

楚雄州近65年来最低气温变化特征与突变分析

杨春香^{1*}, 孔德超^{2#}, 徐凌¹, 吴天会¹, 杨雨晗¹

¹云南省楚雄州气象局, 云南 楚雄

²云南省姚安县气象局, 云南 楚雄

收稿日期: 2026年2月25日; 录用日期: 2026年3月21日; 发布日期: 2026年3月27日

摘要

为揭示楚雄州最低气温长期变化规律及区域差异, 本研究基于该地区10个国家气象观测站1960~2024年逐日最低气温数据, 采用Mann-Kendall趋势检验、Sen斜率估计、Pettitt突变检验等方法, 分析年、季尺度平均最低气温时空变化特征。结果显示, 年尺度上, 除元谋县呈不显著下降外, 其余9县市年平均最低气温均显著上升(通过 $\alpha = 0.05$ 或 $\alpha = 0.01$ 检验), 上升站点平均增温速率 $0.25^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 楚雄市增温最快(Sen斜率 $0.61^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)。季节尺度上, 增温呈“冬春强、夏秋弱”特征, 冬季增温速率最高($0.36^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 夏季最低($0.16^{\circ}\text{C}/10\text{a}$); 空间上, 禄丰市夏季与元谋县春、冬季降温, 其余地区均升温。年代际变化显示, 2010年后全区增温加速, 2020~2024年达峰值; 部分县市年、季尺度存在气候突变点。本研究揭示了楚雄州最低气温变化的时空异质性, 对当地农业规划与气候适应策略制定具有参考价值。

关键词

平均最低气温, Mann-Kendall检验, Sen斜率, 突变分析, Pettitt检验, 楚雄州

Characteristics and Mutation Analysis of Minimum Temperature Changes in Chuxiong Prefecture over the Past 65 Years

Chunxiang Yang^{1*}, Dechao Kong^{2#}, Ling Xu¹, Tianhui Wu¹, Yuhan Yang¹

¹Chuxiong Meteorological Bureau of Yunnan Province, Chuxiong Yunnan

²Yaoan Meteorological Bureau of Yunnan Province, Chuxiong Yunnan

Received: February 25, 2026; accepted: March 21, 2026; published: March 27, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 杨春香, 孔德超, 徐凌, 吴天会, 杨雨晗. 楚雄州近 65 年来最低气温变化特征与突变分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(2): 507-519. DOI: 10.12677/ccrl.2026.152056

Abstract

To investigate the long-term variation patterns and regional disparities of minimum temperature in Chuxiong Prefecture, this study analyzed the spatiotemporal characteristics of annual and seasonal mean minimum temperatures using daily data from 10 national meteorological stations during 1960~2024, incorporating the Mann-Kendall test, Sen's slope estimation, and Pettitt mutation test. Results indicated that annual mean minimum temperatures increased significantly ($\alpha = 0.05/0.01$) in 9 counties/cities, with an average warming rate of $0.25^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ and the highest rate in Chuxiong City ($0.61^{\circ}\text{C}/\text{decade}$), whereas an insignificant decrease was observed in Yuanmou County. Seasonally, warming was more pronounced in winter-spring (peak: $0.36^{\circ}\text{C}/\text{decade}$) than in summer-autumn (minimum: $0.16^{\circ}\text{C}/\text{decade}$). Spatially, cooling occurred in Lufeng City (summer) and Yuanmou County (spring/winter), while warming prevailed elsewhere. Warming accelerated after 2010, peaking in 2020~2024, with climate mutation points detected at annual and seasonal scales in some regions. This study reveals the spatiotemporal heterogeneity of minimum temperature changes in Chuxiong Prefecture, offering valuable references for local agricultural planning and the formulation of climate adaptation strategies.

Keywords

Mean Minimum Temperature, Mann-Kendall Test, Sen's Slope, Mutation Analysis, Pettitt Test, Chuxiong Prefecture

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

全球变暖已成为不争的事实。IPCC 第五次评估报告指出, 1880~2012 年全球平均地表温度升高了 0.85°C 。作为核心气候要素, 气温的时空演变特征是气候学研究的重点领域。最低气温是反映区域冷暖变化的敏感指标, 其变化直接影响霜冻时长、作物低温胁迫程度、生态系统物候期及人体健康风险, 对农业生产和生态环境的影响往往比平均气温更为显著。很多气候学研究人员对中国气候或地方气候变化规律做了很多研究。王翠花等[1]通过研究, 发现中国近 50 年(1951~2000 年)日最低气温整体呈显著上升趋势, 且增温幅度高于日最高气温, 北方增温强于南方与青藏高原, 冬季增温最显著, 80 年代中后期发生气候突变, 暖夜增多、冷夜减少。刘荔昀等[2]指出近 50 年黄土高原年平均气温以 $0.28\sim 0.35^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ 的速率上升, 增温幅度高于全国平均水平, 最低气温增温速率显著高于最高气温。冬季增温最显著, 春季次之, 夏季增温相对较弱, 部分区域夏季最高气温存在弱下降趋势。杨萍等[3]研究发现青海湖地区气温整体呈显著上升趋势, 最低气温增温速率高于最高气温, 秋、冬季增温最突出, 80 年代中前期为相对冷期, 1996 年前后发生显著气候突变, 且四季突变时间不同步。张万诚等[4]研究云南省极端气温, 发现 1961~2012 年云南省极端气温呈现暖极值事件增多增强、冷极值事件减少减弱的显著变化特征, 空间上表现为“滇中及以北增暖显著, 滇南变化相对缓和”的分布格局, 且极端气温变化存在明显的季节差异和海拔依赖性。楚雄州位于云南省中部, 属云贵高原腹地, 复杂的地形地貌形成了典型的立体气候。目前针对该区域平均气温的研究较多, 但对长时序最低气温的精细化时空分析尚显不足。因此, 本文基于楚雄州 10 个气象站 1960~2024 年的逐日最低气温数据, 运用 M-K 检验、Sen 斜率估计和 Pettitt 检验等方

法, 系统分析年和季节尺度上最低气温的变化趋势与突变特征, 以期为区域农业气象服务与防灾减灾提供科学依据。

2. 资料与方法

2.1. 资料来源

本研究数据来源于云南省气象信息中心整编的楚雄州 10 个国家基准气象站(对应 10 个县市) 1960 年 1 月 1 日至 2024 年 12 月 31 日的逐日最低气温观测资料, 数据经过严格的质量控制。月、季、年平均最低气温由日值计算得到, 气候基准期采用 1991~2020 年。

