

云南百年以来的气候变化特征及其驱动机制

杨晨澹

云南师范大学地理学部, 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南 昆明

收稿日期: 2026年3月6日; 录用日期: 2026年4月22日; 发布日期: 2026年4月29日

摘要

利用云南省昆明站点(56779)和腾冲站点(56739)过去百年的气象观测数据, 选取其中的气温和降水量要素数据, 采用趋势分析法、变差系数法和小波分析法等研究方法, 研究了过去百年云南东部和西部的气候变化趋势特征以及周期变化, 并比较云南东西部气候变化的异同, 分析东西部气候变化的成因, 探讨了云南百年以来的器测数据记录与区域气候指标的变化及对比。结论如下: 1) 云南东部在过去百年的气候变化特征, 气温和降水量的变化趋势都呈上升, 年代际变化波动不大, 在过去百年尺度上, 年均温变化序列存在一个10a的周期, 年降水量存在一个6a的主周期, 其他周期分别为9a、21a、36a; 2) 云南西部地区过去百年的气候特征, 气温呈上升趋势, 而年降水量则为下降趋势, 气温和降水量的年代际变化小, 在过去百年间, 年均温变化序列存在一个12a的主周期, 而降水变化序列存在一个4a的主周期; 3) 太阳黑子活动与云南东西部气温、降水的变化呈现出一定的相关性, 主要为负相关性。ENSO是最强年际旱涝变化的主导因子, 而PDO主导年代际干湿变化, 三者协同作用影响云南气候变化。

关键词

气候变化, 云南, 变化趋势, 驱动因子

Characteristics of Climate Change and Its Driving Mechanisms in Yunnan Province over the Past Century

Chenlu Yang

Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environmental Changes of Yunnan Province,
Geography Department of Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: March 6, 2026; accepted: April 22, 2026; published: April 29, 2026

Abstract

Based on the meteorological observation data of the Kunming station (56779) and the Tengchong

station (56739) over the past century in Yunnan Province, the temperature and precipitation data were selected. Using research methods such as trend analysis, coefficient of variation, and wavelet analysis, the climate change trends and periodic variations in the eastern and western parts of Yunnan over the past century were studied. The similarities and differences in climate change between the eastern and western parts of Yunnan were compared, the causes of climate change were analyzed, and the changes and comparisons of instrumental data records and regional climate indicators in Yunnan over the past century were discussed. The conclusions are as follows: 1) The climate change characteristics of Yunnan in the past century show that both temperature and precipitation have an upward trend, with little fluctuation in interdecadal changes. On a 100-year scale, the annual average temperature change sequence has a 10-year cycle, and the annual precipitation has a 6-year main cycle, with other cycles being 9 years, 21 years, and 36 years; 2) The climate characteristics of the western part of Yunnan in the past century show that the temperature has an upward trend, while the annual precipitation has a downward trend. The interdecadal changes in temperature and precipitation are small. On a 100-year scale, the annual average temperature change sequence has a 12-year main cycle, and the precipitation change sequence has a 4-year main cycle; 3) Solar sunspot activity shows a certain correlation with the temperature and precipitation changes in Yunnan in the east and west, mainly a negative correlation. ENSO is the dominant factor for the strongest interannual drought and flood changes, while PDO dominates the interdecadal dry and wet changes. The three factors work together to affect the climate change in Yunnan.

Keywords

Climate Change, Yunnan, Trend of Change, Driving Factors

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

当今全球气候相对于工业化前时期已经发生显著变化，政府间气候变化专门委员会(The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)报告指出，2011~2020 年全球地表温度比 1850~1900 年高出 1.1℃ [1]。有大量证据表明全球变暖对生态系统、人类系统以及人类福祉产生了巨大影响[2]-[4]。因此，气候变暖使全球环境面临重大的风险[5]。

