

近 57 年金沙江流域气温变化特征及未来趋势预估

史雯雨, 杨胜勇, 李增永, 高剑飞, 潘露

(四川水利职业技术学院, 成都 611231)

摘 要:基于金沙江流域 39 个气象站近 57 年的平均气温、平均最低气温和平均最高气温数据资料,采用累计距平法、Mann-Kendall 法、小波分析法及 Hurst 指数法,对金沙江流域年及四季的气温变化特征和未来趋势进行了分析和预估。结果表明:金沙江流域年平均气温、平均最低气温和平均最高气温均呈现波动上升的趋势,并通过 99%显著性检验,其中平均最低气温增幅最大,说明平均最低气温对气温上升的贡献率最大;从四季来看,四季的平均气温、平均最低气温和平均最高气温也均呈现波动上升的趋势,并均通过 90%显著性检验;从年代际变化来看,年和季节的平均气温、平均最低气温和平均最高气温自 20 世纪 90 年代开始增温,且呈现逐步加速上升的趋势,年代际距平最大值出现在 2010—2016 时间段;金沙江流域年及四季气温均具有明显的周期变化特征;金沙江流域年及四季气温的 Hurst 指数均大于 0.7,说明未来一段时间气温仍将呈持续上升的趋势。

关键词:金沙江流域;趋势变化;周期; R/S ;气温

中图分类号:P423.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0211-07

Variation Characteristics and the Future Trend Estimation of Temperature in Chinsha River Basin Over the Past 57 Years

SHI Wenyu, YANG Shengyong, LI Zengyong, GAO Jianfei, PAN Lu

(Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 611231, China)

Abstract:Based on the data of the mean, the minimum mean and the maximum mean temperature of 39 meteorological stations in Jinsha River Basin over the past 57 years, the methods of cumulative anomaly, Mann-Kendall, Morlet wavelet analysis and Hurst index were employed to analyze and predict the annual and seasonal temperature change characteristics and the future trend of Jinsha River Basin. The results are as follows. The annual mean temperature, the mean minimum temperature and the mean maximum temperature of Jinsha River Basin have significantly increased, which passes through 99% significance test, and the mean minimum temperature is proved to increase the most, indicating that the mean minimum temperature has the important contribution to the mean temperature increase; the mean temperature, the mean minimum temperature and the mean maximum temperature of the four seasons are also increasing, which all passes through 90% significance test. From the inter-decadal change, the annual and seasonal mean temperature, the mean minimum temperature and the mean maximum temperature have increased since the 1990s, and have gradually accelerated the trend of rising, the inter-decadal peak value appeared in the period of 2010—2016. The annual and seasonal temperatures of Jinsha River Basin have obvious periodic change characteristics. The Hurst indexes of annual and seasonal temperature in Jinsha River Basin are no less than 0.7, indicating that the temperature will continue to rise in the future.

Keywords:Chinsha River Basin; trend variations; periodic; R/S ; temperature

随着全球气候变化问题日益突出,气温作为气候的基本要素,逐步受到各国政府及学者的研究关注^[1]。IPCC 第五次研究报告指出,近百年全球气温

上升已高达 $0.85 \sim 0.89^{\circ}\text{C}$,气温呈现显著的升高趋势^[2]。近年来,我国气温变化特征引起了不少研究人员的关注^[3-6],研究发现我国气温近 60 a 呈现明显的

上升趋势,全国平均气温变化递增率为 $0.25^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,且区域性和季节性差异显著。金沙江流域作为长江源头河流,气候变化会使水资源供给条件发生变化,进而影响生态环境和社会经济的发展,而气温作为最基本的气候要素,对生态环境的变迁起着决定性作用^[7]。目前,针对金沙江流域的气温要素已经开展了很多研究工作,并取得了一些研究成果。陈媛等^[8]对金沙江流域及各个站点的年气温和年降水进行了趋势、周期和突变分析。施晨晓等^[9]分析了金沙江流域 30 个站点年及四季的气温和降水时间和空间变化趋势。现有文献大多以金沙江流域平均气温作为研究对象进行分析和研究,研究年限较短,并且未对未来的变化趋势进行预测分析;平均气温并不能涵盖气温普遍范围,一般来说,平均最高气温、平均最低气温和平均气温可基本涵盖气温的普遍范围,且三者的变化特征却不尽一致。因此,仅仅分析平均气温的变化特征不足以涵盖气温普遍范围内的特征,研究这 3 类气温更具有意义和价值^[10]。本文主要对金沙江流域的平均最低气温、平均最高气温和平均气温进行趋势、周期分析,为金沙江流域的开发利用提供科学的气候变化背景;同时对金沙江流域未来气候变化进行预测,对防灾减灾及生态建设具有重要的意义。

