

# 金沙江流域 1957—2016 年气温时空变化特征

史雯雨, 李增永, 李娜, 潘妮

(四川水利职业技术学院, 成都 611231)

**摘要:**利用累积距平法、Mann-Kendall 检验、Kriging 插值及小波分析等方法,选取金沙江流域 39 个气象站点 1957—2016 年的平均气温数据进行了研究分析。结果表明:金沙江流域年及四季平均气温均表现为上升的趋势,且均呈现显著的增加趋势;金沙江流域年及四季年代距平的最高值均出现在 2010—2016 年,年代距平最低值春季出现在 1980s,年及夏秋季均出现在 1970s;流域年及四季气温变化均存在多个特征时间尺度,其中年平均气温具有 6 a, 21 a 和 28 a 左右的主周期,以 28 a 左右周期相位变化最为显著;随着上游向下游海拔的降低,金沙江流域气温呈现逐渐增加的趋势,其中五道梁站气温最低,元谋站气温最高;除夏季外,年及其余季节 39 个气象站中均有 87% 以上站点均呈显著性增加趋势。

**关键词:**金沙江; 气温; 趋势变化; 周期; 空间分布

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)01-0162-06

## Temporal and Spatial Characteristics of Distribution of Temperature in Chinsha River Basin from 1957 to 2016

SHI Wenyu, LI Zengyong, LI Na, PAN Ni

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

**Abstract:** The average temperatures of the 39 meteorological stations were used to analyze the temporal and spatial distribution characteristics in Chinsha River Basin from 1957 to 2016 by employing the cumulative anomaly method, the Mann-Kendall method, the Kriging and the wavelet analysis method. The results indicated that the annual and the seasonal temperatures had an upward trend, and all showed a significant increase trend; the maximum values of interdecadal annual and seasonal mean temperature anomaly in the Chinsha River Basin occurred during the period of 2010—2016, and the minimum values of spring appeared in 1980s, while the minimum values of summer, autumn and winter occurred in 1970s; there were many multiple time-scale features of annual and seasonal mean temperature in the basin, with the principal periods of about 6, 21 and 28 years, and the phase change of 28 years period was the most obvious; the mean temperature gradually increased with the altitude from the upstream to downstream of the basin, of which the Wudaliang station temperature was the lowest, while the Yuanmou station temperature was the highest; except for the summer, the mean annual temperature and the average temperature of the rest seasons of more than 87% of 39 meteorological stations presented the significant increase trend.

**Keywords:** Chinsha River Basin; temperature; trend variations; period; temporal and spatial distribution

气候变化已成为当今各国政府、科学界及公众关注的焦点之一<sup>[1]</sup>。据 IPCC (2013 年) 报告指出, 1880—2012 年全球地表平均温度已上升 0.85℃。近 30 a 全球变暖趋势较之前明显加快, 每 10 a 地表温度的增暖幅高于 1850 年以来的任何时期, 21 世纪的第一个 10 a 是最暖的 10 a<sup>[2-3]</sup>。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, 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<sup>[4-5]</sup>。目前已有很多学者对各区域及流域气温变化进行了分析研究, 也有学者对金沙江流域气温进行了研究, 卢璐等<sup>[6]</sup>对金沙江流域气候变化及径流响应进行了分析; 陈媛等<sup>[7]</sup>对金沙江流域气温降水进行了分析; 赵庆由等<sup>[8]</sup>分析了金沙江气候变化对生态环境的影响。但已有文献大多气温资料相对较短, 且不是以研究气温变化为侧重点, 本文从时间和空间角度较为深入的研究分析了金沙江流域气温要素的变化

趋势及特征,这对研究金沙江流域经济结构调整、资源合理开发利用及生态建设具有重要的意义和应用价值。

## 1 资料及方法

### 1.1 研究区概况

金沙江发源于青藏高原,流经云贵高原西北部、川西南山地,到四川盆地西南部的宜宾接纳岷江为止。流域内地形复杂多变,气候时空变化大,垂直差异十分显著;流域干流全长约 2 316 km,流域面积约 34 万 km<sup>2</sup>,是我国西南地区最大的河流之一。金沙江流域位于长江上游,包括青藏高原东部和横断山脉区,其南部延伸至滇北高原、向东至四川盆地西南边缘的广阔地区;其中,山岳分布极为广泛,占整个流域面积的 90%。金沙江位于长江干流段,该流域河流主源为沱沱河,并经由巴陇汇入通天河,随后奔流至巴塘河口进入金沙江,最后以宜宾站为流域出口;其中,雅砻江是其主要支流,流域面积超过 10 万 km<sup>2</sup>。

