

文章编号: 1008-2786-(2019)2-161-12

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000410

川西甘孜州 1961—2015 年气温和降水时空 变化特征研究

梅 静^{1,2,3,4}, 王 建^{1,2,3,4}, 何 亮⁵, 张梦媛^{1,2,3,4}, 张志刚^{1,2,3,4*}

(1. 南京师范大学 地理科学学院, 南京 210023; 2. 南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023;

3. 江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点, 南京 210023;

4. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 5. 国家气象中心, 北京 100081)

摘 要: 位于青藏高原向四川盆地过渡地带的甘孜藏族自治州, 分布有大面积的国家自然保护区和海洋性冰川, 了解和分析该区域气候变化的时空趋势, 对规划该地区旅游发展、环境保护和生态文明建设具有特别重要的意义。根据 1961—2015 年甘孜州 11 个站点的气温和降水数据, 采用线性回归、距平分析、滑动平均、Mann-Kendall 突变检验及样条函数插值的方法, 对甘孜州 55 年气温和降水的时空变化进行研究。研究表明: 甘孜州全年和各季气温都呈现显著上升趋势, 全年气温变化倾向率为 $0.242\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 春、夏、秋、冬气温倾向率分别为 $0.176\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.211\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.211\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.368\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 冬季气温的增加最为显著。气温倾向率在区内空间差异很大, 随着海拔升高, 增温速率增大。甘孜州的降水总体虽递增, 但增加的趋势并不显著, 全年降水倾向率为 $11.22\text{ mm}/10\text{ a}$, 各季降水倾向率分别为 $5.23\text{ mm}/10\text{ a}$ 、 $4.15\text{ mm}/10\text{ a}$ 、 $1.68\text{ mm}/10\text{ a}$ 、 $0.22\text{ mm}/10\text{ a}$, 春、夏季降水的增加对于年降水贡献最大。降水倾向率在空间上呈现由东向西逐渐减小的趋势, 在西南边缘地区降水甚至出现负增长。总体而言, 甘孜州气候有向暖湿化发展的态势, 这种趋势在高海拔地区表现得更为明显。

关键词: 甘孜州; 气温; 降水; 时空变化特征

中图分类号: P461

文献标志码: A

全球气候变化, 尤其是温室气体所引起的全球气候变暖以及极端气候出现频率增高等这些气候方面的变化, 都已成为各界关注的焦点和热点问题^[1,2]。2018 年 4 月 3 日, 中国气象局发布的《中国气候变化蓝皮书》表明, 全球变暖趋势仍在持续, 而中国是全球气候变化的敏感区和影响显著区。1951 至今, 中国地表年平均气温平均每 10 年升高 $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}$, 升温率高于同期全球平均水平, 同时, 极端降水事件也明显增多。但由于中国地域辽阔, 地形

复杂多样, 加上季风的影响, 气候特征表现出明显的区域性^[3]。国内许多学者运用不同的方法针对不同区域的气候要素的变化特征和演化规律进行了研究, 主要关注各个自然地域的过渡区域以及一些生态环境较为脆弱的地区^[4-14]。

青藏高原被称为全球气候变化的放大器, 是世界上对于气候变化最为敏感的地区之一^[14]。同时, 该地区生态环境十分脆弱, 气候要素的微小变化, 都会影响当地的农业及畜牧业生产。因此, 青藏高原

收稿日期 (Received date): 2018-09-10; **改回日期** (Accepted date): 2019-04-10

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41503054); 中国博士后科学基金项目 (2015M582728); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目 (164320H116)。[National Natural Science Foundation of China (41503054); China Postdoctoral Science Foundation (2015M582728); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (164320H116)]

作者简介 (Biography): 梅静 (1994-), 女, 江西九江人, 硕士研究生, 主要研究方向: 全球变化与区域环境。[MEI Jing (1994-), female, born in Jiujiang, Jiangxi province, M. Sc. candidate, research on global change and regional environment] E-mail: meijing0227@163.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 张志刚 (1984-), 男, 山西忻州人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 冰川地貌年代学。[ZHANG Zhigang (1984-), male, born in Xinzhou, Shanxi province, Ph. D., associate professor, specialized in chronology of glacial landform] E-mail: zhangzhigang840620@126.com

