“常态”事件,通常由南海夏季风阶段性中断、副热带高压异常强盛或台风活动“空窗”等因素引发,它代表了在丰水背景下更为极端的气候异常。过渡季(主要指秋季)的干旱特征尤为独特。其发生频率最低(仅8次),且强度也最弱,“大旱”占比仅为25.0%,多以中旱为主。

Table 3. Three-season climatic rhythm and intensity characteristics of single-season droughts in Hainan
表3. 海南单季节干旱的三季气候节律与强度特征

气候季相	对应季节	总计(n)	小旱(n)	中旱(n)	大旱(n)	占单季干旱比例(%)	大旱占比(%)
旱季干旱	(冬、春)	80	3	14	63	68.97%	78.75%
雨季干旱	(夏)	28	2	9	17	24.14%	60.71%
过渡季干旱	(秋)	8	0	6	2	6.90%	25.00%
总计(n)		116	5	29	82	100%	70.69%

如表4所示,干旱的持续时间与致灾强度之间存在显著的正相关性。单季节干旱类型中虽然大旱占比已达70.7%,但一旦突破季节界限演变为连续性干旱。在145次连续性干旱事件中,大旱比例激增至95.2%。这种强度随持续时间增长在不同类型的连续性干旱中表现得更为突出。持续时间最短的“两季连旱”中,大旱比例已升至90.4%,显著高于单季节干旱水平。而当干旱持续时间达到或超过三个季节时,包括“三季连旱”(48次)、“四季连旱”(9次)以及“长周期极端干旱”(15次)在内的所有72次事件全部为“大旱”(大旱占比100%)。连续性的出现使得强度较弱的小旱和中旱事件发生概率被极大压缩,在连续性干旱中小旱和中旱合计仅占4.8%,绝大多数事件都直接演变为最具破坏力的大旱等级。从发生频率来看,“两季连旱”(66次)和“三季连旱”(48次)是海南最主要的连续性干旱模式,合计占连续性干旱总数的78.6%。

Table 4. Correlation analysis of duration and intensity of different types of droughts in Hainan
表4. 海南不同类型干旱的持续时间与强度关联分析

干旱类型	总数(n)	小旱(n)	中旱(n)	大旱(n)	大旱占比(%)
单季节干旱	116	5	29	82	70.69%
连续性干旱(≥ 2 季)	145	1	6	138	95.17%
两季连旱	73	1	6	66	90.41%
三季连旱	48	0	0	48	100%
四季连旱	9	0	0	9	100%
长周期极端干旱(≥ 5 季)	15	0	0	15	100%
总计(n)	261	6	35	220	84.29%

注:1)两季连旱,包含冬连春、春连夏、秋连冬、夏连秋等类型。2)三季连旱,包含春连夏秋、秋连冬春、冬连春夏等类型。3)四季连旱,包含春连夏秋冬等类型。4)长周期极端干旱,指所有持续时间达到或超过五个季节的极端复合型干旱事件。5)大旱占比(%),指该等级干旱中“大旱”事件所占的百分比,用以衡量其平均致灾强度。

3.3. 海南历史干旱的空间分布特征

海南岛的干旱事件空间上并非均匀分布,而是呈现出由地形和季风环流共同塑造的显著空间异质性,形成了以西部沿海为核心、不同区域特征鲜明的旱灾格局。如表 5 所示,位于海岛西部的东方市、昌江县及北部的澄迈县是全岛旱灾最严峻的区域,其“大旱”强度干旱事件占比均超过 90%,澄迈更是达到 95.5%。更值得注意的是,这些地区的主导干旱结构均以持续时间长的“三季连旱”和“两季连旱”为主。这深刻地反映了海南西部在“雨影效应”下水汽输送的先天劣势,极易形成贯穿整个干季的、破坏力极强的结构性极端干旱。而东部和北部的大部分地区(如琼山、定安、万宁等),虽然大旱占比同样处于高位,但其主导的干旱结构则以“单季节干旱”与“两季连旱”的组合为主。这表明这些迎风坡地区的干旱风险,更多源于特定季节(尤其是冬春之交)的季风环流异常和短期降水亏缺,而非西部的“常态化”结构性缺水。南部的三亚则表现出高度的复杂性,其干旱结构涵盖了从单季节到三季连旱的多种类型,反映了其独特的热带海洋性气候背景下多重致灾因子的共同作用。这种从西向东,干旱主导结构由“长周期持续型”向“短周期季节型”过渡的空间分异格局,揭示了海南干旱灾害的多重驱动机制。

Table 5. Spatial differentiation patterns of drought intensity and structure in Hainan's historical droughts