21 世纪气候将继续变暖，IPCC 报告称应努力将全球升温幅度控制在 1.5℃ 以内(IPCC, 2018)，但变暖的程度仍存在很大的不确定性。未来全球变暖的不确定性主要由三个因素导致：未来温湿气体排放的不确定性、排放对气候影响的不确定性以及气候的自然变率[6]-[9]。在年际到年代际的短期时间尺度上，自然变率造成的不确定性占主导地位，如火山强迫作用增强了年际至年代际时间尺度上的气候变率[10]-[12]，太阳辐射的增加是导致 20 世纪 30~40 年代气候变暖的因素之一，厄尔尼诺 - 南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)的暖相位促使某些年份异常温暖[7]，这些因素对认识气候在特定年代的变化(尤其在区域尺度上)构成不确定性[13]。因此，厘清年际至年代际气候变化的自然变率及驱动因子，对于提升气候预测的可靠性，降低预测的不确定性对气候变化影响评估、适应规划和减缓决策至关重要。

在全球变暖的背景下，近 100 年来中国年平均气温明显增加，升温幅度比同期全球平均值略高，降水量变化趋势不明显[14]。但中国国土面积广阔，地形复杂，从热带到寒温带跨越多个气候带，不同区域对气候变化的响应差异显著[15]。云南处于东部季风区与青藏高原高寒区两大自然带的过渡带，既受东亚季风和印度季风的影响，又受青藏高原环流系统的影响，叠加上复杂的地貌类型，气候类型复杂多样[16]。在

全球变暖的背景下,云南气候出现了以气温升高、降水减少、极端天气气候事件增多增强为主要特征的变化,已对云南的生物多样性、水资源和农业生产等领域产生了不利影响,成为经济社会可持续发展面临的重大挑战[17]。因此,揭示云南气候变化的趋势及规律,厘清云南年际至年代际气候变化的自然变率及驱动因子是应对区域生态脆弱性与气候敏感性挑战的关键科学问题。

因此,本文以昆明站和腾冲站两个云南仅有的具有百年器测记录的气象站点数据为基础,结合历史记录及部分气候代用指标资料,探讨云南年际至年代际的气候变化特征,并识别百年以来云南气候变化的主要驱动因子,为云南气候变化影响评估及适应对策研究提供科学论证,提升气候预测的可靠性。

2. 研究资料和方法

2.1. 站址简介

云南省两个具有百年器测记录的气象站,腾冲站(56739)和昆明站(56779)(图1)。其中昆明站是今省立昆明气象测候所现为太华山国家基准气候站,其前身是陈一得先生在昆创立的私立一得测候所,后1938年5月重新建站,正式运行,同时一得测候所停止观测,省立昆明气象测候所现为太华山国家基准气候站,是云南连续观测时间最长的气象站[18]。

2.2. 资料及方法

所用资料为云南两个气象站点(腾冲站点、昆明站点)近百年的年平均气温和降水资料。首先采用趋势分析[19]和滑动平均法[20],研究云南两个站点近百年的气象数据变化趋势特征,再利用变差系数法[21]讨论气候的年代际变化。结合小波函数进行两个站点年均温和降水的周期性分析[22]。然后分别讨论两站气象数据与太阳黑子、ENSO和PDO(Pacific Decadal Oscillation)的相关分析,识别云南气候变化的主要驱动因子。

3. 结果与分析

3.1. 云南东西部气候要素变化特征

3.1.1. 气温变化特征

云南西部的气温在过去百年间呈缓慢上升的趋势(图2(a)),平均气温的年际倾向率为 $0.03^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。其中年均温的最小值是1918年的 14.11°C ,最大值为1925年的 15.92°C ,过去百年气温平均值约为 15.26°C 。气温的波动趋势不显著,主要的气温变化差异出现在20世纪的10年代到20世纪的20年代间。

云南东部的气温平均值约为 15.22°C ,平均气温在20世纪四十年代出现了明显的降低。最高气温平均值出现在1937年,最低气温平均值在1944年。云南东部地区过去百年的年平均气温变化趋势呈上升,年平均气温的年际倾向率为 $0.082^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。可知在过去百年云南东部的气温变化呈上升趋势,但不显著。增温主要在1970s后开始,且有较显著的增温(图2)。