及其周边地区早已成为气象学者研究气候变化的重点地区^[15-17]。

甘孜州位于四川省西部川西高原,地处青藏高原向四川盆地过渡的地带,生态环境脆弱,分布有大面积的自然保护区和海洋性冰川。州内地形复杂多样,高原、高山广布,地势陡峭,海拔高差较大。目前,单独对于甘孜州气候特征进行的研究很少,且大多仅对单一气候要素或仅集中在时间尺度上^[18-19]。而对于较大尺度的横断山区的气候特征研究较多,横断山区 1960—2008 年气温和降水时空变化特征研究表明:近 50 年来横断山区气温呈变暖趋势,降水变化较为复杂,除夏季降水外,其他季节降水均表现出由西南向东北和由南向北递减的趋势^[5]。横断山区内 90 个气象站点 1961—2011 年气温和降水资料对于其年季月变化特征进行研究表明:横断山区气候趋于暖干化,且存在明显的区域差异^[20]。横断山区是我国西南纵向岭谷区的主要组成部分,而这样的地形特征对区域水热条件的空间分布有明显的“通道—阻隔”效应,因此该地区气候特征存在明显的区域差异,这种差异在高海拔地区如甘孜州表现得更为明显。因此,本文根据分布于甘孜州的 11 个气象观测站 1961—2015 的地面气温和降水日值资料,利用线性回归、距平分析、滑动平均、Mann-Kendall 突变检验及样条函数插值等方法,对该地区的气温和降水的时空特征进行研究,为监测、诊断、评估和预测该区域气候变化及其影响提供科学依据,对于该地区生态环境的保护及灾害防治具有重要意义。

1 数据来源与方法

1.1 研究区概况

甘孜州位于四川省西部川西高原(97°22′~102°29′ E、27°58′~34°20′ N),地处青藏高原向四川盆地过渡的地带,面积约 15.3 万 km²,是我国第二大藏区。按纬度来说,甘孜州属于亚热带地区,但由于区内地势较高,高山、高原广布,形成了典型的高原大陆型气候,干、雨季分明^[12]。由于南北跨 6 个纬度,随着纬度的自南向北增加,气温逐渐降低,在 6 个纬距范围内,年均气温相差达 17℃以上;加上构造运动活跃,地形类型复杂,高差较大(甘孜州南部的河谷地带与北边的高原区有约 3000 m 左右

的海拔高差),州内不同地区的气温和降水也有很大差异^[18]。川西高原冬日严寒,夏日温凉,冬季时高原气温要比同纬度的东部低海拔区低 8~10℃;夏季时高原气温一般在 8~18℃之间,属我国盛夏气温最低的地区。

1.2 数据来源

本文数据来源于中国气象数据共享服务网地面气候资料日值数据(<http://www.cma.gov.cn>),依据时间序列的连续性及时段性等标准,为了保证计算气温和降水变化趋势所使用站点的一致性,剔除部分数据缺失较多或年限过短的站点;随后对所有筛选过的气象站点数据质量进行了检验,最终选取符合条件的 11 个气象站点 1961—2015 年期间共 55 年长度的逐日气温和降水数据,如图 1 所示。由于其中有部分站点数据日值数据不完整,因此选取合适的插补站点采用多元回归对缺测站点数据进行了插补^[21]。插补站一般选择缺测站点附近且相关系数较高且数据未见明显缺失的站点。对于每个台站,月平均气温和降水是通过当月记录的日温度和降水量进行平均,然后通过平均所获得的每月数据来计算年平均气温和降水。对于甘孜州,平均气温和降水为 11 个台站的平均值。分别计算 11 个站点月、季、年气温和降水平均值和距平值,其中 12 月—次年 2 月为冬季,3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季。

1.3 方法

1.3.1 时间序列趋势分析:线性回归、距平分析、滑动平均

(1)一元线性回归:研究气候要素时间序列趋势变化最为常见的方法之一^[4,7],主要是利用气候要素与时间序列之间的一元线性方程,来反映气候要素的时间变化特征,表示为:

$$y_i = a + bx_i (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其中, y_i 为气候要素, x_i 为 y_i 所对应的时间, a 为常数, b 为趋势系数。 b 的大小反映了气候要素上升或下降的速率。一般用气候变化倾向率即 $b \times 10$ 来描述气候要素趋势变化,单位为℃/10 a 或 mm/10 a。

(2)距平分析:时间序列的某一个数 x_i 与均值 \bar{x} 之差为距平值,即 $x_i - \bar{x}$ 。在对气候要素进行分析中,经常会对气候要素的时间序列进行距平化处理,即用距平序列取代气候要素原始数据。这样处理可