1 资料来源和研究方法

1.1 资料来源

为了保证资料的完整性,本文选取金沙江流域分布相对均匀的 39 个气象站点,金沙江流域气象站点分布见图 1。选用国家气象科学数据共享服务网平台提供的各站点 1960—2016 年的逐日平均气温、逐日平均最高气温和逐日平均最低气温数据作为基本资料。国家气象中心对各气象站的气温数据已进行了质量控制,在此基础上对数据进行了时间一致性检验和极值检验,利用 RCLIMDEX 软件进行了进一步的质量控制;部分站点存在数据缺测的现象,但缺测时间所占比例很小,本文采用相邻站点线性回归方法对个别站点的缺测资料进行插补处理,经过处理修正后的 39 个气象站的资料具有比较好的连续性,保证气温序列的完整性。

1.2 研究方法

采用累计距平法、Mann-Kendall 检验法、Morlet 小波分析法和 Hurst 指数法分别对金沙江流域年及四季的平均气温、平均最高气温、平均最低气温变化特征及未来趋势进行分析;其中四季按照春季(3—5 月),夏季(6—8 月),秋季(9—11 月),冬季(12 月—次年 2 月)进行划分。

(1) Mann-Kendall。Mann-Kendall 检验(以下称 M-K 检验)是由世界气象组织推荐并已经被广泛应用到降水、气温、径流等气象和水文研究的一种非参数检验方法,其优点是不需要样本系列遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,适用于非正态分布的时间序列。

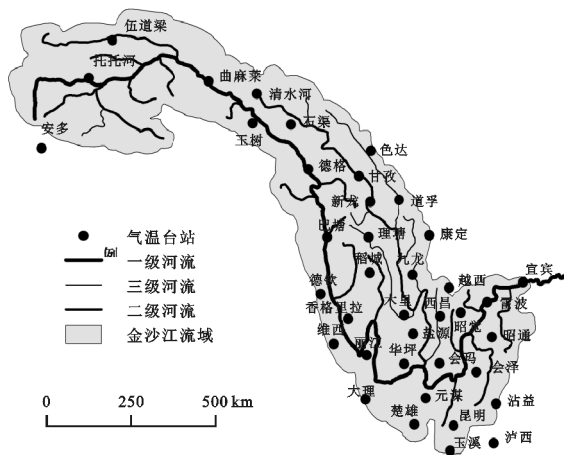


图 1 金沙江流域位置及气象站点分布

对于给定置信水平 α ,若 M-K 统计量 $|Z| < Z_{\alpha/2}$ 时,接受原假设,则趋势不显著;当 $|Z| > Z_{\alpha/2}$ 时,拒绝原假设,即认为趋势显著,且 Z 值为正表明具有上升或增加趋势, Z 值为负则意味着下降或者减少趋势。当 $|Z| > 1.64, 1.96, 2.58$ 时,分别表示样本系列通过 90%, 95%, 99% 的置信度检验^[11-13]。

(2) 小波分析。小波分析是一种具有时-频多分辨率功能的方法,它能清晰地揭示出隐藏在时间序列中的多种变化周期,对处理非平稳水文气象序列具有独特的优点,能从时域和频域上精确解释信号细微的时频变化特征^[14]。

由于采用连续 Morlet 小波作为基函数进行小波变换,能够很好地对气温序列连续进行时频局部分析。因此,本文选用 Morlet 小波进行分析研究,利用小波变换得到一个时间尺度函数,并且通过对小波方差的研究进行分析检验,从而确定主周期。小波方差反映了能量随时间尺度的分布情况,其峰值即为时间序列变化的主周期^[15-16]。

(3) Hurst 指数法。Hurst 指数法也称为重标极差分析法,是由英国水文学家 Hurst 提出,Hurst 指数法常应用于分析时间序列的分形特征和长期记忆过程,现被广泛应用于判断时间序列变化趋势的持续性或反持续性的强度,一般采用 R/S 分析法来计算^[17-18]。

不同 Hurst 指数的 H 值意味着不同的趋势变化,当 $0 < H < 0.5$,表明时间序列未来变化将与过去呈相反趋势,且 H 值越接近 0,反持续性越强; $H =$

0.5,该时间序列为随机事件,气候要素的时间序列前后变化无关; $0.5<H<1$,表明时间序列未来的变化将与过去的变化趋势一致,且 H 值越接近 1,持续性越强。Hurst 指数具体分级标准见参考文献^[19](表 1)。