### 1.2 数据来源

本文选择金沙江流域内 39 个具有代表性长序列气象站点 1957—2016 年的逐日平均气温资料,气温数据资料来源于中国气象科学数据共享服务网,站点空间分布见图 1。基于站点逐日数据,分别对年及四季平均气温时空变化特征进行分析,四季按照春季(3—5 月),夏季(6—8 月),秋季(9—11 月),冬季(12—2 月)进行划分。

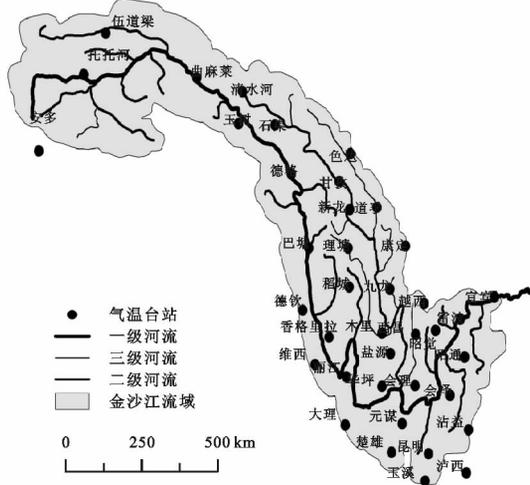


图 1 金沙江流域位置及气象站点分布

### 1.3 研究方法

采用线性回归、累积距平、趋势滑动平均、Mann-Kendall 和小波分析等方法对金沙江流域年平均气温和各季节气温的时空变化特征进行分析。

(1) Mann-Kendall 检验。Mann-Kendall 检验是由世界气象组织推荐并已经被广泛应用到气象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,可以对样本系列进行显著性和突变检验分析<sup>[9-11]</sup>,原理如下:

设气候序列为  $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $m_i$  表示第  $i$  个样本  $x_i > x_j$  ( $1 \leq j \leq i$ ) 的累积数,则可以定义一个统计量:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (2 \leq k \leq n) \quad (1)$$

的均值、方差分别为:

$$E(d_k) = k(k-1)/4, \quad (2)$$

$$\text{var}(d_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad (3)$$

将  $d_k$  标准化:

$$Z = [d_k - E(d_k)] / (\sqrt{\text{var}(d_k)}) \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

当  $k > 10$  时,  $Z$  收敛于标准正态分布。原假设  $H_0$  无趋势,采用双边趋势检验,给定一定显著水平  $\alpha$ ,在正态分布表中查得临界值  $Z_{\alpha/2}$ 。当  $|Z| < Z_{\alpha/2}$  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了 90%, 95%, 99% 的置信度检验。

(2) Morlet 小波分析法。Morlet 小波是一种具有时-频多分辨率功能的小波分析,为更好研究时间序列问题提供了可能,它能清晰的揭示出隐藏在时间序列中的多种变化周期,充分反映系统在不同时间尺度中的变化趋势,并能对系统未来发展趋势进行定性统计。Morlet 小波为复数形式的小波,比实数形式的小波有更多的优点,由于实部与虚部相位相差  $\pi/2$ ,从而消除了实数形式小波在变换过程中系数模的振荡,且从其小波系数中可分离出模和相位<sup>[12]</sup>。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<sup>[13-14]</sup>。

(3) 克里金(Kriging)空间插值法。克里金空间插值法是空间统计分析方法之一,是在半变异函数理论分析的基础上建立,并对有限区域内的区域变化取值进行无偏最优有效估计的一种插值方法。基于克里金插值法进行插值时,除了考虑待预测点与邻近样点数据的空间距离关系外,还考虑了与邻近样点之间的位置关系,并充分利用各样点数据的空间分布结构特征,使其插值结果较之传统方法更精确、更符合实际,且可以有效的避免系统误差的出现。本文采用 ArcGIS 空间分析工具中的 Kriging 插值法对金沙江流域气温空间变化趋势进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 气温趋势变化特征分析