3.1.2. 降水变化特征

云南西部的年降水量最大值在2010年的 1861.8mm ,最小值是1972年的 950.58mm 。年降水量的平均值约为 1385.21mm 。云南西部的年降水量呈显著下降趋势,年际倾向率为 $-3.68\text{mm}/10\text{a}$,云南西部地区的年降水量在过去百年间是在减少的。

云南东部在过去120年云南东部的降水量平均值约为 872.04mm ,年降水量的最大平均值出现在1999年,1931年的年降水量平均值最小。过去120年的年降水量呈较显著的上升趋势,年降水量的年际倾向率为 $11.29\text{mm}/10\text{a}$,在过去百年云南东部的年降水量是在增加的。

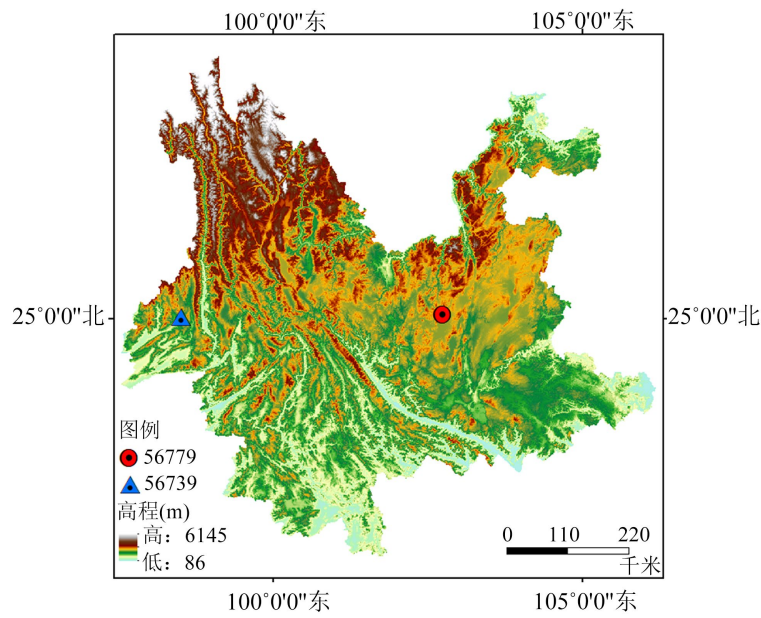


Figure 1. Meteorological station map of Yunnan province
图 1. 云南气象站点图

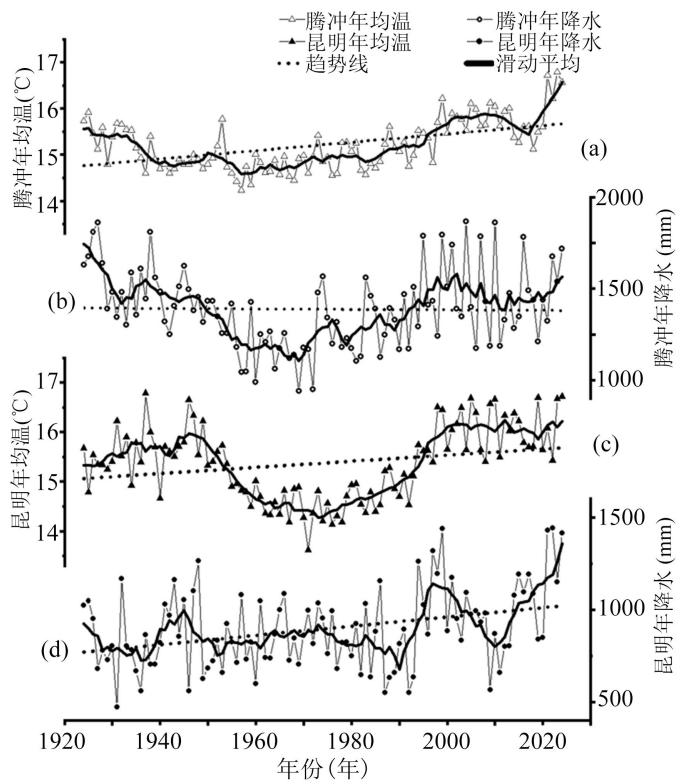


Figure 2. The characteristics of temperature and precipitation changes in Eastern and Western yunnan
图 2. 云南东西部气温、降水变化特征