2.2. 研究方法

研究中用 Mann-Kendall (M-K 检验)非参数秩次统计检验法来研究气温的变化总趋势, 用 Sen 斜率估计对变化趋势进行量化。气温的阶段分析采用距平以及 M-K 检验中的统计量 $UF(K)$, 突变分析结合 Pettitt 检验和 M-K 检验, 其中 Pettitt 检验用于定量确定突变年份及显著性, M-K 检验判断序列趋势变化的显著性与突变发生的可信度。

2.2.1. M-K 检验趋势检验

在 M-K 检验中, 原假设 H_0 为时间序列数据 (X_1, X_2, \dots, X_n) , 是 n 个独立的、随机变量同分布的样本, 备择假设 H_1 是双边检验, 对于所有的 $i, j \leq n$, 且 $i \neq j$, X_i 和 X_j 的分布是不相同的。定义检验统计量 S 计算如下式:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(X_i - X_j)$$

其中, $\text{sign}()$ 为符号函数, 当 $X_i - X_j$ 小于或大于零时, $\text{sign}(X_i - X_j)$ 分别为 $-1, 0, 1$ 。 S 为正态分布, 其均值为 0, 方差 $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。

M-K 统计量公式 S 大于、等于、小于零时分别为:

$$\begin{cases} Z = (S-1)/\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S > 0 \\ Z = 0 & S = 0 \\ Z = (S+1)/\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S < 0 \end{cases}$$

在双边检验中, 对于给定的置信水平 α , 若 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$, 则原假设 H_0 是不可接受的, 即在置信水平 α , 时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。 Z 为正值表示增加趋势, 负值表示减少趋势。 Z 的绝对值在大于等于 1.28, 1.64, 2.32 时表示分别通过了信度 90%, 95%, 99%显著性检验[5]。

2.2.2. Sen 斜率估计

Sen 斜率法作为一种稳健的非参数趋势量化方法, 与 M-K 检验法配合使用, 量化其 M-K 趋势的强度(变化速率)。假设有一组观测数据 $(t_1, y_1), (t_2, y_2), \dots, (t_n, y_n)$, 其中 t_i 是时间戳, y_i 是对应的观测值。对于每一对不同的时间点组合 $(i < j)$, 计算斜率 S_{ij} 。

$$S_{ij} = \frac{y_j - y_i}{t_j - t_i}$$

所有这些斜率构成了一个集合, 然后从中选取中位数值作为最终的 Sen 斜率估计值。如果斜率数量是奇数, 选取中间位置的斜率作为 Sen 斜率。如果斜率数是偶数, 则取中间两个斜率值的平均值作为 Sen 斜

率。若 Sen 斜率为正，说明气温随时间上升，若 Sen 斜率为负，则气温随时间下降。

2.2.3. Pettitt 突变检验

假设时间序列在某一时刻 t ($1 < t < n$) 发生突变，将序列分为前后两个子序列 (X_1, X_2, \dots, X_t) 和 $(X_{t+1}, X_{t+2}, \dots, X_n)$ ，通过检验两个子序列的分布是否存在显著差异，判断 t 是否为突变点。原假设 H_0 ：序列无突变(前后两个子序列分布相同)；备择假设 H_1 ：序列存在突变(前后两个子序列分布不同)。

检验统计量计算，定义检验统计量 U_t 为：

$$U_t = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{sign}(X_i - X_j)$$

其中， t 为可能的突变点($t \in [2, n-1]$)， $\text{sign}()$ 函数定义同 2.2.1 节。遍历所有可能的 t 值，计算对应的 U_t ，当 $|U_t|$ 达到最大值时，对应的 t 即为潜在突变年份 t_0 ，记此时的统计量为 $U_{\max} = \max(|U_t|)$ 。

显著性检验：为判断突变是否显著，需通过 U_{\max} 与临界值进行比较。在大样本条件下($n \geq 20$)， U_{\max} 近似服从正态分布，其均值 $E(U_{\max}) = 0$ ，方差 $\text{Var}(U_{\max}) = n(n-1)(2n+5)/72$ 。给定置信水平 α ，对应的临界值 U_α 为：

$$U_\alpha = \pm Z_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{72}}$$

若 $|U_{\max}| \geq U_\alpha$ ，则拒绝原假设 H_0 ，表明在置信水平 α 下，序列在 t_0 时刻存在显著突变；否则，突变不显著。本文中 α 取值为 0.05 (即 95% 置信水平)， $Z_{0.975} = 1.96$ 。

3. 结果与分析

3.1. 年平均最低气温变化趋势及突变分析

M-K 趋势检验表明(表 1)，近 65 年来，楚雄州 10 个县市中，除元谋县($Z = -1.26$)呈不显著下降趋势外，其余 9 个县市的年平均最低气温均呈现显著上升趋势(均通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验，其中 8 个通过 $\alpha = 0.01$ 检验)。Sen 斜率估计显示，增温速率存在明显的空间差异，楚雄市增温最快($0.61^\circ\text{C}/10\text{a}$)，而禄丰市最慢($0.08^\circ\text{C}/10\text{a}$)。全区平均增温速率为 $0.22^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。各县市增温速率差异显著($0.61 \rightarrow 0.31 \rightarrow 0.3 \rightarrow 0.24 \rightarrow 0.18 \rightarrow 0.13 \rightarrow 0.09 \rightarrow 0.08$)，元谋县出现弱降温趋势，反映了区域气候的特异性及精准应对气候变化的重要性。

Table 1. Annual mean minimum temperature Z (M-K) Test and Sen’s slope for 10 counties/cities in Chuxiong Prefecture (1960~2024)

表 1. 楚雄州 10 县市 1960~2024 年年平均最低气温 Z (M-K) 检验及 Sen 斜率

	楚雄	大姚	牟定	禄丰	南华	双柏	武定	姚安	元谋	永仁	平均
Z (M-K 检验)	8.08*	4.51*	6.45*	3.01*	3.94*	6.10*	6.18*	6.26*	-1.26	1.7#	4.5*
Sen 斜率	0.61	0.18	0.3	0.08	0.13	0.24	0.31	0.31	-0.05	0.09	0.22

*表示通过 99% ($\alpha = 0.01$) 的显著性检验，#表示通过 95% ($\alpha = 0.05$) 的显著性检验。

年代际距平分析(表 2)表明，全区在 1960~1990 年代以负距平(偏冷)为主，2000 年以后逐渐转为正距平(偏暖)，2010 年代后增温尤为显著。元谋县的年代际变化与其他县市差异明显，呈现“暖(1960s~70s)→冷(1980s~2000s)→暖(2010s 后)”的波动特征。从年平均最低气温 M-K 检验的 UF(K) 曲线(图 1)可以清晰看出，各县市在 20 世纪 UF 曲线波动较大，21 世纪后基本呈持续上升趋势，且多数超过 0.05 显著性临界线，表明增温趋势在近期尤为显著和稳定。