表 5. 海南历史干旱的强度与结构空间分异格局

地理分区	地区(古称)	总数(n)	大旱次数(n)	大旱占比(%)	主导干旱结构
西部沿海	东方(感恩)	58	54	93.10%	三季连旱
	昌江(昌化)	53	49	92.45%	三季连旱、单季节干旱
	澄迈	44	42	95.45%	三季连旱、两季连旱
北部沿海	临高	56	50	89.29%	两季连旱、单季节干旱
	定安	64	54	84.38%	单季节干旱、两季连旱
	琼山	73	61	83.56%	单季节干旱
东部沿海	文昌	37	32	86.49%	两季连旱、单季节干旱
	琼海(会同、乐会)	33	31	93.94%	单季节干旱、两季连旱
	万宁(万州)	56	49	87.50%	单季节干旱、两季连旱
南部沿海	三亚(崖州)	55	50	90.91%	三季连旱、两季连旱、单季节干旱

注: 1) 主导干旱结构,指在该地区发生频率最高的干旱类型,按照其持续时间归入标准分类(单季节、两季连旱、三季连旱等)。2) 为确保区域间比较的有效性,本表剔除了一条数据来源与构成均存在特殊性的“其他地区”记录(113 次事件,其中小旱 102 次)。3) “全岛大部分地区”、“大部分地区”、“14 个市县”、“12 个市县”、“全岛”、“全岛各地”、“10 个市县”、“15 个市县”、“11 个市县”等,未明确指明具体位置,已将这些地区统计纳入西部沿海、北部沿海、东部沿海和南部地区的相关市县中。

3.4. 海南历史干旱的时空演变分析

在表 6 中,西部沿海不仅现代时期的干旱总数(90 次)远超其他地区,其干旱结构也最为恶劣,“三季及以上”的极端连旱在总数中占比高达 53%(现代时期),是东部沿海(33%)的近两倍。空间上,东部沿海主要以单季节干旱为主(全部时期 56 次,占东部沿海总“干旱”次数的 44%),西部沿海则以长期干旱为主(全部时期“三季及以上连旱”次数为 56 次,占西部沿海总“干旱”次数的 48%),北部地区的干旱

类型相对均衡(单季节干旱、两季连旱和三季及以上连旱的发生频率分别为34%、33%、33%)三种干旱类型的比例接近,南部地区则更偏向于长期性干旱(“三季及以上连旱”为35次,占南部沿海总“干旱”次数的47%)。所有区域无一例外地呈现出干旱事件向现代急剧集中的趋势。作为干旱结构复杂化标志的“两季连旱”和“三季及以上连旱”,在绝大多数地区都是在现代时期才出现明显增长。例如,中部山区的“两季连旱”从几乎为零到现代记录27次,北部的“两季连旱”也从清代的12次激增至现代的29次(清代记录时间约300年,现代记录时间约50年)。这表明,近现代气候变化驱动的旱灾结构复杂化是全岛范围内的普遍现象,而非局限于某一特定区域。综上,历史上东部和北部是干旱的主要发生区,且以季节性干旱为主;西部沿海地区的干旱事件较少,《海南岛志》记载西部地形复杂、多山且气候干燥,水资源匮乏,导致该地区农业开发困难,人口稀少,干旱记录也相对有限。现代以来,西部不仅成为干旱事件发生最多的区域,还以长周期连旱为主导,成为风险最集中的干旱核心区。同时,中部等原本低风险区的干旱事件也开始增加,浮现出新的风险点。

Table 6. Spatiotemporal evolution patterns of drought types in Hainan by sub-region (Ming Dynasty-Present)
表 6. 海南各区域干旱类型的时空演变格局(明代-现代)

地理分区	干旱结构分类	明代	清代	近现代前期	现代	总计
东部沿海	单季节干旱	13	30	3	10	56
	两季连旱	3	11	5	23	42
	三季及以上连旱	3	7	3	16	29
	分区小计	19	48	11	49	127
西部沿海	单季节干旱	2	6	2	16	26
	两季连旱	1	4	4	26	35
	三季及以上连旱	1	5	2	48	56
	分区小计	4	15	8	90	117
南部沿海	单季节干旱	1	6	0	10	17
	两季连旱	0	3	1	19	23
	三季及以上连旱	0	2	1	32	35
	分区小计	1	11	2	61	75
北部沿海	单季节干旱	11	18	4	16	49
	两季连旱	2	12	4	29	47
	三季及以上连旱	2	8	2	36	48
	分区小计	15	38	10	81	144
中部山区	单季节干旱	1	0	1	11	13
	两季连旱	0	0	4	27	31
	三季及以上连旱	0	1	1	22	24
	分区小计	1	1	6	60	68

续表

	单季节干旱	28	60	10	63	161
全岛合计	两季连旱	6	30	18	124	178
	三季及以上连旱	6	23	9	154	192
	总计	40	113	37	341	531