3.2. 云南东西部气候要素周期变化分析

利用 MATLAB2024a 软件对云南东西部两个站点的气温和降水变化序列进行了小波分析。小波方差

图 3 显示云南东部昆明站的平均气温在百年时间尺度上存在一个 10a 的主周期，是其最大峰值，对小波方差贡献最大。由图 3 可知云南西部腾冲站的年均温存在 12a 的主周期。小波方差图 4 显示，昆明站年降水变化序列存在 6a、9a、21a、36a 四个较为明显的波峰，其中最大峰值在 6a 处，说明在 6a 附近振荡周期最强，对小波方差贡献最大，是第一主周期，其余三个峰值相较第一主周期减弱，对小波方差的贡献也相对减小。分析图 4 可知，西部腾冲站年降水变化序列存在一个 4a 的主周期。上述研究结果可知，云南东西部两个站点的年均温和年降水在变化序列上都存在不同的周期变化。

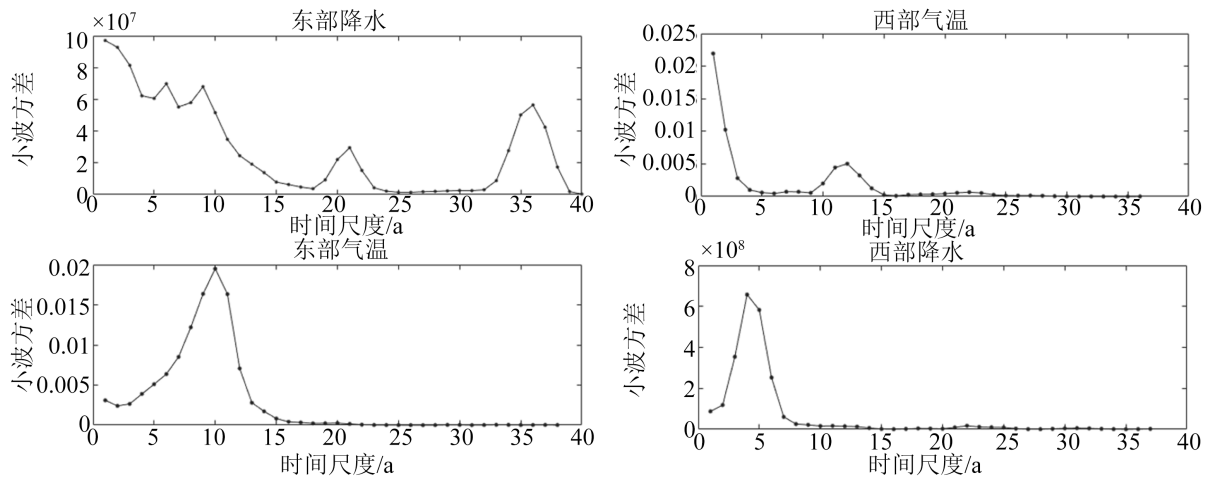


Figure 3. Wavelet analysis of annual average temperature and precipitation in Yunnan