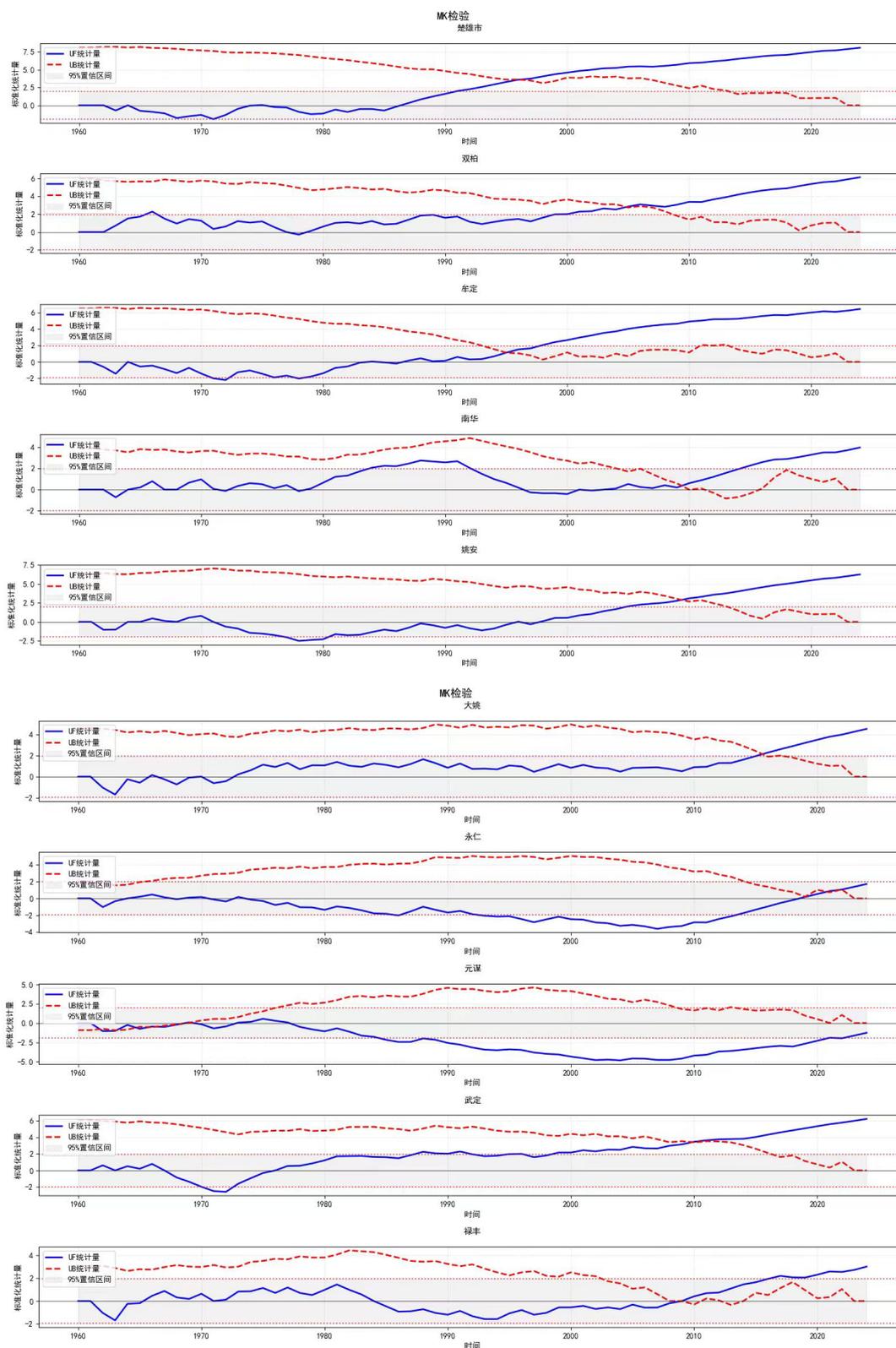
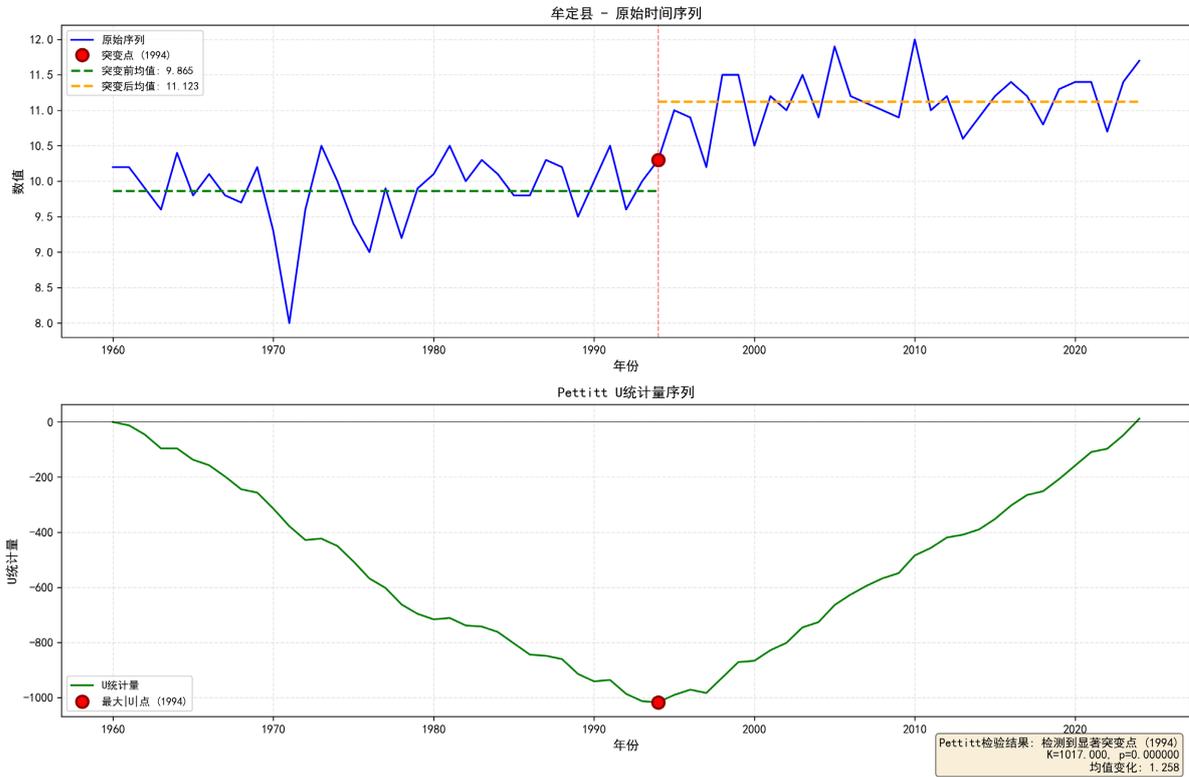