表 1 Hurst 指数分级					
等级	Hurst 指数 值域	持续性 强度	等级	Hurst 指数 值域	反持续性 强度
1	$0.50<H\leq 0.55$	很弱	1	$0.45\leq H<0.50$	很弱
2	$0.55<H\leq 0.65$	较弱	2	$0.35\leq H<0.45$	较弱
3	$0.65<H\leq 0.75$	较强	3	$0.25\leq H<0.35$	较强
4	$0.75<H\leq 0.80$	强	4	$0.20\leq H<0.25$	强
5	$0.80<H\leq 1.00$	很强	5	$0.00\leq H<0.20$	很强

2 结果与分析

2.1 气温变化趋势分析

金沙江流域 1960—2016 年的多年平均气温为 9.21℃,由金沙江流域年平均气温年际变化趋势可知,金沙江流域年平均气温总体呈现上升趋势,其上升倾斜率为 0.20℃/10 a,且通过置信度为 99%的 Mann-Kendall 显著性检验,说明金沙江流域近 57 a 来年平均气温呈现显著的上升趋势;由图 2 可知,金沙江流域年平均气温在 1991 年前后呈现两种截然不同的变化趋势,1991 年之前年平均气温基本呈平稳的波动变化,1992 年以后年气温呈明显的波动上升趋势;由累积距平可知,1960—1997 年累积距平曲线呈下降趋势,在 1997 年达到最低值 -10.67℃,1997 年以后累积距平曲线呈现显著的上升趋势。

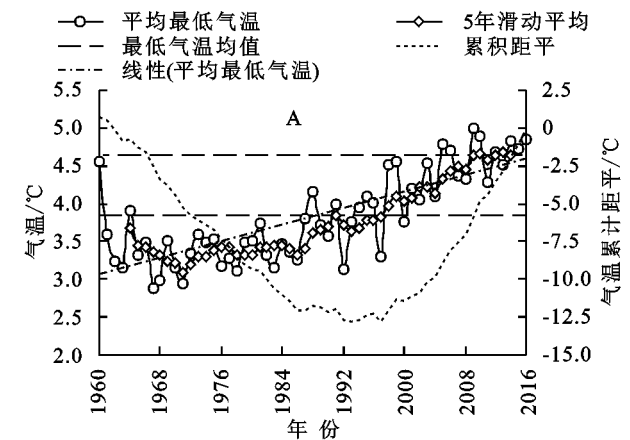


图 3 金沙江流域年平均最低气温(A)和年平均最高气温(B)年际变化趋势

由气温年代距平值可知:(1) 金沙江流域年平均气温、平均最低气温和平均最高气温均呈现上升趋势,并均通过 99%显著性检验,其中平均最低气温增幅最大,说明平均最低气温对气温上升的贡献率最大。(2) 年及四季的平均气温距平值最高均出现在 2010—2016 年,表明该时期是自 1960 年以来最暖的一个时期;年平均气温

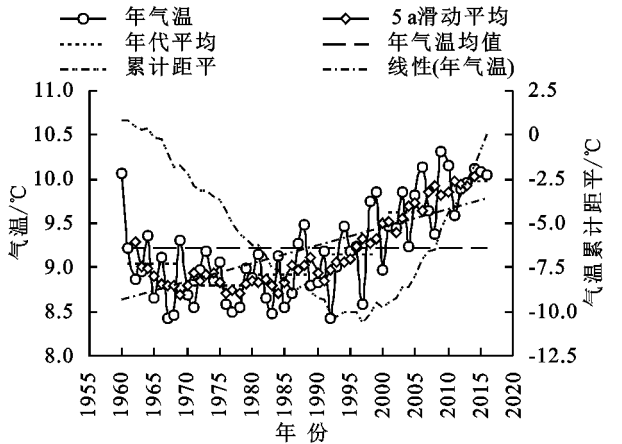
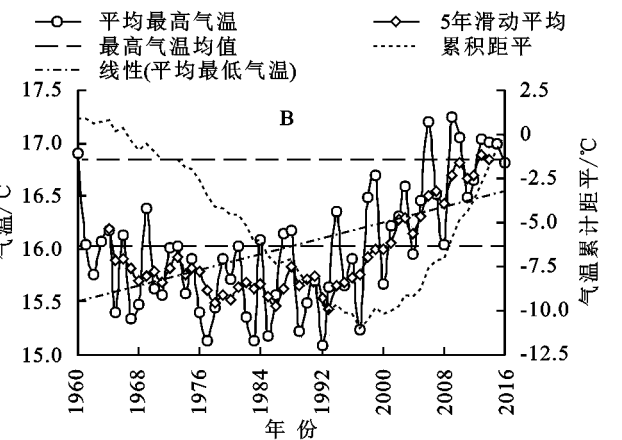