图 3. 云南年平均气温和降水的小波分析

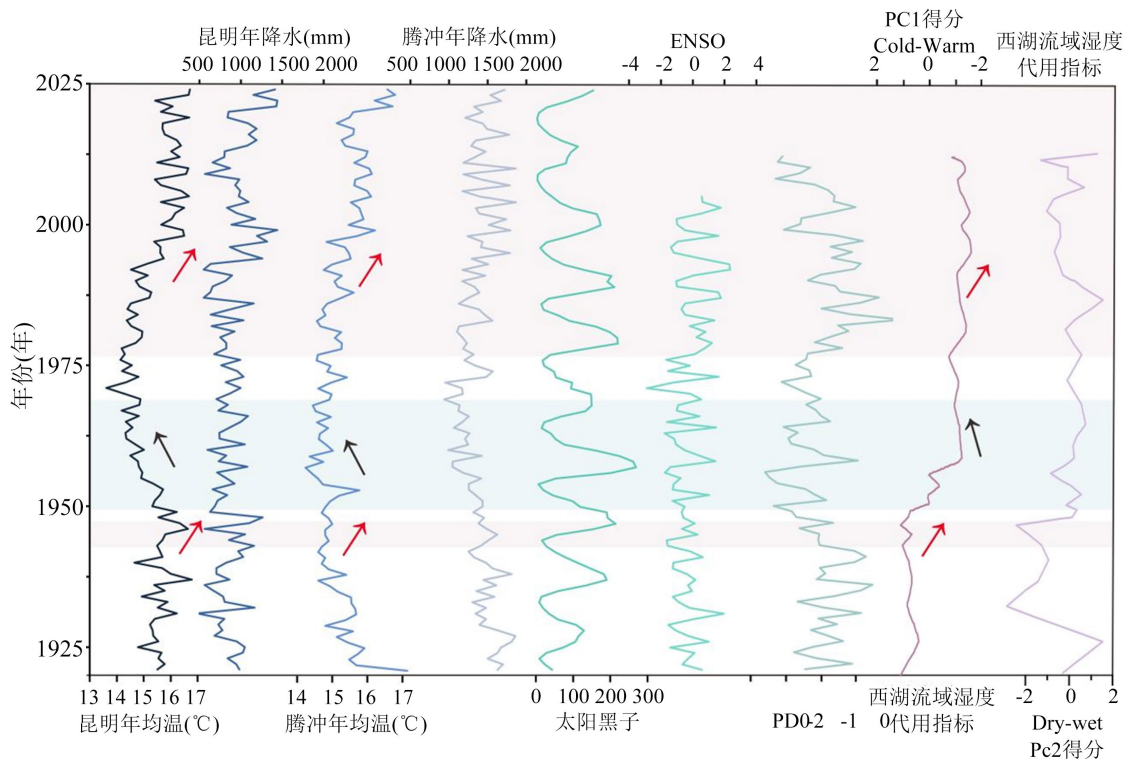


Figure 4. Comparative analysis of meteorological elements and driving factors, regional and global climate indicators

图 4. 气象要素和驱动因子、区域及全球气候指标对比分析

2012年美国研究理事会(NRC)发布了一则报告《太阳活动变化对地球气候的影响》[22],在报告中表明,太阳活动造成的影响只是局部的,并不是全球的,在太阳活动的11a周期中,并不是所有地点受到的影响都是相同的,会存在差异性[23]。云南东西部年均温和年降水的周期变化与太阳黑子活动存在关联性,但具有差异性。

4. 讨论

4.1. 云南气候变化的主要驱动因子

对云南昆明站和腾冲站的年均温以及降水与太阳黑子、ENSO和PDO(Pacific Decadal Oscillation)进行相关分析。

太阳辐射能量的变化形成并影响着全球和局地的气候[18]。太阳黑子活动是影响我国各区域气候变化的重要因素之一。气温和太阳黑子数之间具有一定的相关性,太阳黑子数有约11a的变化周期。国际上规定1755年作为第一个太阳黑子周期的开始,据此统计,在过去百年期间分别出现了10次极大值和10次极小值,在黑子数变化期间,年均温和太阳黑子数之间存在负相关关系,在太阳黑子数处于谷值时,气温距平值多为正值,当太阳黑子数达峰值时,气温距平值多为负值,即气温随太阳黑子数的增加而降低。降水和太阳黑子数之间也具有一定的相关性。年降水量与太阳黑子数的负相关关系在西部更为明显,当太阳黑子数达峰值时,年降水量距平值多为负值,而当太阳黑子数处于谷值时,年降水量距平值多为正值。