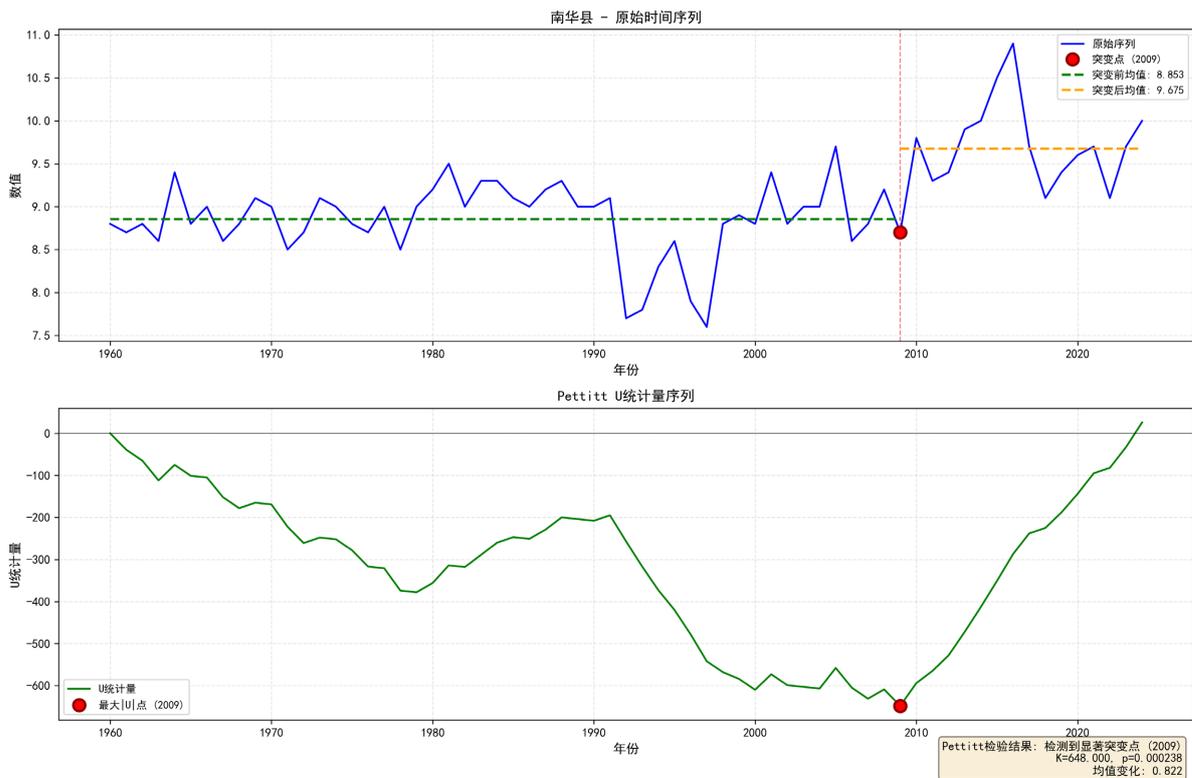
Figure 1. Mann-Kendall test curve of annual mean minimum temperature in 10 counties/cities of Chuxiong Prefecture (1960~2024)

图 1. 楚雄州 10 县市 1960~2024 年年平均最低气温 M-K 检验曲线

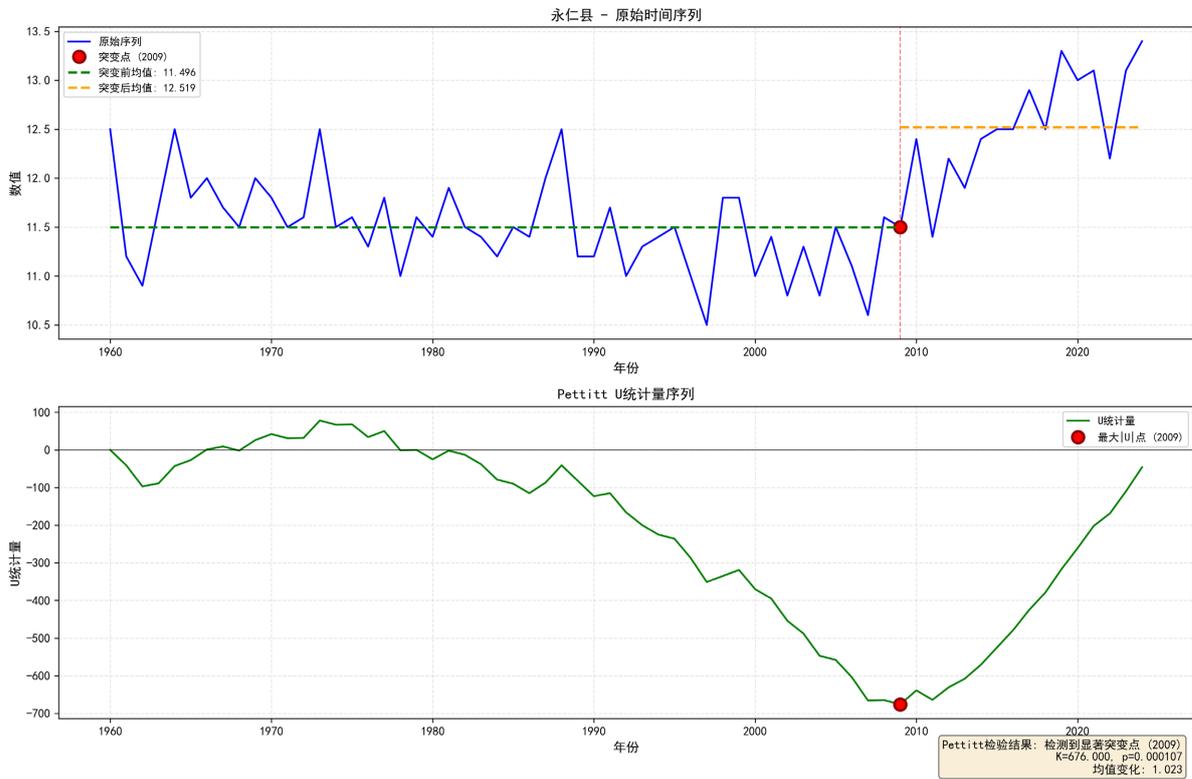
Pettitt检验 - 牟定县 (突变点: 1994)