由金沙江流域 1957—2016 年平均气温变化趋势(图 2)可以看出:流域多年平均气温为 9.2℃,年平均最高气温为 10.3℃,年平均最低气温为 8.4℃;流域年平均气温呈现上升趋势,线性倾向率为 0.151℃/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 60 a 来年平均气温呈现显著的上升趋势;由年代距平可知,20 世纪 50 年代后期气温显著高于多年平均值;60 年代至 90 年代,年气温均低于平均值,其中 70 年代气温达到最低;21 世纪初至 2016 年年气温均高于气温均值,且增幅逐渐增大;由 5 a 滑动平均可知,20 世纪 60 年代中期以前年平均气温呈现下降趋势;60 年代中期至 90 年代气温变化平缓,低于气温均值,但气温总体呈现波动上升趋势;90 年代至 2017 年呈现比较明显的上升趋势;由累积距平可知,1957—20 世纪 60 年代初期,四季气温均呈现上升趋势,表示各季节气温值均高于各季节气温的均值;20 世纪 60 年代初期至 90 年代中期气温均呈现波动的显著下降趋势,表示该时段气温值均低于各季节气温均值;20 世纪 90 年代中期至 2016 年各季节气温均呈现的显著上升趋势,表示该时段各季节气温值均高于各季节气温均值。

由金沙江流域四季平均气温变化趋势(图 3)可以看出:(1)春季、夏季、秋季和冬季平均气温均值分别为 10.1℃,17.4℃,9.4℃和 1.3℃。四季平均气温呈现上升趋势,线性倾向率分别为 0.098℃/10 a,

0.129℃/10 a,0.153℃/10 a 和 0.224℃/10 a;其中冬季增温最为显著,且四季均通过置信度为 99%的 Mann-Kendall 显著性检验,说明金沙江流域近 60 a 来四季平均气温均呈现显著的上升趋势。(2)由 5 a 滑动平均可知,从 1957—20 世纪 60 年代中期,四季平均气温呈现显著下降趋势;60 年代中期至 90 年代中期,四季平均气温呈现波动的变化趋势,其中秋季气温波动幅度最大;90 年代中期至 2016 年,四季平均气温均呈现显著的上升趋势。(3)由累积距平曲线可知,1957—20 世纪 60 年代初期,四季气温均呈现上升趋势,表示各季节气温值均高于各季节气温的均值;20 世纪 60 年代初期至 90 年代中期气温均呈现波动的显著下降趋势,表示该时段气温值均低于各季节气温均值;20 世纪 90 年代中期至 2016 年各季节气温均呈现的显著上升趋势,表示该时段各季节气温值均高于各季节气温均值。