图 2 金沙江流域年平均气温年际变化趋势

图 3 为金沙江流域年平均最低气温和年平均最高气温年际变化趋势过程线,由图可知,金沙江流域 1960—2016 年的年平均最低气温和年平均最高气温平均值分别为 3.84℃和 16.02℃;金沙江流域年平均最低气温和平均最高气温总体呈现上升趋势,其上升倾斜率分别为 0.27℃/10 a 和 0.18℃/10 a,均通过置信度为 99%的 Mann-Kendall 显著性检验,说明金沙江流域近 57 a 来年平均最低气温和年平均最高气温均呈现显著的上升趋势,且年平均最低气温上升趋势高于年平均最高气温的上升趋势;由累积距平可知,年平均最低气温累积距平曲线在 1960—1993 年呈下降趋势,在 1993 年达到最低值(-12.773℃),而后呈现平缓波动变化,并在 1997 年达到次低值(-12.769℃),1997 年以后累积距平曲线呈现显著的上升趋势,年平均最高气温累计曲线变化趋势基本与年平均气温一致。



距平在 1990s 以前均为负值,1970s 温度最低是异常偏冷期,进入 21 世纪距平值为正且呈现逐渐增加趋势,其中 2000s 较 1990s 增温幅度最大为 0.472℃。(3) 年及四季的平均最低气温变化类似于平均气温变化,冬季平均最低气温距平值最低出现在 1960s,年及其余三季平均最低气温距平值最低均出现在 1970s;年及四季平均最低

气温距平最大值出现在 2010—2016 年;春季最低气温 2010—2016 年较 2000s 增幅最大,年及其余三季均是 2000s 较 1990s 增温幅度最大。(4) 年及四季的平均最高气温变化稍有所差异,最高气温距平最大值均出现在 2010—2016 年;年、春季和冬季平均最高气温距平最低

值出现在 1980s,夏季和秋季平均最高气温距平最低值分别出现在 1960s 和 1970s;年、秋季和冬季平均最高气温 2000s 较 1990s 增温幅度最大,其中冬季最高气温增幅高达 1.068℃,春季和夏季平均最高气温 2010—2016 年较 2000s 增幅最大(表 2)。

表 2 金沙江流域年及四季气温距平的年代际变化及 M-K 统计值

气温	时间	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s	2010—2016 年	倾斜率	Z 值
平均气温	年	−0.169	−0.418	−0.300	−0.061	0.411	0.767	0.204/10 a	4.901**
	春	0.056	−0.340	−0.410	−0.046	0.192	0.784	0.155/10 a	3.518**
	夏	−0.216	−0.398	−0.110	−0.046	0.260	0.727	0.178/10 a	4.839**
	秋	−0.180	−0.458	−0.288	−0.006	0.439	0.704	0.201/10 a	4.082**
	冬	−0.338	−0.475	−0.393	−0.145	0.755	0.851	0.281/10 a	4.344**
平均最低气温	年	−0.374	−0.526	−0.290	0.053	0.546	0.844	0.274/10 a	6.244**
	春	−0.348	−0.490	−0.350	0.095	0.410	0.977	0.279/10 a	5.782**
	夏	−0.166	−0.589	−0.128	−0.003	0.377	0.728	0.203/10 a	4.592**
	秋	−0.370	−0.439	−0.274	0.074	0.492	0.737	0.246/10 a	4.784**
	冬	−0.612	−0.586	−0.407	0.044	0.907	0.933	0.369/10 a	6.106**
平均最高气温	年	−0.056	−0.364	−0.365	−0.197	0.396	0.837	0.184/10 a	3.765**
	春	0.305	−0.210	−0.496	−0.175	0.083	0.703	0.083/10 a	1.824*
	夏	−0.318	−0.293	−0.154	−0.134	0.266	0.903	0.203/10 a	4.165**
	秋	−0.074	−0.514	−0.357	−0.133	0.514	0.807	0.203/10 a	3.160**
	冬	−0.135	−0.440	−0.453	−0.347	0.721	0.935	0.248/10 a	3.346**

注: ** 表示通过了 99%显著性检验, * 表示通过了 90%显著性检验。

2.2 气温周期分析

2.2.1 年气温周期分析 金沙江流域年平均气温、年平均最低气温和年平均最高气温小波系数等值线图见图 4,图中实线表示小波系数为正值,气温偏暖;虚线表示为负值,气温偏冷;等值线上的小波系数的大小表示信号的强弱,与周期显著性的强弱成正比,若小波系数等于零,则表示为突变点。