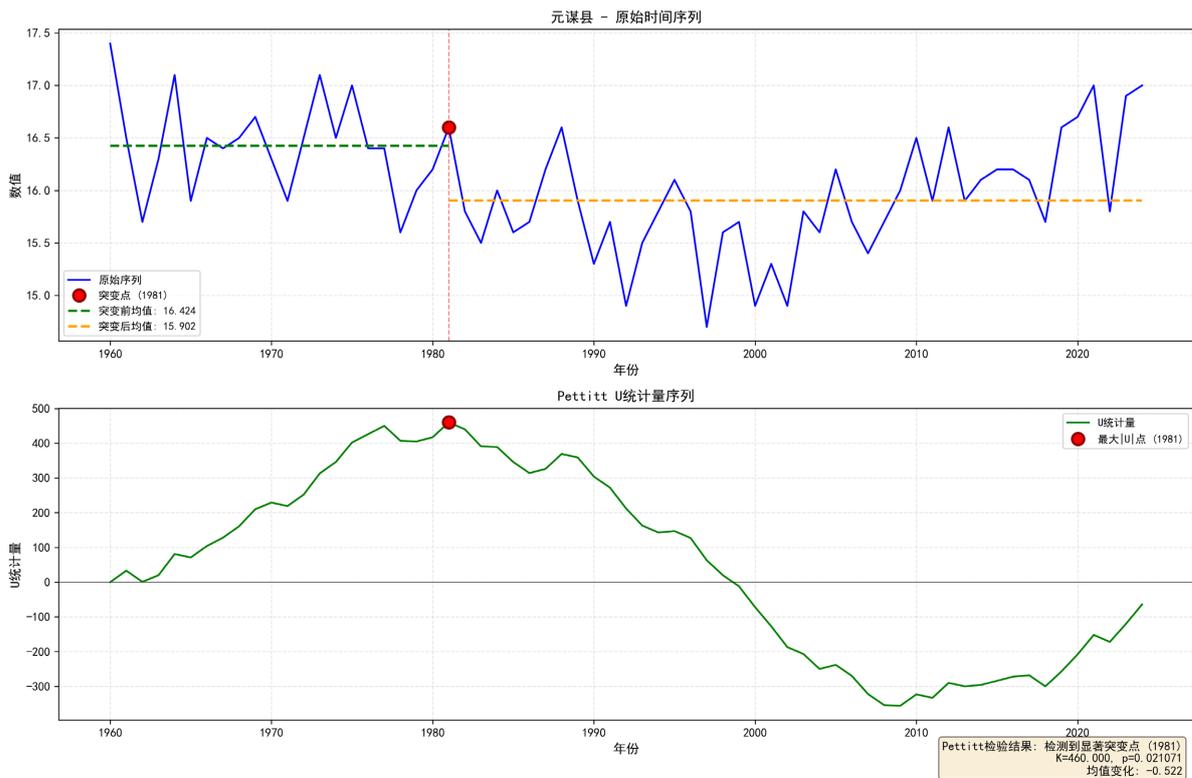
Pettitt检验 - 南华县 (突变点: 2009)



Pettitt检验 - 永仁县 (突变点: 2009)



Pettitt检验 - 元谋县 (突变点: 1981)



Pettitt检验 - 禄丰市 (突变点: 2007)

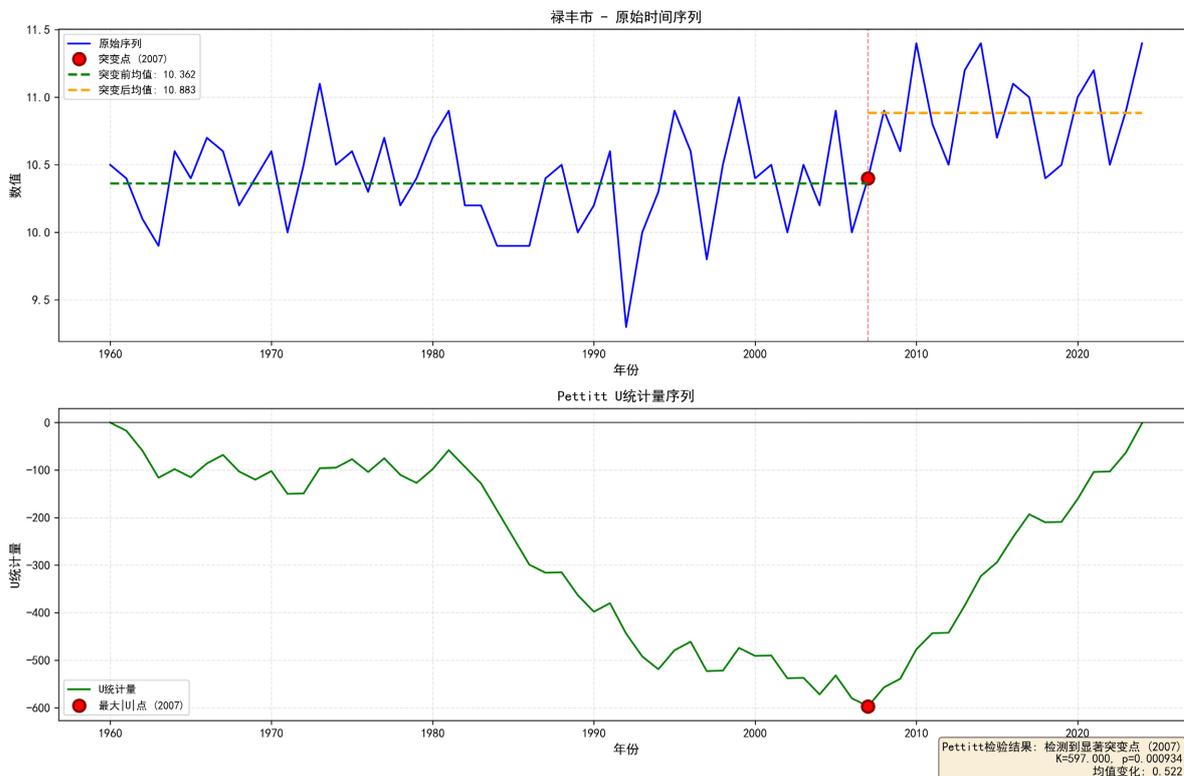


Figure 2. Pettitt test curve of annual mean minimum temperature in Mouding, Nanhua, Yongren, Yuanmou and Lufeng (1960~2024)

图 2. 牟定、南华、永仁、元谋、禄丰 1960~2024 年年平均最低气温 Pettitt 检验曲线

Table 2. Decadal anomaly analysis of annual mean minimum temperature for 10 counties/cities in Chuxiong Prefecture
表 2. 楚雄州 10 县市年平均最低气温年代际距平分析