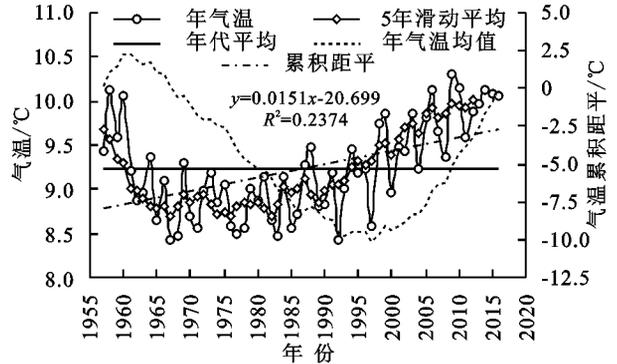


图 2 金沙江流域年平均气温年际变化趋势

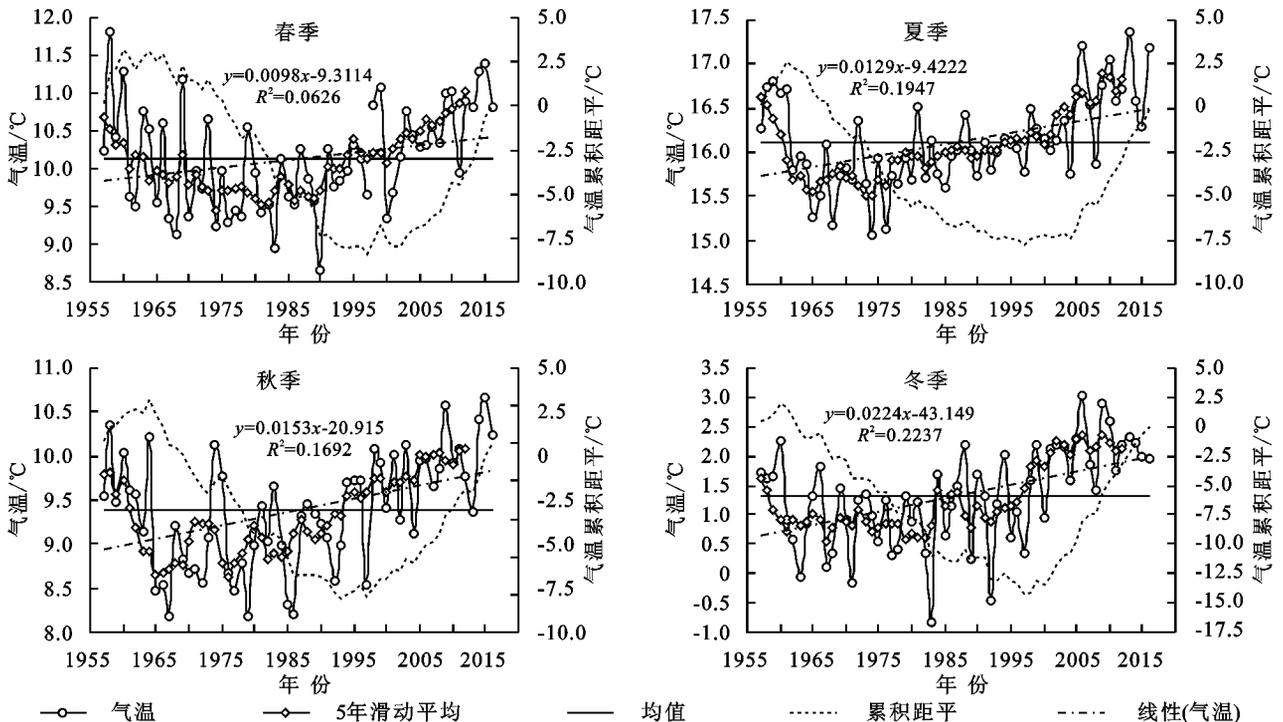


图 3 金沙江流域四季平均气温年际变化趋势

## 2.2 气温年代际变化特征分析

由金沙江气温年代际变化(表 1)可知,金沙江流域年平均气温呈现出先下降后上升的变化趋势,1957—1959 年平均气温高于近 60 a 气温均值;1960—1990s 气温年代距平值均为负值,此段时期气温均低于近 60 a 气温均值,其中 70 年代年气温距平值为  $-0.443^{\circ}\text{C}$ ,是近 60 a 来最为寒冷的一段时期;进入 20 世纪后,金沙江气温年代距平值均为正值,且增值逐渐加大,2010—2016 年距平值为  $0.741^{\circ}\text{C}$ ,达到最大,其中 2000—2009 年较 1990s 气温年代增幅为  $0.512^{\circ}\text{C}$ ,2010—2016 年较 2000—2009 年气温年代增幅为  $0.315^{\circ}\text{C}$ ;金沙江流域四季气温年代际变化与年气温年代际变化趋势基本一致,均经历了先下降后上升的过程。其中春季气温的年代距平最低值出现在 1980s,夏季、秋季、冬季气温的年代距平最低值均出现在 1970s。四季的年代距平值最高均出现在 2010—2016 年,其中最大值为冬季年代距平值  $0.833^{\circ}\text{C}$ 。1957—1959 年春季气温年代距平值为四季中最大,为  $0.697^{\circ}\text{C}$ ;1960s 较 1957—1959 年降温幅度最大,其中春季  $0.678^{\circ}\text{C}$ ,夏季  $0.720^{\circ}\text{C}$ ,秋季  $0.605^{\circ}\text{C}$ ,冬季  $0.704^{\circ}\text{C}$ ;春夏两季 2010—2016 年较 2000—2009 年升温幅度最大,其中春季  $0.505^{\circ}\text{C}$ 、夏季  $0.428^{\circ}\text{C}$ ;秋冬两季 2000—2009 年较 1990s 升温幅度最大,其中秋季  $0.445^{\circ}\text{C}$ ,冬季  $0.934^{\circ}\text{C}$ 。

## 2.3 气温周期变化分析

金沙江流域年平均气温小波系数等值线图如图 4 所示,图中实线表示小波变换系数为正值,表征气温变暖;虚线表示为负值,表征气温偏冷;等值线上的小波系数的大小表示信号的强弱,若小波系数等于零,则表示为突变点。在不同时间尺度里,其平均气温的结构也不同。由图可知,金沙江流域近 60 a 来年平均气温在 4~10 a,20~24 a,26~30 a 左右时