注: 1) 数据为各时期、各区域记录的干旱事件次数。为确保一致性与可比性, 对干旱类型进行了标准化归类。2) 干旱结构分类: 单季节干旱指仅持续一个季节的干旱; 两季连旱指持续两个季节的干旱; 三季及以上连旱包含所有持续三个及以上季节的复合型、长周期干旱。3) “全岛大部分地区”、“大部分地区”、“14个市县”、“12个市县”、“全岛”、“全岛各地”、“10个市县”、“15个市县”、“11个市县”等表述未明确具体位置, 这些统计数据已包含在西部沿海、北部沿海、南部沿海和中部地区的干旱情况统计中。

4. 讨论

受早期史料记载不完整的影响, 唐代至宋代的干旱记录极为有限, 难以准确反映该时期干旱的实际发生频率。因此, 本研究在分析长期趋势时, 重点依据明清以来文献相对丰富、记录较为连续的时段。自明代以来, 干旱记录频率呈现明显上升趋势, 事件结构也逐渐复杂化。至现代(1950年后), 干旱表现为高频次、长周期、强影响的特征, 其年均记录频率较明清时期也呈现数量级式的增长。同时, 干旱的结构发生了根本性质变化: 从完全由单季节干旱构成, 演变为以跨季节“连续性干旱”为主导的复合模式, 其占比在现代已接近80%。

与此同时, 海南的干旱风险在空间上呈现出显著的异质性, 形成了以西部沿海为核心的重灾区格局。位于“雨影区”的西部地区, 不仅干旱总频次高, 其强度和复杂度更是全岛之最。“大旱”占比超过90%, 且干旱结构以持续时间最长的“三季连旱”为主。相比之下, 东部沿海的干旱结构则以“单季节”和“两季连旱”为主, 其风险更多与季节性的季风环流异常有关, 而非西部的结构性缺水。这种从西到东, 干旱主导模式由“长周期持续型”向“短周期季节型”的过渡, 是地形与气候环流交互作用的直接体现。这一空间分异格局的识别, 对于制定因地制宜、分区施策的抗旱方略, 如西部强化战略水资源储备、东部侧重季节性预警, 具有至关重要的指导意义。

本研究仍存在局限性, 基于历史文献的重建不可避免地存在记录不均和描述主观性的问题; 对于驱动机制的探讨也更多是基于统计关联, 精确的定量归因尚有不足。因此, 未来的研究方向应着重于多源代用资料(如树轮、湖芯等)的交叉印证, 并借助气候模型进行模拟与归因分析, 以更精确地剥离自然与人为因子。

5. 结论

本研究通过对海南岛长达一千二百年的历史文献进行系统性重建与分析, 得出以下主要结论:

- 1) 基于史料分析, 海南岛的干旱灾害在史料相对完整的明清以后呈现加剧趋势。干旱事件的被记录频率在近现代(1911~1949年)显著升高, 并在现代(1950~2000年)出现数量级式的跃升。此外, 在可考的记载中, 高强度的“大旱”事件始终占据主导地位。
- 2) 比频率和强度的增加更为深刻的, 是海南干旱类型的结构性转变。研究发现, 海南的干旱模式已从历史时期以“单季节干旱”(尤其是春旱)为主的简单结构, 演变为现代以跨季节、长周期的“连续性干旱”为主导的复杂结构。这一转变的本质是旱灾“持续性”的系统性增强。
- 3) 海南的干旱风险在空间上呈现出显著且稳定的分异格局。以地形“雨影效应”和人类活动共同主导的西部沿海地区, 是全岛的“干旱核心区”, 其干旱事件不仅强度最高, 且结构上以持续时间最长的

“三季连旱”为主，呈现出典型的结构性缺水风险。相比之下，东部沿海的干旱则更多表现为与季风环流异常相关的“单季节”和“两季连旱”模式。

基金项目

国家自然科学基金项目(32260294)；海南省自然科学基金项目(423QN317, 425RC692)；海南大学科研基金资助项目[KYQD(ZR)-22083]。