	楚雄	大姚	禄丰	牟定	南华	双柏	武定	姚安	元谋	永仁
1960~1969	-1.42	-0.38	-0.12	-0.51	-0.24	-0.37	-0.71	-0.36	0.39	0.08
1970~1979	-1.45	-0.21	-0.01	-1.02	-0.27	-0.51	-0.6	-0.8	0.27	-0.08
1980~1989	-0.89	-0.18	-0.24	-0.44	0.09	-0.1	-0.14	-0.39	-0.09	-0.1
1990~1999	-0.47	-0.23	-0.18	0.05	-0.73	-0.19	-0.25	-0.33	-0.59	-0.38
2000~2009	0.68	-0.29	-0.06	0.62	-0.1	0.06	0	0.11	-0.55	-0.54
2010~2019	1.35	0.57	0.4	0.66	0.4	0.71	0.78	0.9	0.08	0.7
2020~2024	1.88	1.48	0.5	0.82	0.5	1.08	2.12	1.38	0.58	1.26

突变分析显示，牟定县、南华县、永仁县、元谋县和禄丰市的 $UF(K)$ 与 $UB(K)$ 曲线在置信区间内存在交点。通过 Pettitt 检验进一步验证，计算各年份 U_t 统计量并确定 U_{max} 对应的年份，最终确定其突变年份分别为 1994 年、2009 年、2009 年、1981 年、2007 年(图 2)，且所有突变点均通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验($|U_{max}| \geq U_{0.05}$)，表明突变特征可靠。

3.2. 季平均最低气温变化趋势及突变分析

楚雄州 10 县市区季平均最低气温变化趋势呈现一定规律性和差异性。规律性表现为四季均以增温为

主, 但强度不同, 差异性表现为不同区域、不同季节、不同年代存在下降趋势, 即冷变化特征。

从表 3 分析, 春季有 9 个站点的平均最低气温通过显著性检验, 其中 8 个为上升趋势, 1 个为下降趋势——楚雄市春季以 $0.79^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率上升, 最为显著, 其次是武定县($0.44^{\circ}\text{C}/10\text{a}$); 元谋县以 $0.28^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率下降, 且通过 99% 显著性检验; 永仁县为上升趋势, 但未通过显著性检验。夏季有 8 个站点的最低气温通过不同显著性水平检验, 其中 7 个为上升趋势, 1 个为下降趋势——楚雄市上升最显著($0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 禄丰市以 $0.03^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率下降, 下降趋势平缓; 元谋县、永仁县为上升趋势但未通过显著性检验。秋季有 9 个站点的平均最低气温通过不同显著性水平检验, 且均为上升趋势——楚雄市最显著($0.50^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 永仁县增温较平缓($0.08^{\circ}\text{C}/10\text{a}$); 禄丰市为上升趋势, 但未通过显著性检验。冬季 10 个站点平均最低气温均通过不同显著性水平检验, 其中元谋县为下降趋势($0.08^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 楚雄市以 $0.90^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率上升最显著。

季尺度上总体表现为“冬春强、夏秋弱”的季节性变温特征(冬季 $0.36^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ →春季 $0.29^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ →秋季 $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ →夏季 $0.16^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)。楚雄市四季气温上升趋势最强烈, 永仁县最平缓; 禄丰市夏季、元谋县春季和冬季均为降温, 表现出明显的时空差异性。

Table 3. Z (M-K) test and Sen's Slope of seasonal mean minimum temperature for 10 counties/cities in Chuxiong Prefecture (1960~2024)

表 3. 楚雄州 10 县市 1960~2024 年季平均最低气温 Z (M-K) 检验及 Sen 斜率

		楚雄	大姚	禄丰	牟定	南华	双柏	武定	姚安	元谋	永仁	平均
Z (M-K 检验)	春季	8.18*	3.18*	2.46*	5.99*	2.52*	4.25*	6.34*	5.25*	-4.66*	1.08	3.46
	夏季	7.08*	4.25*	-1.29	4.77*	1.76#	6.38*	5.06*	4.42*	1.23	2.85	3.65
	秋季	6.60*	3.53*	0.96	4.73*	2.99*	5.31*	3.58*	4.61*	1.53	1.70#	3.55
	冬季	8.24*	4.15*	4.40*	6.21*	2.98*	5.00*	5.46*	6.92*	-1.35	2.28#	4.43
Sen 斜率	春季	0.79	0.19	0.12	0.33	0.13	0.23	0.44	0.35	-0.28	0.07	0.29
	夏季	0.27	0.17	-0.03	0.15	0.05	0.21	0.18	0.18	0.07	0.13	0.16
	秋季	0.50	0.21	0.06	0.29	0.17	0.25	0.26	0.28	0.10	0.08	0.22
	冬季	0.90	0.23	0.22	0.44	0.18	0.27	0.39	0.44	-0.08	0.16	0.36

*表示通过 99% ($\alpha = 0.01$) 的显著性检验, #表示通过 95% ($\alpha = 0.05$) 的显著性检验。

在年代际分析中(表 4), 季节和区域的年代际差异较大, 波动明显。多数地区冬季、春季的平均最低气温距平上升幅度明显大于夏季、秋季, 进一步证实了“冬春强、夏秋弱”的增温格局, 呈现“冷暖波动 + 区域差异 + 时间差异”的独特区域和空间特征。具体表现为: 各县市四季在 1960~2009 年多数区域以偏冷为主, 间有偏暖期或与历年持平; 2010~2024 年全域偏暖, 元谋县、永仁县、禄丰市表现较特殊。

春季元谋县、永仁县 1960~1989 年连续三个年代偏暖, 后转冷, 21 世纪 10 年代后转暖, 但元谋县转暖后的温度明显回落, 低于上世纪 60~80 年代($1.5 \rightarrow 0.4$); 南华县在 1990~1999 年冷度加剧(-1.1)。夏季禄丰市 1960~1979 年偏暖, 元谋县 1960~1989 年偏暖, 后转冷, 2010 年起转暖。秋季元谋县、永仁县 1960~1979 年偏暖, 1980~2009 年偏冷, 后温度上升转暖。冬季元谋县 1960~1979 年偏暖, 1980~2009 年偏冷或持平, 21 世纪 10 年代开始转暖。

总体而言, 楚雄州大部区域 1960~2009 年偏冷, 偶有偏暖期; 2010 年代后各季节均转为一致偏暖, 2020~2024 年正距平达到峰值, 表明气候变暖且近年加速。元谋县的特殊性依然存在, 其春、冬季的暖期强度低于 20 世纪 60~80 年代。通过年代际分析, 体现了楚雄州内不同区域的气候空间差异性和季节波动分化, 也反映了全州整体气温在季节和年代维度上的共性变暖趋势。

Table 4. Decadal anomaly analysis of seasonal mean minimum temperature for 10 counties/cities in Chuxiong Prefecture
表 4. 楚雄州 10 县市季平均最低气温年代际距平分析