将云南近百年平均气温和降水序列与ENSO进行相关分析。ENSO指数和昆明气温、腾冲气温的相关系数为0.27和0.24,均为正相关,但均未通过0.05的显著性水平检验。ENSO指数与昆明站降水量的相关系数为-0.16,呈负相关关系(未通过0.05的显著性水平检验)。分析强厄尔尼诺年和拉尼娜年云南气候的变化,其中在1997s~1998s年历史最强厄尔尼诺事件期间,昆明和腾冲都出现显著的高温,且降水锐减。根据强厄尔尼诺年的对比,在厄尔尼诺峰值年后1~2年仍对云南气候有滞后影响。在当前全球变暖的背景下,会抵消一部分拉尼娜年的降温效应,但极端降水事件频率增加。即在拉尼娜年,西太平洋副热带高压偏强且位置偏西,增强西南季风和孟加拉湾水汽输送,使得云南的降水偏多。

PDO和昆明气温和腾冲气温的相关系数分别为0.63、0.82($p < 0.05$),PDO和昆明降水以及腾冲降水的相关系数为-0.33、0.23,均未通过0.05的显著性水平检验。在PDO正相位期间,昆明1990s~2000s间干旱期显著,对应气候为高温少雨。在PDO负相位期间,昆明和腾冲基本处于多雨期。

云南气候的变化不仅仅是这几个驱动因子的单独作用,多个驱动因子的协同作用也会使得云南气候的变化更突出。其中2009s~2010s厄尔尼诺年,正处PDO正相位,则加剧气候干旱,是云南大旱年。2010~2011年,PDO处于负相位且正值拉尼娜年,云南的降水进一步偏多。

4.2. 器测数据与区域气候指标对比

本文将昆明站点和腾冲站点的气温和降水数据统计分析与区域气候指标分析对比,探讨器测数据与气候重建代用指标之间的变化及异同。

云南东部和西部的的气温变化都呈显著上升趋势,但云南东部的总体气温升高相比云南西部更多。过去100年的平均气温年代际变化差异波动不显著,仅云南东部20世纪40年代的年际变化波动较大。在过去百年间,云南东西部都经历了两次显著变暖,气温变化呈现“升-降-升”趋势。与大理西湖流域的温度代用指标变化有较好的可比性,存在三个相符合的气候变化阶段,变化趋势较为一致。

在20世纪40年代到50年代,器测数据温度呈现上升趋势,但不显著,处于一个相对暖期。而大理

西湖流域温度代用指标显示此阶段的气温出现波动上升,但在此前的气温相对偏低。腾冲与大理西湖流域降水都呈下降趋势。在 20 世纪 50 年代到 70 年代,器测数据的温度变化处于波动期,呈下降趋势,与上一阶段比较相对偏冷。大理西湖流域温度波动上升后出现下降趋势,总体存在一个不显著的降温期。器测数据的降水和大理西湖流域的湿度代用指标都表明在这一阶段降水变化多波动。在 20 世纪 80 年代至今,器测数据的气温呈显著上升趋势,处于持续快速增温期,同样的大理西湖流域的温度也与器测数据变化趋势一致,有较好的可比性。

综上,过去一百年,云南的气候正在向“更暖、更干(在生态和水文意义上)、更极端”的方向演变。

关于降水量的气候变化特征分析,云南东部和西部出现了较大的不同,云南东部在过去 120 年的年降水量呈上升趋势,但云南西部的年降水量出现了较显著的下降趋势,但西部地区的总体年降水量是大于东部地区。西部地区的年降水量基本都在 1000 mm 以上,云南西部的年降水量平均值为 1385.21 mm,而云南东部的降水量平均值在 1000 mm 以下。可见云南西部地区的降水量要多于东部地区。而降水量的年代际变化差异,比过去 120 年气温发生的波动更为大,其中云南东部的降水量比西部的年际波动更大。