参考文献

- [1] IPCC (2023) Climate Change 2021—The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- [2] 葛全胜, 郑景云, 郝志新, 等. 过去 2000 年中国气候变化研究的新进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1248-1258.
- [3] Dai, A. (2010) Drought under Global Warming: A Review. *WIREs Climate Change*, **2**, 45-65. <https://doi.org/10.1002/wcc.81>
- [4] Jones, P.D., Briffa, K.R., Barnett, T.P. and Tett, S.F.B. (1998) High-Resolution Palaeoclimatic Records for the Last Millennium: Interpretation, Integration and Comparison with General Circulation Model Control-Run Temperatures. *The Holocene*, **8**, 455-471. <https://doi.org/10.1191/095968398667194956>
- [5] Mann, M.E., Zhang, Z., Hughes, M.K., Bradley, R.S., Miller, S.K., Rutherford, S., et al. (2008) Proxy-Based Reconstructions of Hemispheric and Global Surface Temperature Variations over the Past Two Millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105**, 13252-13257. <https://doi.org/10.1073/pnas.0805721105>
- [6] BráZdil, R., Pfister, C., Wanner, H., Storch, H.V. and Luterbacher, J. (2005) Historical Climatology in Europe—The State of the Art. *Climatic Change*, **70**, 363-430. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-5924-1>
- [7] Cook, E.R., Anchukaitis, K.J., Buckley, B.M., D'Arrigo, R.D., Jacoby, G.C. and Wright, W.E. (2010) Asian Monsoon Failure and Megadrought during the Last Millennium. *Science*, **328**, 486-489. <https://doi.org/10.1126/science.1185188>
- [8] Song, H., Liu, Y., Li, Q. and Linderholm, H. (2013) Tree-Ring Derived Temperature Records in the Central Loess Plateau, China. *Quaternary International*, **283**, 30-35. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.03.033>
- [9] 刘禹. 以树轮资料进行年代际气候预测实例评估[J]. 科学通报, 2021, 66(26): 3474-3479.
- [10] 谭亮成, 马乐, 毛瑞雪, 等. 历史文献在我国最近 2000 年气候变化研究中的应用[J]. 地球环境学报, 2014, 5(6): 434-440.
- [11] 苏海洋, 雍际春. 中国历史气候情景的恢复与重建技术[J]. 中国科技信息, 2008(13): 37-39.
- [12] Ge, Q., Zheng, J., Hao, Z., Liu, Y. and Li, M. (2016) Recent Advances on Reconstruction of Climate and Extreme Events in China for the Past 2000 Years. *Journal of Geographical Sciences*, **26**, 827-854. <https://doi.org/10.1007/s11442-016-1301-4>
- [13] 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. 考古学报, 1972(1): 15-38.
- [14] 陈业新. 历史时期水旱灾害资料等级量化方法述论——以《中国近五百年旱涝分布图集》为例[J]. 上海交通大学学报(哲学社会科学版), 2020, 28(1): 107-115.
- [15] Zhang, D.D., Lee, H.F., Wang, C., Li, B., Pei, Q., Zhang, J., et al. (2011) The Causality Analysis of Climate Change and Large-Scale Human Crisis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **108**, 17296-17301. <https://doi.org/10.1073/pnas.1104268108>
- [16] Hao, Z., Zheng, J., Ge, Q. and Zhang, X. (2012) Spatial Patterns of Precipitation Anomalies for 30-Yr Warm Periods in China during the Past 2000 Years. *Acta Meteorologica Sinica*, **26**, 278-288. <https://doi.org/10.1007/s13351-012-0302-1>
- [17] Wan, L., Bento, V.A., Qu, Y., Qiu, J., Song, H., Zhang, R., et al. (2023) Drought Characteristics and Dominant Factors across China: Insights from High-Resolution Daily SPEI Dataset between 1979 and 2018. *Science of the Total Environment*, **901**, Article 166362. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166362>
- [18] Ge, Q., Zheng, J., Fang, X., Man, Z., Zhang, X., Zhang, P., et al. (2003) Winter Half-Year Temperature Reconstruction for the Middle and Lower Reaches of the Yellow River and Yangtze River, China, during the Past 2000 Years. *The Holocene*, **13**, 933-940. <https://doi.org/10.1191/0959683603hl680rr>
- [19] Shen, C., Wang, W., Hao, Z. and Gong, W. (2007) Exceptional Drought Events over Eastern China during the Last Five Centuries. *Climatic Change*, **85**, 453-471. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9283-y>
- [20] 韦林娜. 长江三角洲地区环境演变与人类社会响应研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2008.

- [21] 朱亚芬. 530年来中国东部旱涝分区及北方旱涝演变[J]. 地理学报, 2003(S1): 100-107.
- [22] 张先恭, 张富国. 强火山爆发与我国华北地区夏季旱涝的关系[J]. 灾害学, 1994(2): 69-73.
- [23] Zhu, J., Zhao, X., Wu, H., Wu, S., Hu, D. and Xing, C. (2023) Study of the Sea Temperature Backgrounds to Tropical Cyclones Affecting Hainan Province in the Dry Season. *Atmosphere*, **14**, Article 1663.
<https://doi.org/10.3390/atmos14111663>
- [24] 倪向南, 郭伟. 海南岛西部沙化土地时空变化过程及其与气候因子的关系[J]. 第四纪研究, 2016, 36(1): 144-153.