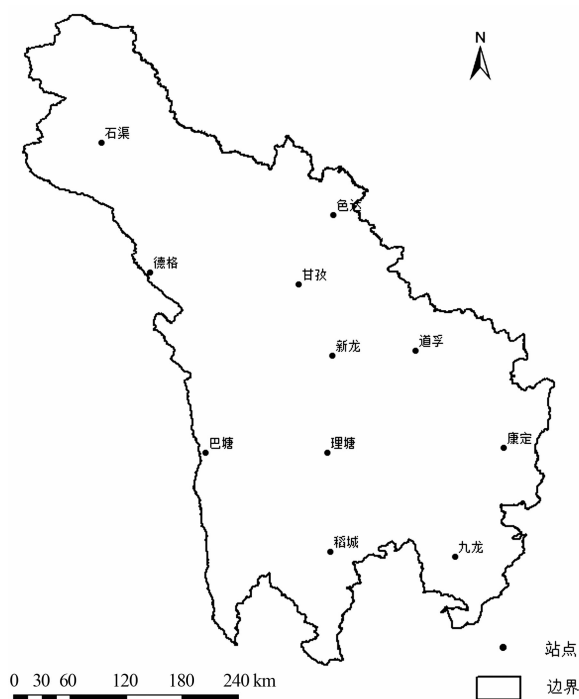


图1 甘孜州气象站点分布

Fig. 1 The distribution of the meteorological stations in Ganzi

以使得分析变化趋势更为便利,使计算结果更为直观^[7]。

(3)滑动平均:是一种基础的对要素趋势进行拟合的方法。通过确定的平滑值对气候要素的时间序列进行滑动平均处理,是一种低通滤波方法^[10],可以去掉原始数值一些极端值的影响,从而使得时间序列的长期趋势更为明显。在本文,滑动长度定为5年,对气候要素的距平值进行5年滑动平均,以期获得甘孜州55年的气候要素长期时间变化趋势。

1.3.2 时间序列突变检验:Mann-Kendall 突变检验

Mann-Kendall 检验法简称 M-K 法,属于非参数统计检验方法,最初由 Mann 和 Kendall 提出,由于 M-K 法不要求样本遵从一定的分布,且其结果不受样本异常值的影响,因此被广泛用于评估气候、水文等要素的时间序列趋势变化^[22]。其计算方法在很多文献都有描述,本文主要是通过 DPS 数据处理软件自动实现时间序列突变检验。

在 Mann-Kendall 检验的图中,有 UF 和 UB 两条曲线,UF 为正序列曲线,UB 为反序列曲线。若 UF 或 UB 的值大于 0,则表明序列呈上升趋势,小于 0 则表明呈下降趋势。当它们超过置信区间时,表明上升或下降趋势显著。若正反两个统计量序列仅有一个明显的交叉点,且位于置信区间内,则表明该点

为突变点,且统计上相对比较显著;若交叉点位于信度线之外,或者是存在多个明显的交叉点,则不确定是否为突变点获突变不明显。

2 结果与分析

2.1 气温变化特征

2.1.1 气温的年际变化

甘孜州 1961—2015 年间平均气温距平值变化及 M-K 突变检验结果如图 2a 所示。由图 2a 气温距平年际变化趋势线所示,甘孜州 55 年间平均气温总体呈上升的趋势,气温变化倾向率为 $0.242\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (已通过 0.01 显著性水平检验),大于四川省气温变化倾向率 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^[13]。由气温距平值可得,甘孜州 1983 年以前绝大部分年份为负距平,1984—2000 年间气温波动较大,正负距平交替出现,2000 年后主要为正距平。最高气温出现在 2009 年,比平均气温高 $1.26\text{ }^{\circ}\text{C}$;最低气温出现在 1965 年,比平均气温低 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。5 年滑动平均曲线(即图 2a 绿色曲线)显示,年平均气温在 20 世纪 60 年代呈上升趋势,从 1972 年起气温有所下降,从 90 年代开始,气温在波动中持续上升。

从四季平均气温变化趋势来看(如图 2b~2e),甘孜州 1961—2015 年间四季平均气温均呈显著递增趋势(已通过 0.01 显著性水平检验),但增温幅度有很大差异。春、夏、秋、冬四季气温倾向率分别为 $0.176\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.211\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.211\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.368\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,其中,冬季增温相对显著,是春季气温变化倾向率的 2.09 倍,即冬季温度的升高对于年平均气温的贡献最大。由四季 5 年平均曲线来看,四季气温在 60 年代上升,70 年代有所回落,21 世纪基本以上升为主。