由图可知,金沙江流域年平均气温、年平均最低气温和年平均最高气温序列的小波变换实部及对应的模值能明显的反映出周期震荡及时间尺度特征。金沙江流域年平均气温、年平均最低气温在 26~30 a 左右的震荡周期最为明显,其次是 4~7 a,9~15 a,20~24 a,其中,4~7 a 在 20 世纪 60 年代中期至 70 年代中期和 1981—2016 年这两个时域表现显著;9~15 a 在 20 世纪 70 年代至 90 年代末有较强的信号;20~24 a 在 1960—2005 年的时间段有较强的信号;26~30 a 时间尺度上的震荡是全时域的,呈现出高一低—高一低—高一低 3 个较为完整的震荡周期,且目前正处于第 4 次气温偏高阶段,说明在未来几年内流域气温很可能仍处于气温偏高期。金沙江流域年平均最高气温在 26~30 a 和 20~24 a 左右的震荡周期

较为明显,其中 28 a 左右时间尺度能量最强,周期最为显著,为主周期。

小波方差能反映出信号波动的能量随时间尺度的分布,由小波方差图可知,金沙江流域年平均气温、年平均最低气温及年平均最高气温主要存在 2 个波峰,分别对应的是 21 a 和 28 a。其中 28 a 左右的时间尺度能量震荡最强烈,对小波方差贡献最大,周期最显著,为主周期,21 a 时间尺度能量震荡相对较弱,为次主周期。

2.2.2 四季气温周期分析 金沙江流域四季平均气温、平均最低气温和平均最高气温的周期变化呈现一定的差异性。(1) 近 57 a 以来金沙江流域春季平均气温、平均最低气温和平均最高气温均存在 28 a 和 22 a 左右的震荡周期,其中 28 a 左右的周期能量最强,周期最显著,且周期表现非常稳定,此外春平均最低气温还存在 5 a 左右的震荡周期;(2) 夏季平均气温、平均最低气温和平均最高气温存在 28 a 左右的震荡周期,且周期表现非常稳定;(3) 秋季平均气温和平均最高气温震荡周期基本一致,均存在 28 a,22 a 左右的震荡周期,经历了高一低—高一低—高一低 3 个震荡周期,但秋季平均最低气温存在 28 a,22 a

和 12 a 左右的震荡周期,其中 28 a 左右的周期能量最强,周期表现非常稳定;(4) 冬季平均气温存在 5 a,11 a 和 22 a 左右的震荡周期,其中 22 a 左右的周期能量最强,周期最为显著,且周期表现非常稳定;

冬季平均最低气温在 6 a,18 a 和 28 a 左右的震荡周期,其中 28 a 左右的周期能量最强,为主周期;冬季平均最高气温在 5 a,11 a,22 a 和 28 a 左右的震荡周期,其中 22 a 左右的周期能量最强,为主周期。