云南东西部的气候变化不仅仅受到全球气候变暖的宏观影响,更重要的是云南省的区域地理特征差异大,云南地形较为复杂[24]。云南地势呈现西高东低,同中国地势阶梯走向相似。云岭、苍山、哀牢山作为一个自然分界线将云南划分为东部和西部两大地理单元。云南东部主要是低山和丘陵,而西部主要是横断山脉,所以呈现出云南西部和东部的地形地势差异,这也导致了云南东部和西部在过去百年间发生的气候变化趋势存在差异[25]-[27]。

根据云南过去百年气温和降水数据和驱动因子的相关分析,可知多种驱动因子对云南气候变化的影响是协同作用的。太阳黑子与云南年均气温和降水量呈负相关性,但非主要驱动因子。ENSO 作为主要驱动因子,是年际气候异常的最强驱动因子,在厄尔尼诺年,会影响云南温度升高降水减少,而在拉尼娜年,会导致云南降水异常增多。而 PDO 作为年代际主导因子,处于正相位时干旱频发,处于负相位时多雨。这些驱动因子协同作用,形成复杂的气候响应模式。

5. 结论

1) 云南东部在过去百年的气候变化特征,气温的变化趋势都呈上升($0.082^{\circ}\text{C}/10\text{a}$),过去百年云南东部的气温平均值约为 15.22°C ,平均气温在 20 世纪四十年代出现了明显的降低。各个年代的平均温度变差系数以 20 世纪 40 年代的最大,为 0.128,表明 20 世纪 40 年代的平均气温波动在过去 120 年中的波动较大其余年代之间平均气温的波动较平稳。东部气温变化序列存在一个 10a 的周期。过去 120 年云南东部的降水量平均值约为 872.04 mm ,呈较显著的上升趋势($11.29\text{ mm}/10\text{a}$)。20 世纪 40 年代降水量波动较为显著,变差系数为 0.346。云南东部平均气温和降水量的最大变动系数都是 20 世纪 40 年代,表明 20 世纪 40 年代的气候变化波动相较过去百年的其他年代,其波动都更为显著。东部年降水量变化序列存在一个振荡明显的主周期 6a,其他周期分别为 9a、21a、36a。

2) 云南西部地区过去百年的气候特征,气温呈上升趋势($0.03^{\circ}\text{C}/10\text{a}$),过去百年气温平均值为 15.26°C 。云南西部过去百年中平均气温的年际波动都不是很显著,是较平稳的,其中 21 世纪 00 年代是平均气温最高且年际间变化差异最小的。西部腾冲站的年均温变化序列存在 12a 的主周期。过去百年云南西部年降水量为显著下降趋势($-3.68\text{ mm}/10\text{a}$),平均值约为 1385.21 mm 。西部腾冲站年降水量的年代际变化小,年降水变化序列存在一个 4a 的主周期。

3) 云南气候是太阳黑子、ENSO、PDO 等驱动因子的多尺度耦合产物,ENSO 是最强年际旱涝变化的主导因子,而 PDO 主导年代际干湿变化,太阳黑子作为非主要驱动因子与 ENSO 和 PDO 协同作用。当三者同相位时,易触发极端气候事件,而处于反相位时,有可能抵消部分影响。