	楚雄	大姚	禄丰	牟定	南华	双柏	武定	姚安	元谋	永仁	
春季	1960~1969	-3.1	-0.5	-0.2	-1.1	-0.2	-0.6	-1.4	-0.7	1.5	0.3
	1970~1979	-2.9	0.1	0.2	-1.6	0.1	-0.3	-1.0	-0.9	1.4	0.3
	1980~1989	-2.3	-0.1	-0.2	-1.0	0.4	-0.3	-0.6	-0.5	0.8	0.1
	1990~1999	-0.6	-0.2	-0.5	-0.6	-1.1	-0.4	-0.8	-0.9	0.0	-0.4
	2000~2009	-0.3	-0.6	-0.2	0.1	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.7
	2010~2019	0.7	0.6	0.8	0.4	1.1	0.5	0.8	1.0	0.3	1.0
	2020~2024	1.1	1.5	0.7	0.2	0.7	0.9	2.5	1.3	0.4	1.4
夏季	1970~1979	-1.2	-0.5	0.2	-1.0	-0.4	-0.7	-0.8	-0.8	0.1	-0.3
	1980~1989	-0.6	-0.3	-0.1	-0.4	0.1	-0.3	-0.2	-0.4	0.2	-0.1
	1990~1999	-0.1	-0.3	-0.2	-0.1	-0.5	-0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.2
	2000~2009	-0.3	-0.3	-0.2	0.0	0.1	-0.2	-0.2	-0.1	-0.5	-0.5
	2010~2019	0.2	0.3	0.1	0.0	0.4	0.4	0.2	0.3	0.6	0.6
	2020~2024	0.7	1.1	0.1	0.2	0.0	0.9	0.7	0.9	1.4	0.8
秋季	1960~1969	-1.9	-0.5	-0.2	-1.1	-0.5	-0.5	-0.9	-0.8	0.1	0.1
	1970~1979	-1.8	-0.3	0.0	-1.4	-0.4	-0.8	-0.5	-0.9	0.2	0.0
	1980~1989	-1.4	-0.5	-0.1	-0.8	-0.1	-0.3	-0.2	-0.8	-0.3	-0.2
	1990~1999	-0.2	-0.3	0.1	-0.2	-0.4	-0.5	-0.1	-0.5	-0.2	-0.2
	2000~2009	-0.3	-0.3	-0.1	0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.4
	2010~2019	0.3	0.3	0.0	-0.1	0.4	0.6	0.2	0.3	0.2	0.4
2020~2024	1.0	1.4	0.1	0.5	0.5	1.0	1.1	0.9	0.9	1.1	
冬季	1960~1969	-3.5	-0.5	-0.5	-1.3	-0.2	-0.8	-1.0	-1.0	0.9	0.1
	1970~1979	-3.6	-0.4	-0.6	-2.1	-0.4	-1.0	-1.2	-1.8	0.7	-0.3
	1980~1989	-3.0	-0.2	-0.9	-1.5	0.0	-0.4	-0.8	-1.0	-0.2	-0.2
	1990~1999	-0.9	-0.5	-0.4	-0.8	-0.9	-0.4	-0.9	-0.9	-0.5	-0.6
	2000~2009	-0.1	-0.4	-0.1	0.4	-0.1	0.0	-0.3	-0.1	0.0	-0.5
	2010~2019	0.6	0.7	0.4	0.3	0.9	0.4	0.7	0.7	0.4	0.9
	2020~2024	1.1	1.5	0.8	1.5	0.9	0.6	3.0	1.1	0.7	1.7

通过各县市四季 UF(K)曲线分析(图 3), 21 世纪开始上升速率明显更快, 表现出“前期弱上升→后期强上升或平稳→显著上升”的变化模式。元谋县仍呈现特殊性, 其 UF(K)曲线 < 0, 春季表现为下降趋势。

在楚雄州 10 县市四季(春、夏、秋、冬) M-K 突变分析的 UF(K)与 UB(K)曲线中, 部分县市不同季节在置信区间内存在交叉点, 说明存在突变现象, 且部分县市出现多个交叉点(图 3, 列举部分县市四季 M-K 曲线图)。对有突变点的县市相关季节进行 Pettitt 检验, 计算 U_i 统计量及 U_{max} , 确定突变点及显著性, 结果如表 5 所示。