甘孜州近 55 年气温全年平均气温以及各季节温度虽然增温幅度有所不同,但都呈现显著增温趋势。其中冬季气温变化倾向率最大,其对于年平均气温的上升贡献最大。年平均气温和各季节平均气温基本在进入 21 世纪有相比于其他年代更为显著的上升。IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 第 5 次评估报告中指出,全球变暖幅度自 20 世纪 90 年代以来明显加速,20 世纪末的升温是横跨全球的^[1],而甘孜地区的气温变化证实了这一结论,年平均均温、四季平均气温从 90 年代明显升

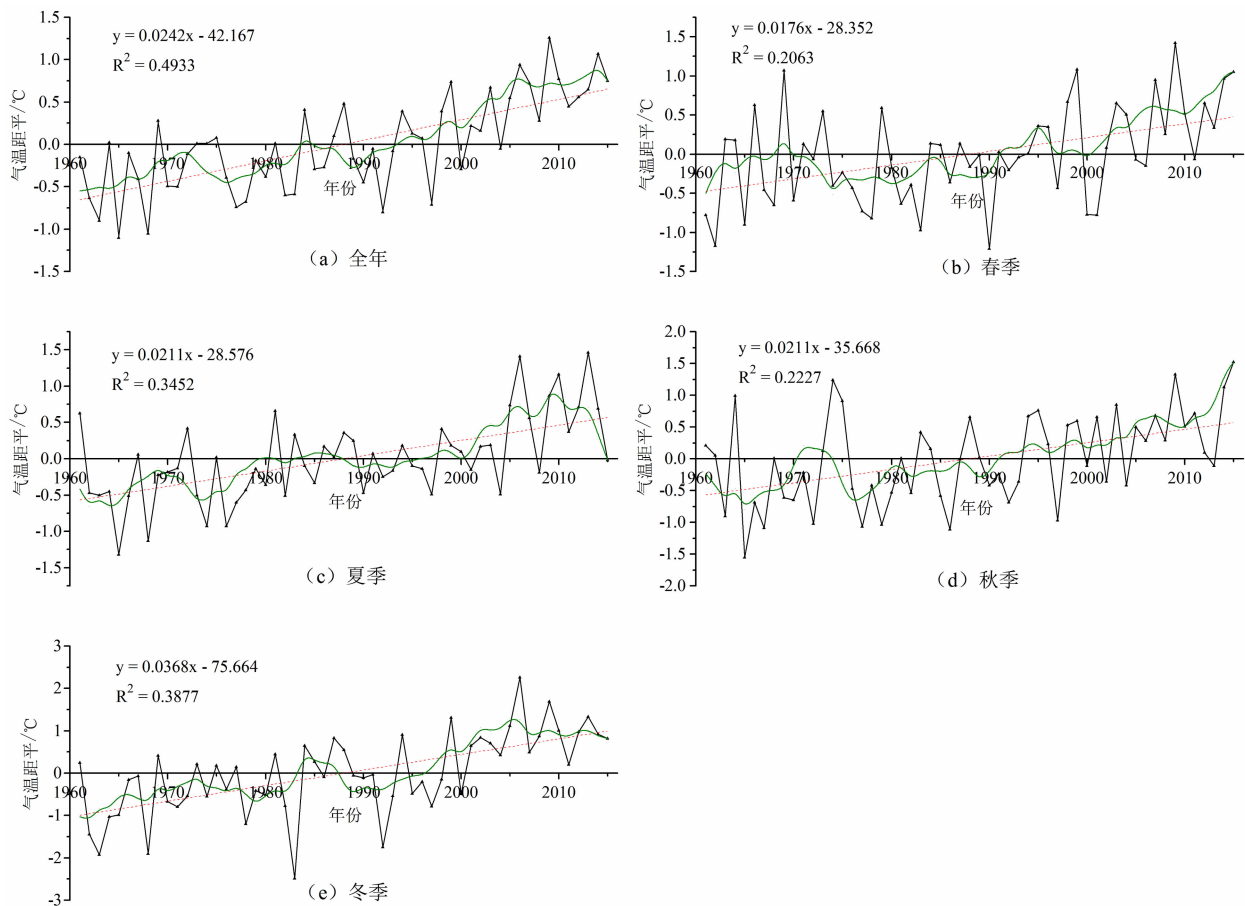


图2 1961—2015年甘孜州全年、各季平均气温距平年际变化趋势

(红线为趋势线,绿线为5年滑动平均曲线)