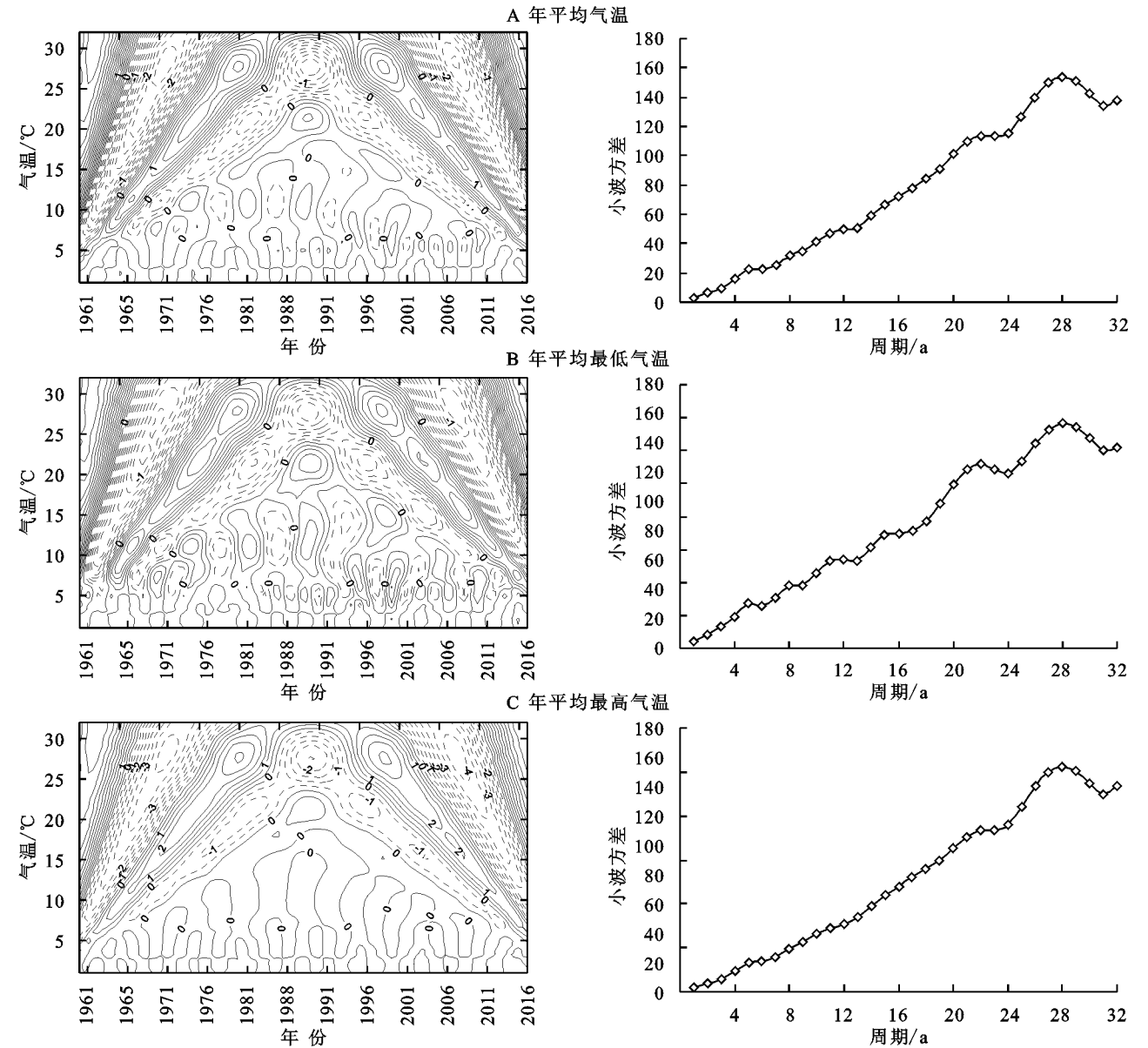


图 4 金沙江流域年气温小波系数实部等值线图及小波方差图

2.3 Hurst 指数分析

通过对金沙江流域年和四季平均气温序列 Hurst 指数进行分析(图 5—6,表 3),金沙江流域年及四季的平均气温、平均最高气温、平均最低气温序列的 Hurst 指数均大于 0.5,表明各气温序列具有长程相关性,即未来一段时间范围内,金沙江流域年及四季的平均气温、平均最高气温、平均最低气温变化情况与过去近 57 a 的上升趋势相同,气温将呈持续上升的趋势。

金沙江流域年平均气温、年平均最高气温和年平均最低气温 Hurst 指数均大于 0.8,Hurst 指数等级为 5 级,持续性强度表现为很强,其中年平均最低气

温持续性强度表现最为显著。

就四季而言,四季的年平均气温 Hurst 指数等级位于 3~5 级,夏季和秋季持续性强度表现为很强,春季表现为较强;四季的年平均最低气温 Hurst 指数等级均位于 5 级,持续性强度表现为很强,表明四季平均最低气温未来均将呈现很强的上升态势;四季的年平均最高气温 Hurst 指数等级位于 3~5 级,秋季持续性强度表现为很强,冬季表现为较强。综上,金沙江流域气温总体表现出明显的 Hurst 现象,未来保持当前继续上升趋势的概率比较大。