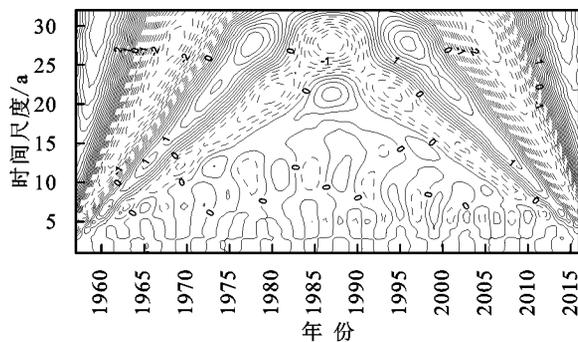


图 4 金沙江流域年平均气温小波系数实部等值线及小波方差

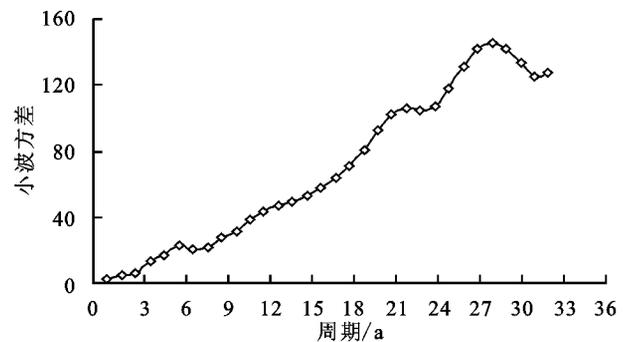
金沙江流域各季节平均气温的周期变化并不完全一致(图 5)。近 60 a 以来金沙江流域春季平均气温存在 28 a,22 a 和 6 a 左右的震荡周期,其中 28 a 左右的周期能量最强,周期最显著,且周期表现非常稳定;夏季平均气温在 28 a,22 a 和 6 a 左右的震荡周期,其中 28 a 左右的周期能量最强,周期最显著,且周期表现非常稳定。

间尺幅相位变化较为明显,在这 3 种时间尺度上年气温经历了明显的冷暖交替变化,全域性较好。其中 26~30 a 时间尺度的周期震荡十分显著,代表了流域年平均气温的年代际变化和年际变化情况,而小尺度的年平均气温过程则反映了由大尺度背景下的详细变化过程,金沙江流域年平均气温在 26~30 a 时间尺度主要经历了 7 个冷暖交替的变化过程,到 2016 年以后等值线尚未完全闭合,说明在未来几年内流域很可能仍处于气温偏高期。

表 1 金沙江流域年、季平均气温距平的年代际变化  $^{\circ}\text{C}$

年代	年代际变化 $^{\circ}\text{C}$				
	年	春	夏	秋	冬
1957—1959 年	0.482	0.697	0.479	0.403	0.348
1960s	-0.195	0.019	-0.241	-0.202	-0.356
1970s	-0.443	-0.377	-0.423	-0.479	-0.493
1980s	-0.326	-0.447	-0.135	-0.309	-0.411
1990s	-0.086	-0.082	-0.071	-0.027	-0.164
2000—2009	0.426	0.242	0.274	0.418	0.770
2010—2016	0.741	0.747	0.702	0.683	0.833
1957—2016 年均值	9.237	10.134	16.117	9.382	1.314

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存在 3 个波峰,分别对应的是 6 a,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,6 a 和 21 a 时间尺度能量震荡相对较弱,为次主周期。6 a 和 21 a 时间尺度的周期能量在 20 世纪 90 年代中后期发生变化,表明流域气温在该时间点可能发生突变,导致周期发生一定的改变,同时根据累积距平法和 M-K 突变检验法分析年平均气温突变点均出现于 1997 年左右,这与相关研究结论一致<sup>[7,15]</sup>。相比 6 a 和 21 a 尺度的周期,28 a 时间尺度的周期在整个研究时段表现的较为稳定。



著,且周期表现非常稳定;秋季平均气温在 28 a,22 a 和 13 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;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,且周期表现非常稳定。