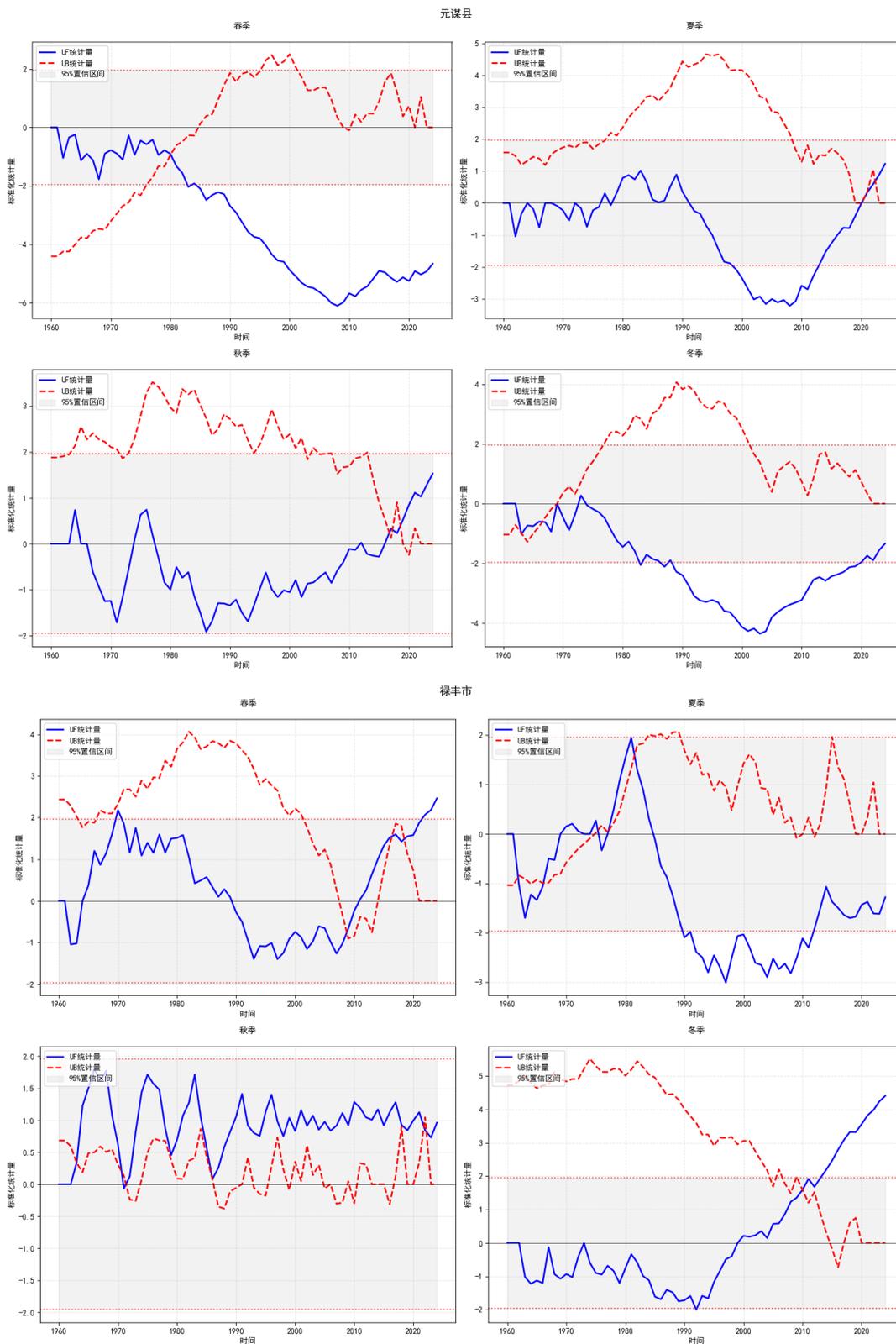


Figure 3. Mann-Kendall test curve of seasonal mean minimum temperature in partial counties/cities of Chuxiong Prefecture (1960~2024)

图 3. 楚雄州部分县市 1960~2024 年季平均最低气温 M-K 检验曲线

Table 5. Overview of seasonal abrupt change distribution for 10 counties/cities in Chuxiong Prefecture (1960~2024)
表 5. 楚雄州 10 县市 1960~2024 年各季节突变分布概况

季节	出现突变的县市数量	主要图标时段	突变特征
春季	大姚县、禄丰市、牟定县、南华县、双柏县、姚安县、永仁县、元谋县	大姚：2009 年，禄丰：2007 年，牟定：1993 年，南华：2009 年，双柏：1997 年，姚安 2002 年，永仁：2029 年，元谋：1989 年	元谋县为下降趋势的突变，其余均为上升趋势的突变；所有突变点均通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验
夏季	禄丰县、牟定县、南华县、姚安县、永仁县、元谋县	禄丰：1981 年，牟定：1992 年，南华：1997 年，姚安：1997 年，永仁：2008 年，元谋：2009 年	均为上升趋势的突变；所有突变点均通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验
秋季	大姚县、牟定县、永仁县	大姚：2014 年，牟定：1993 年，永仁：2013 年	均为上升趋势的突变；所有突变点均通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验
冬季	大姚县、禄丰县、牟定县、南华县、双柏县、永仁县、元谋县	大姚：2007 年，禄丰：1994 年，牟定：1994 年，南华：2004 年，双柏：1997 年，永仁：2007 年，元谋：1977 年	均为上升趋势的突变(元谋县上升趋势表现不明显)；所有突变点均通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验

春季和冬季发生突变的县市数量最多(分别为 8 个和 7 个),而秋季最少(3 个)。突变时间点分布分散,无明显集中期,反映了气候变化的复杂性及区域响应的异质性。

4. 结论

4.1. 年平均最低气温变化特征

楚雄州各县市(元谋县除外) 1960~2024 年年平均最低气温呈显著上升趋势(通过 $\alpha = 0.05$ 或 $\alpha = 0.01$ 显著性检验),其中楚雄市增温速率最快($Z = 8.08$, Sen 斜率为 $0.61^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$),65 年间累计升温 4.0°C ;元谋县呈不显著下降趋势($Z = -1.26$, Sen 斜率为 $-0.05^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$),未通过显著性检验。从年代际变化看,1960~1999 年为偏冷期,2000 年后总体表现为暖化趋势(冷→暖);元谋县较特殊,经历了“暖→冷→暖”的变化。21 世纪 10 年代后,各县市全域暖化趋势显著,呈现变暖加速特征。年平均最低气温突变点分布分散,无集中时段,且突变均通过显著性检验。

4.2. 季节最低气温变化特征

各县市四季平均最低气温总体呈上升趋势(禄丰市夏季、元谋县春季除外),且增温速率差异显著。楚雄市四季平均最低气温上升速率显著高于其他县市,处于“领跑”地位:春季($Z = 8.18$) Sen 斜率达 $0.79^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,65 年间升温 5.14°C ;夏季($Z = 7.08$) Sen 斜率达 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,65 年间升温 1.76°C ;秋季($Z = 6.60$) Sen 斜率达 $0.50^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,65 年间升温 3.25°C ;冬季($Z = 8.24$) Sen 斜率达 $0.90^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,65 年间升温 5.85°C 。禄丰市夏季呈不显著下降趋势($Z = -1.29$, Sen 斜率 $-0.03^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$),65 年间降温 0.2°C ;元谋县春季呈显著下降趋势($Z = -4.66$, Sen 斜率 $-0.28^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$),65 年间降温 1.82°C 。楚雄州总体表现为“冬春强、夏秋弱”的季节性温度变化特征。年代际分析表明,楚雄州大部区域 1960~1999 年偏冷,间有偏暖期;21 世纪 10 年代开始,季平均最低气温距平均呈正值,且 2020~2024 年变暖幅度在各季节均达到峰值,呈现显著变暖且近年加速的规律,与年平均最低气温分析结果一致(冷→暖)。元谋县仍具特殊性,四季年代际变化均经历“暖→冷→暖”,尤其是春季和冬季,虽转为暖化,但温度明显回落,低于上世纪 60~80 年代或 70 年代。季平均最低气温突变点分布分散,且均通过显著性检验

综上分析,各县市年和季平均最低气温在时间和空间上差异显著。无论是生态保护、农业可持续发展还是气候资源开发利用,均需对具体县市的气候情况进行独立、精细化分析,才能实现精准施策,充分发挥气候资源价值,为区域发展提供科学支撑。

参考文献

- [1] 王翠花, 李维, 缪启龙. 中国近 50 年来日最低气温变化特征研究[J]. 地理科学, 2003, 23(4): 441-447.
- [2] 刘荔昀, 丁之勇, 王磊鑫, 刘小楝, 等. 黄土高原气候变化特征及原因分析[J]. 地球环境学报, 2021, 12(6): 615-631.
- [3] 杨萍, 王乃昂, 王翠云, 曹生奎. 1960-2007 年青海湖地区气温变化趋势和突变分析[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2011, 29(2): 49-53.
- [4] 张万诚, 郑建萌, 马涛, 等. 1961-2012 年云南省极端气温时空演变规律研究[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 710-722.
- [5] 张盛霖, 邓高燕, 黄永奇. Mann-Kendall 检验法在 Excel 中的实现与应用[EB/OL]. <https://max.book118.com/html/2019/0917/8043104122002050.shtm>, 2025-01-02.