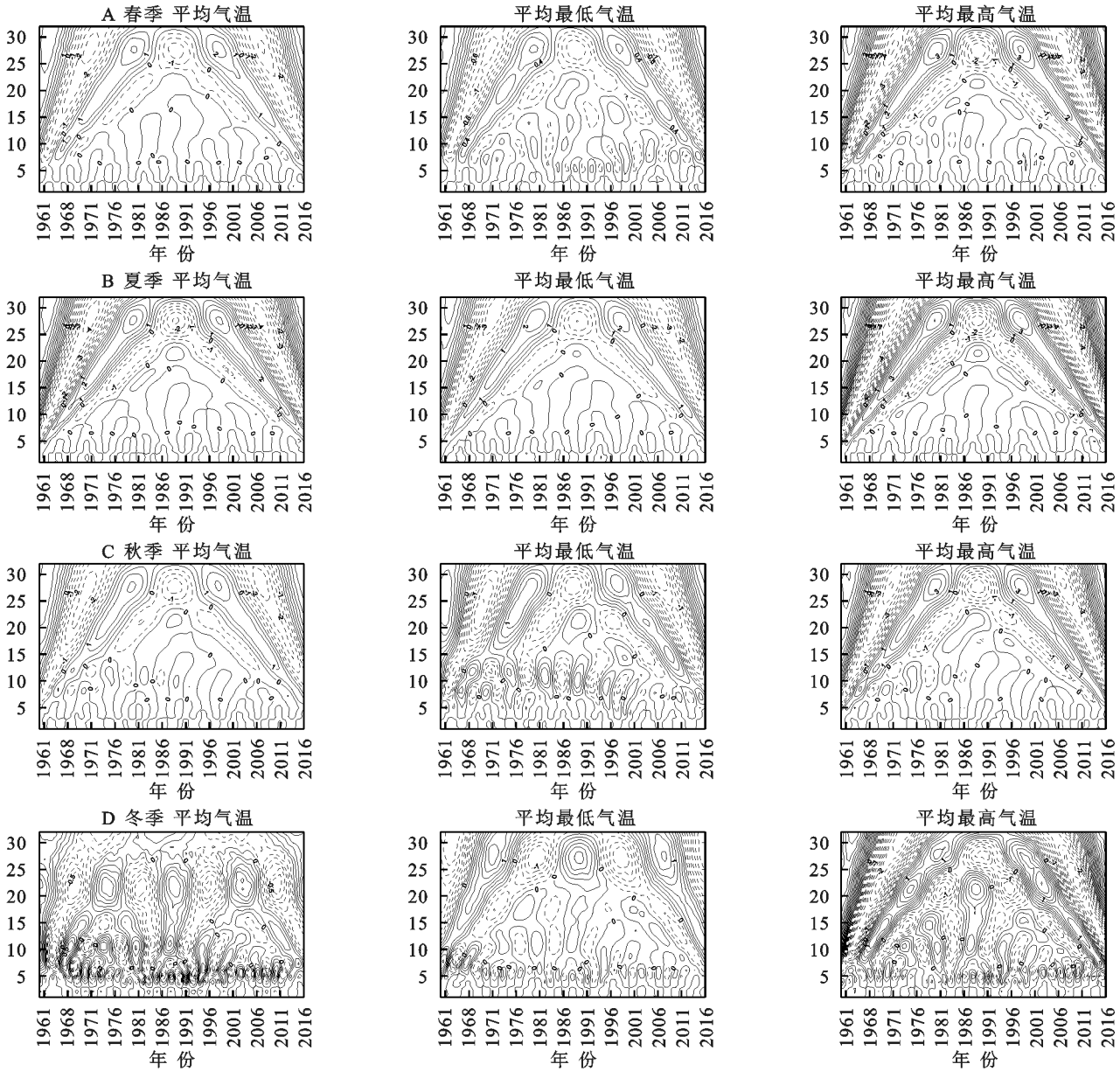


图 5 金沙江流域四季气温小波系数实部等值线

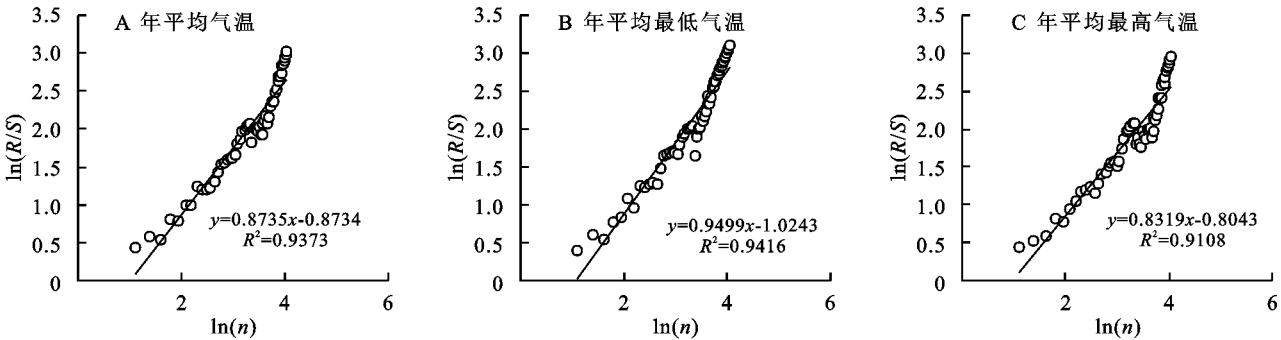


图 6 金沙江流域年气温序列 Hurst 指数

表 3 金沙江流域气温 Hurst 指数及强度等级

研究项目	年		春		夏		秋		冬	
	Hurst 指数	强度等级	Hurst 指数	强度等级	Hurst 指数	强度等级	Hurst 指数	强度等级	Hurst 指数	强度等级
年平均气温	0.8735	很强	0.7412	较强	0.8680	很强	0.8419	很强	0.7882	强
平均最低气温	0.9499	很强	0.9091	很强	0.9069	很强	0.8214	很强	0.9161	很强
平均最高气温	0.8319	很强	0.7736	强	0.7564	强	0.8212	很强	0.7075	较强

3 结 论

(1) 金沙江流域年平均气温、平均最低气温和平均最高气温均呈现波动上升的趋势,增长率分别为 $0.20^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.18^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,并均通过 99% 显著性检验,其中平均最低气温增幅最大,说明平均最低气温对气温上升的贡献率最大。