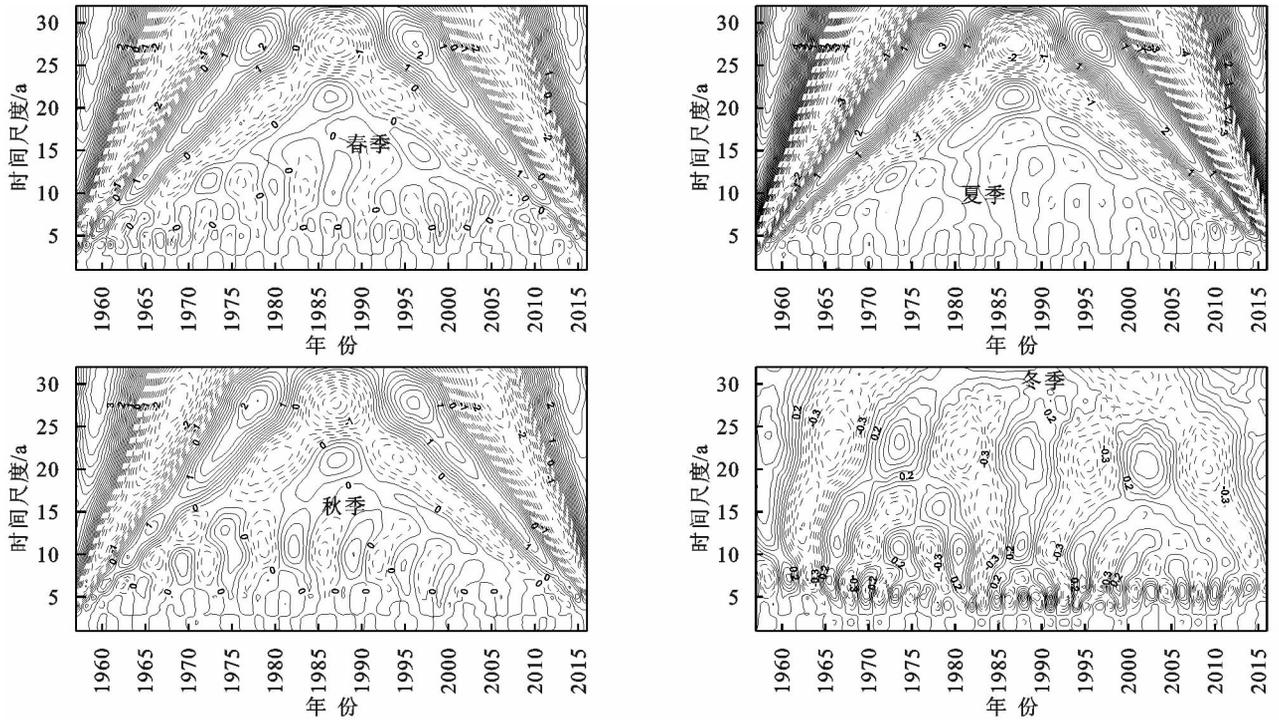


图 5 金沙江流域各季节平均气温小波系数实部等值线

### 2.4 气温空间变化特征分析

由金沙江流域年平均气温空间分布图(图 6)可知,流域年平均气温从上游向下游随着海拔的降低而逐渐升高,其中最低值为五道梁站 $-5.20^{\circ}\text{C}$ ,最高值为元谋站 $21.66^{\circ}\text{C}$ ;选取的 39 个气象站点中,有 35

个站点年气温 Z 值均大于 1.96 并通过 95% 显著性检验,呈显著性增加趋势;盐源站与越西站未通过 95% 显著性检验,呈不显著增加趋势;华坪站与元谋站呈现下降趋势,其中元谋站( $Z=-2.424$ ),通过了 95% 显著性检验,与之前的相关研究结论一致<sup>[16]</sup>。