Fig. 2 The interannual changing trend of annual and seasonal anomalies of temperature in Ganzi during 1961–2015

高,这与全球气温变化趋势基本一致。

2.1.2 气温突变分析

甘孜州全年、各季节 M-K 突变检验结果如图 3 所示。从全年的突变检验图即图 3a 来看,

UF 曲线与年平均气温的滑动平均线的变化趋势大体一致。1971 年前, $UF < 0$, 说明在此期间, 气温表现出降低的趋势; 1971 后 $UF > 0$, 气温有回暖的迹象, 在 1975 年左右有下降的趋势; 1985 年后, UF 曲线统计量在波动中增加, 并在 1999 年左右超出 0.05 置信水平线, 表现出显著上升趋势, 可能与 1998 年强烈厄尔尼诺带来的高温影响有一定关系^[1]。由于 UF 与 UB 两条线的交点在置信线之外, 且不止一个交点, 故甘孜州的年平均气温未发生明显突变。进入 21 世纪以后, 甘孜气温显著上升, 反映了全球变暖背景下该地区对于气温变化的响应。

各个季节气温突变检验结果如图 3b~3e 所示。春季(图 3b)UF 曲线显示, 甘孜州 1960—1977 大多

年份 $UF > 0$, 表现出增温的趋势; 70 年代末到 80 年代初, 气温有小幅度的下降; 1985 年后, $UF > 0$, 并在 2007 年表现出显著上升。UF 和 UB 曲线有多个交点, 因此春季气温突变同样不明显。夏季(图 3c)UF 曲线表明, 60 年代 $UF < 0$, 70 年代中后期曲线有下降的趋势, 80 年代开始, $UF > 0$, 气温回升, 并在 1990 年左右超出置信水平线, 增温趋势明显。夏季温度同样未表现出明显的突变。秋季(图 3d)UF 曲线可见, 1961—1973 年 $UF < 0$, 之后 $UF > 0$, 并在 2003 年左右超出置信水平线, 增温趋势明显。秋季 UF 和 UB 曲线有两个交点, 且都在置信区间内, 结合 t 检验结果, 秋季气温在 1997—1998 年间发生了突变, 温度增加了 1.51℃。由冬季(图 3e)UF 曲线可见, 1965 后所有年份 $UF > 0$, 并在 80 年代末到 90 年代初以及 2000 以后超出置信水平线, 增温趋势在四季中最为明显。冬季 UF 和 UB 曲线同样有两个交点, 但只有一个在置信区间内, 结合 t 检验结果,