(2) 从四季来看,四季的平均气温、平均最低气温和平均最高气温也均呈现波动上升的趋势,并均通过 90% 显著性检验,其中夏季平均气温和平均最高气温对平均气温和平均最高气温贡献率最大,冬季平均最低气温对平均最低气温贡献率最大;从年代际变化来看,年和季节的平均气温、平均最低气温和平均最高气温自 20 世纪 90 年代开始增温,且呈现加速上升趋势,年代际距平最大值出现在 2010—2016 时间段。

(3) 金沙江流域年气温存在 3 个不同时间尺度的主周期,分别是 6 a、21 a 和 28 a。其中 28 a 左右的时间尺度周期最显著,为主周期。春季、夏季平均气温存在 28 a、22 a 和 6 a 左右的震荡周期,秋季平均气温存在 28 a、22 a 和 13 a 左右的震荡周期,均以 28 a 的震荡周期为主周期;冬季平均气温在 22 a 和 11 a、6 a 左右的震荡周期,其中 22 a 左右的周期能量最强,周期最显著。

(4) 金沙江流域气温总体表现出明显的 Hurst 现象,未来保持当前继续上升趋势的概率比较大。年平均气温、年平均最高气温和年平均最低气温 Hurst 指数均大于 0.8, Hurst 指数等级为 5 级,持续性强度表现为很强,其中年平均最低气温持续性强度表现最为显著;四季的气温序列 Hurst 指数等级位于 3~5 级。

参考文献:

[1] 刘晓琼,孙曦亮,刘彦随,等.基于 REOF-EEMD 的西南地区气候变化区域分异特征[J].地理研究,2020,39(5): 1215-1232.

[2] Shi J, Cui L, Wang J, et al. Changes in the temperature and precipitation extremes in China during 1961—2015 [R]. Quaternary International, 2018.

[3] 唐国利,任国玉.近百年中国地表气温变化趋势的再分析[J].气候与环境研究,2005,10(4):791-798.

[4] 张晶晶,陈爽,赵昕奕.近 50 年中国气温变化的区域差

异及其与全球气候变化的联系[J].干旱区资源与环境, 2006,20(4):1-6.

[5] Wang Q, Zhang M, Wang S, et al. Changes in temperature extremes in the Yangtze River Basin, 1962—2011[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014,24(1):59-75.

[6] 吴成启,唐登勇.近 50 年来全球变暖背景下青藏高原气温变化特征[J].水土保持研究,2017,24(6):262-266,272.

[7] Wang S J, Zhang X L. Long-term trend analysis for temperature in the Jinsha River Basin in China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2012,109(3/4):591-603.

[8] 陈媛,王文圣,王国庆,等.金沙江流域气温降水变化特性分析[J].高原山地气象研究,2010,30(4):51-56.

[9] 施晨晓,韩琳.金沙江流域年与季气候特征统计分析[J].成都信息工程学院学报,2014,29(4):424-433.

[10] 梁珑腾,马龙,刘廷玺,等.1951—2014 年中国北方地区季节气温突变与变暖停滞年份的时空变异性[J].自然资源学报,2018,33(12):2149-2166.

[11] 张亚璇,雷晓云,姜泉泉,等.喀什河径流趋势预测及周期分析[J].长江科学院院报,2018,35(2):18-22.

[12] 黄强,陈子荣.全球变暖背景下珠江流域极端气温与降水事件时空变化的区域研究[J].地球科学进展,2014, 29(8):956-967.

[13] 班璇,朱碧莹,舒鹏,等.汉江流域气象水文变化趋势及驱动力分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(12): 2817-2829.

[14] 张代青,梅亚东,杨娜,等.中国大陆近 54 年降水量变化规律的小波分析[J].武汉大学学报:工学版,2010,43 (3):278-282,287.

[15] 吉磊,何新林,刘兵,等.近 50 a 玛纳斯河流域上游气候变化的分析[J].长江科学院院报,2014,31(12):21-27.

[16] 康玲,杨正祥,姜铁兵.基于 Morlet 小波的丹江口水库入库流量周期性分析[J].计算机工程与科学,2009,31 (11):149-152.

[17] 陶望雄,贾志峰,刘招,等.泾河张家山站径流及其控制流域降雨变化特征分析[J].长江科学院院报,2014,31 (8):41-44.

[18] 罗隆诚,王俊.青藏高原未来气温变化趋势的 R/S 分析 [J].云南地理环境研究,2010,22(4):93-99.

[19] 冯新灵,冯自立,罗隆诚,等.青藏高原冷暖气候变化趋势的 R/S 分析及 Hurst 指数试验研究[J].干旱区地理,2008,31(2):175-181.