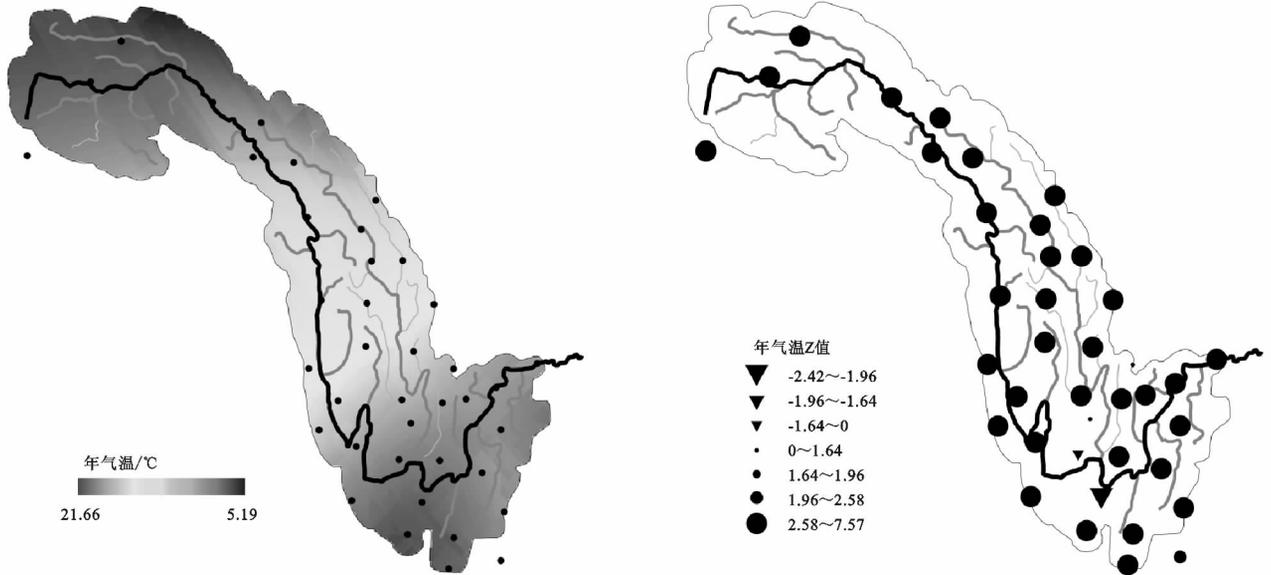


图 6 金沙江流域年平均气温及 M-K 统计值空间分布

由金沙江流域四季平均气温空间分布图(图 7)可知, (1) 春季:流域春季平均气温从上游向下游随着海拔的降低而逐渐升高,其中最低值为五道梁站 $-5.254^{\circ}\text{C}$ ,最高值为元谋站 $24.252^{\circ}\text{C}$ ;选取的 39 个气象站点中,有 26 个站点春季气温 Z 值均大于 1.96 并通过 95% 显著性检验,呈显著性增加趋势;华坪站、元谋站、越西站呈下降趋势,其中元谋站通过了 95% 显著性检验( $Z=-2.832$ );其余 10

个气象站点春季气温呈不显著增加趋势。(2) 夏季:流域夏季平均气温从上游向下游随着海拔的降低而逐渐升高,其中最低值为五道梁站 $4.761^{\circ}\text{C}$ ,最高值为宜宾站 $26.097^{\circ}\text{C}$ ;选取的 39 个气象站点中,有 34 个站点夏季气温 Z 值均大于 1.96 并通过 95% 显著性检验,呈显著性增加趋势;华坪站、昭觉站未通过显著性检验,呈不显著增加趋势;盐源站、元谋站、越西站呈下降趋势,均未通过

95%显著性检验呈不显著降低趋势。(3) 秋季:流域秋季平均气温从上游向下游随着海拔的降低而逐渐升高,其中最低值为五道梁站 $-4.950^{\circ}\text{C}$ ,最高值为元谋站 $20.907^{\circ}\text{C}$ ;选取的 39 个气象站点中,有 35 个站点秋季气温 Z 值均大于 1.96 并通过 95%显著性检验,呈显著性增加趋势;道孚站、华坪站、盐源站未通过显著性检验,呈不显著增加趋势;元谋站呈下降趋势但不显著( $Z=-$

$0.427$ )。 (4) 冬季:流域冬季平均气温从上游向下游随着海拔的降低而逐渐升高,其中最低值为清水河站 $-15.602^{\circ}\text{C}$ ,最高值为元谋站 $15.572^{\circ}\text{C}$ ;选取的 39 个气象站点中,有 35 个站点冬季气温 Z 值均大于 1.96 并通过 95%显著性检验,呈显著性增加趋势;宜宾站、越西站未通过显著性检验,呈不显著增加趋势;元谋站、华坪站呈下降趋势,其中元谋站( $Z=-2.564$ )通过显著性检验。