参考文献

- [1] IPCC (2023) Climate Change 2023: Synthesis Report. Cambridge University Press.
- [2] Marlon, J.R., Wang, X., Mildener, M., Bergquist, P., Swain, S., Hayhoe, K., *et al.* (2021) Hot Dry Days Increase Perceived Experience with Global Warming. *Global Environmental Change*, **68**, Article 102247. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102247>
- [3] Singh, V. (2024) Global Warming and Climate Change. In: Singh, V., Ed., *Textbook of Environment and Ecology*, Springer, 283-295. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8846-4_20
- [4] Martinez-Villalobos, C., Fu, D., Loikith, P.C. and Neelin, J.D. (2025) Accelerating Increase in the Duration of Heatwaves under Global Warming. *Nature Geoscience*, **18**, 716-723. <https://doi.org/10.1038/s41561-025-01737-w>
- [5] Baum, S.D. (2024) Climate Change, Uncertainty, and Global Catastrophic Risk. *Futures*, **162**, Article 103432. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2024.103432>
- [6] 方精云, 朱江玲, 王少鹏, 等. 全球变暖、碳排放及不确定性[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(10): 1385-1395.
- [7] Latif, M. (2011) Uncertainty in Climate Change Projections. *Journal of Geochemical Exploration*, **110**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.09.011>
- [8] Shiogama, H., Stone, D., Emori, S., Takahashi, K., Mori, S., Maeda, A., *et al.* (2016) Predicting Future Uncertainty Constraints on Global Warming Projections. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 18903. <https://doi.org/10.1038/srep18903>
- [9] Gillett, N.P. (2024) Halving of the Uncertainty in Projected Warming over the Past Decade. *npj Climate and Atmospheric Science*, **7**, Article No. 146. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00693-3>
- [10] Umeh, S.C. and Gil-Alana, L.A. (2024) Trends in Temperatures in Sub-Saharan Africa. Evidence of Global Warming. *Journal of African Earth Sciences*, **213**, Article 105228. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105228>
- [11] Zhang, Y., Zhou, D. and Guo, X. (2024) Regional Climate Response to Global Warming in the Source Region of the Yellow River and Its Impact on Runoff. *Science China Earth Sciences*, **67**, 843-855. <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1253-x>
- [12] Roshan, G.R., Ghanghermeh, A. and Neyazmand, E. (2019) Quantification and Assessment of Effective of Global Warming on the Occurrence of Heat and Cold Waves in Some Selected Stations in Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, **44**, 127-144.
- [13] Chen, D.L., Rojas, M., Samset, B.H., *et al.* (2021) Framing, Context, and Methods. In: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., *et al.*, Ed., *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- [14] 黄建平, 陈文, 温之平, 等. 新中国成立 70 年以来的中国大气科学研究: 气候与气候变化篇[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(10): 1607-1640.
- [15] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书 2021 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [16] 徐裕华. 西南气候[M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [17] 云南未来 10-30 年气候变化预估及其影响评估报告编写委员会. 云南未来 10-30 年气候变化预估及其影响评估报告[R]. 昆明: 云南省气象局, 2020.
- [18] 姚念, 车麟. 云南气象观测遗址的调查与保护研究[J]. 自然与文化遗产研究, 2025, 10(2): 90-98.
- [19] 廖君, 沈才明, 余晓珊. 气候变化及其对纳帕海湿地的影响[J]. 西部林业科学, 2016, 45(4): 136-140+146.
- [20] 马开玉, 张耀存, 陈星. 现代应用统计学[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 15-16.
- [21] Meyer, Y. (1993) *Wavelets and Operators*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511623820>
- [22] 肖子牛. 太阳活动对地球气候的影响[J]. 自然杂志, 2021, 43(6): 408-419.
- [23] 王绍武, 葛全胜, 王芳, 等. 全球气候变暖争议中的核心问题[J]. 地球科学进展, 2010, 25(6): 656-665.
- [24] 丁一汇, 戴晓苏. 中国近百年来的温度变化[J]. 气象, 1994(12): 19-26.
- [25] 段旭, 陶云, 杜军, 等. 西南地区气候变化基本事实及极端气候事件[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [26] 段旭, 陶云. 云南近 50 年来的气候变化[J]. 热带气象学报, 2012, 28(2): 243-250.
- [27] 程建刚, 解明恩. 近 50 年云南区域气候变化特征分析[J]. 地理科学进展, 2008, 27(5): 19-26.