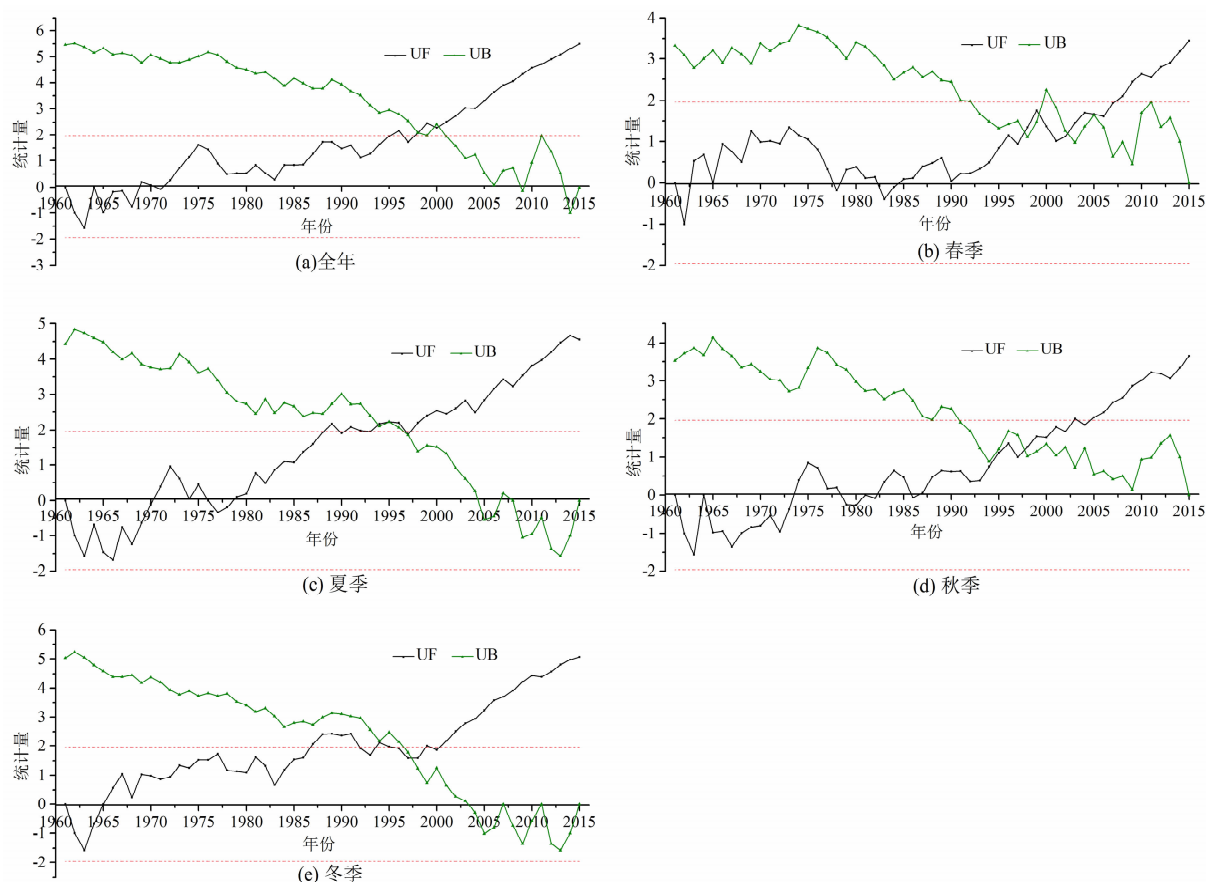


图3 1961—2015 年甘孜州全年、各季气温 M-K 突变检验

Fig. 3 Mann-Kendall test of annual and seasonal temperature in Ganzi during 1961 – 2015

冬季气温在 1997—1998 年间完成了由冷变暖的突变,温度上升了 $0.63\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

综上所述,年平均气温在 55 年间未发生突变,在 1999 年左右超出 0.05 置信水平线,21 世纪以来甘孜年平均气温表现出显著上升趋势,反映了该地区气温变化对全球变暖的响应。秋、冬两季气温在 1997—1998 年发生由冷变暖的突变,冬季增温趋势在四季中最为明显,这主要是因为甘孜地区多为山地高原,生态环境脆弱,尤其冬季对于周围环境的变化更为敏感。

2.1.3 气温空间变化特征

采用样条函数插值法利用 Arcgis 10.2 将甘孜州全年、各个季节的气温变化倾向率做空间插值,其结果如图 4 所示。全年气温变化倾向率与秋、冬两季的气温变化倾向率的空间变化趋势相对一致,都是北部和南部地区增温速率相对较高,中部和东部地区增温速率相对较低。从全年来看,升温幅度在 $0.08\sim0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 之间,区内空间差异很大。增温

率最大的地区是稻城、理塘、石渠,这些地区海拔相对较高;增温率相对较小的地区是位于甘孜东部的道孚、康定、新龙地区,这些地区海拔相对较低,比稻城、理塘海拔低近 1000 m。这说明甘孜地区随着海拔的升高,增温速率也随之增大。

与全年气温变化倾向率相比,甘孜州春季气温变化在空间上的差异更大,其变化幅度绝大部分在 $0\sim0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,即大部分地区多年春季气温呈现上升的趋势;高值中心出现在南部边缘的九龙地区附近,其气温变化倾向率超过了 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;但在东部边缘地带,其气温变化倾向率为负值,即东部地区多年春季气温是递减的。夏季相对于春季绝大部分地区气温变化倾向率为正值,即以增温为主,变化幅度在 $0\sim0.37\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 之间,最高值和最低值的差值相对于春季较小。其中,西部和中部海拔较高的地区增温速率较大,东部和稻城以南地区相对海拔较低的地区增温速率相对较小。秋、冬两季的气温变化倾向率的空间变化与全年的分布特征类似,增温