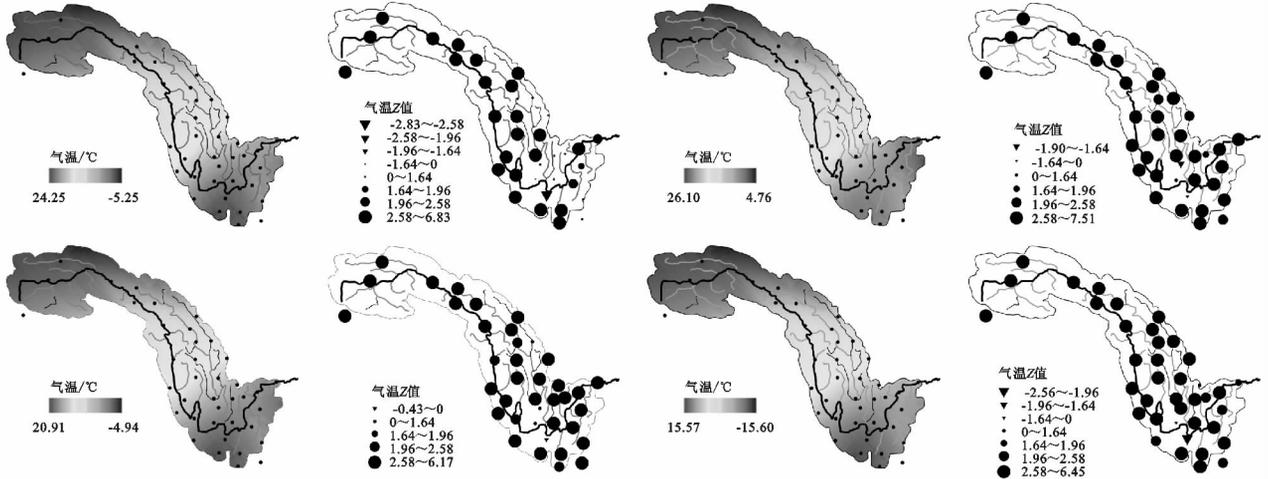


图 7 金沙江流域四季平均气温及 M-K 统计值空间分布

### 3 结论

(1) 金沙江流域近 60 a 的年平均气温及四季平均气温均呈现显著的增加趋势,其中冬季增温最为明显;除春季最冷年代发生在 1980s 外,年及其余三季 1970s 最寒冷年代均为 1970s,年及四季气温最高年代为 2010—2016 年。

(2) 金沙江流域年平均气温存在 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。

(3) 金沙江流域年及四季平均气温从上游向下游随着海拔的降低而逐渐升高;选取的 39 个气象站点中,除元谋站等少数站点呈下降趋势外,其余站点均呈现显著的上升趋势。

#### 参考文献:

[1] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
 [2] 沈永平, 王国亚. PICC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.  
 [3] Jansen E, Overpeck J, Briffa K, et al. The physical science basis[R]. IPCC, 2007.  
 [4] 张峰, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 珠江流域近 55 年气温变化特

征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(2): 20-25.  
 [5] 易湘生, 尹衍雨, 李国胜, 等. 青海三江源地区近 50 年来的气温变化[J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1451-1465.  
 [6] 卢璐, 王琼, 王国庆, 等. 金沙江流域近 60 年气候变化趋势及径流响应关系[J]. 华北水利水电大学学报, 2016, 37(5): 16-21.  
 [7] 陈媛, 王文圣, 王国庆, 等. 金沙江流域气温降水变化特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(4): 51-56.  
 [8] 赵庆由, 明庆忠. 1971—2009 年金沙江流域气候变化特征及对生态环境的影响[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(6): 18-23.  
 [9] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.  
 [10] 陈宗颜. 1961—2015 年青海省东北部地区气候变化特征分析[J]. 青海师范大学学报: 自然科学版, 2016, 4(1): 1-10.  
 [11] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 519-531.  
 [12] 杨富程, 夏自强, 黄峰, 等. 额尔齐斯河流域降水变化特征[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(4): 432-437.  
 [13] 刘小波, 甄英, 周丽. 宜宾市近 60 年气温变化特征分析[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2014, 39(1): 114-119.  
 [14] 史雯雨, 李国芳, 齐滨, 等. 怒江中上游流域降水趋势和周期变化分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(4): 9-11.  
 [15] 郑然, 李栋梁, 蒋元春, 等. 全球变暖背景下青藏高原气温变化的新特征[J]. 高原气象, 2015, 34(6): 1531-1539.  
 [16] 刘艳伟, 王淑莹, 屠星磊, 等. 元谋干热河谷区近 60 年干湿状况和气温变化特征分析[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(2): 172-175.