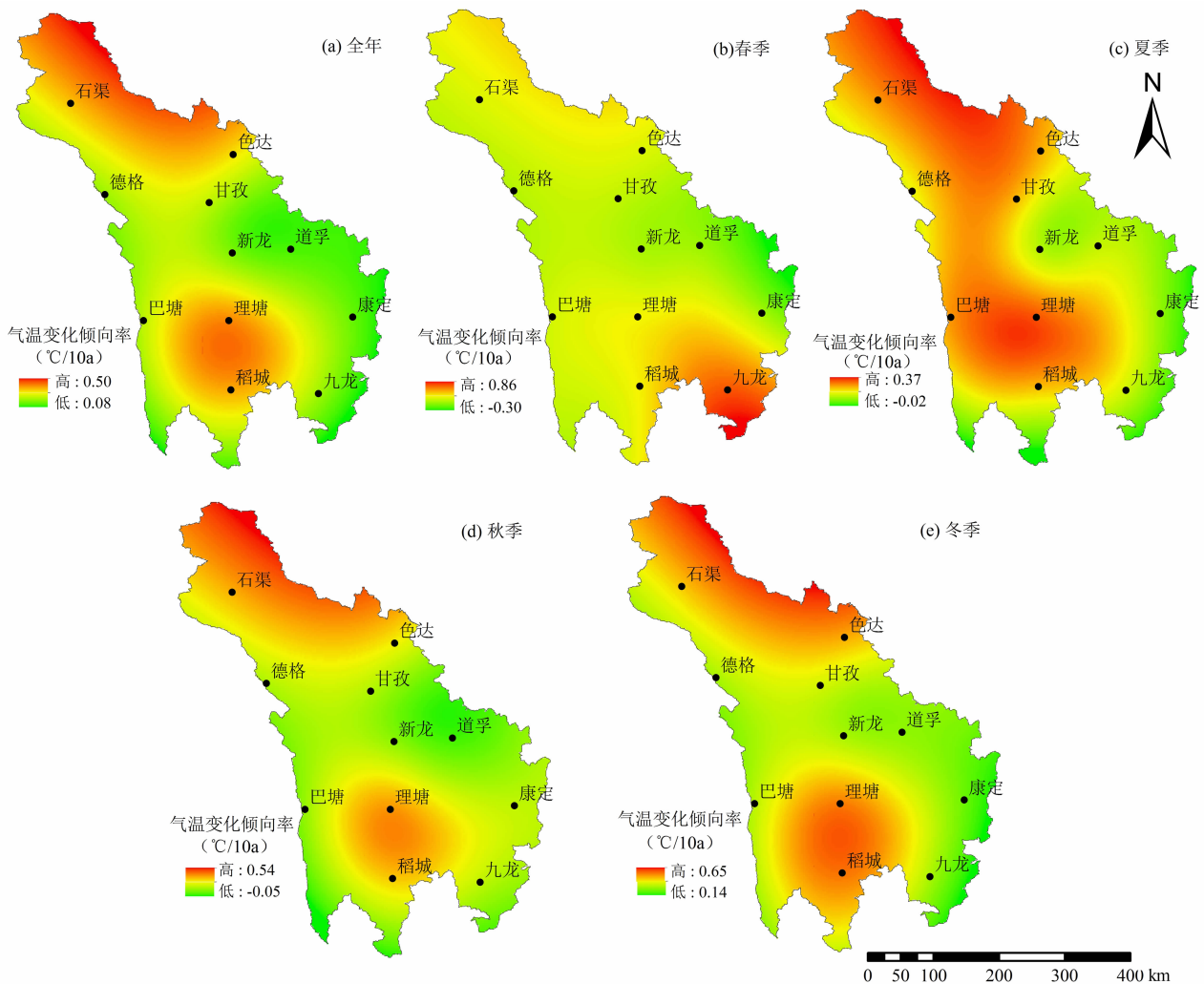


图4 1961—2015年甘孜州全年及各季气温变化倾向率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual and seasonal temperature variation in Ganzi during 1961–2015

中心在北部石渠和南部的稻城理塘地区,这些地区大都是本区海拔最高的地方。冬季气温变化倾向率的变化幅度在 $0.14 \sim 0.65 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ 之间,绝大部分地区冬季增温都比其他季节明显。

全年气温变化倾向率在区内空间差异很大,甘孜州北部的高原区和南部稻城古冰帽地区增温速率相对较高,中部和东部河谷地区增温速率相对较低,充分表明地形对山区气候变化的重大影响。随着海拔升高,增温速率增大,对于区内的冰川影响很大,加速了海洋性冰川的融化。绝大部分地区冬季增温都比其他季节明显,说明各站点基本都是冬季增温对全年增温的贡献最大。

2.2 降水变化特征

2.2.1 降水的年际变化

图5为甘孜州的1961—2015年全年及各季降

水距平变化图。从全年(如图5a)来看,近55年间甘孜州降水总体呈现出波动中上升的趋势,但趋势不明显(未通过0.01水平检验),降水变化倾向率为 $11.22 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。由降水距平值变化曲线可见,1985年左右以前,降水距平值以负值居多,90年代降水距平以正值居多。降水最大值出现在1965年,比多年降水平均值大 176.71 mm ;降水最小值出现在1973年,小于平均值 130.74 mm 。最大值与最小值的差值达 307.45 mm ,差异十分明显。从5年滑动平均曲线来看,1965—1973年间降水波动十分明显,降水下降明显,之后波动上升;90年代初,降水表现出下降趋势,90年代中后期有一定程度的回升;1998年左右,降水开始下降,到2006年开始表现出上升的趋势。总体而言,降水波动十分明显,很不稳定,各个年代的变化特征不同。

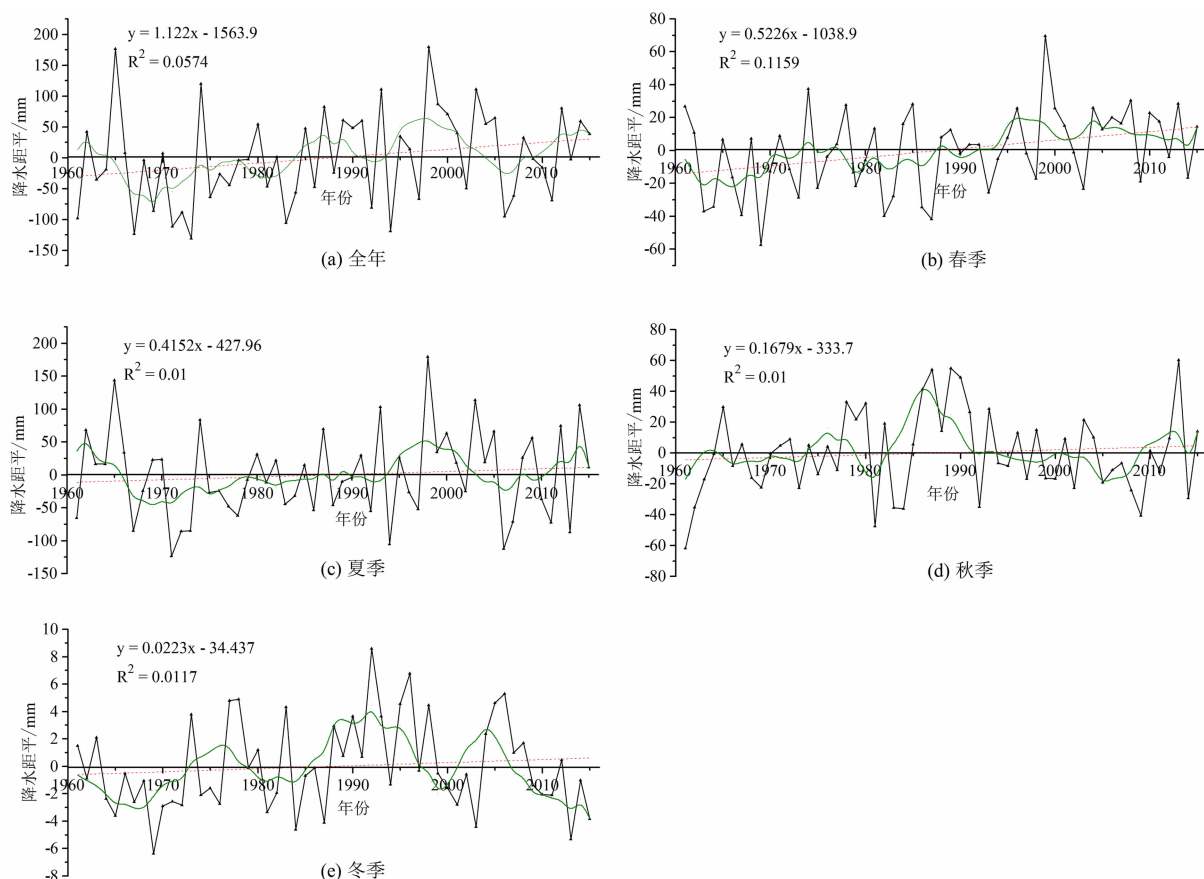


图5 1961—2015 年甘孜州全年、各季降水距平年际变化

(红线为趋势线,绿线为5年滑动平均曲线)

Fig.5 The interannual changing trend of annual and seasonal anomalies of precipitation in Ganzi during 1961 – 2015

从各个季节来看,四季的降水量均呈现不显著的增加趋势(均未通过 0.01 水平检验),正负距平交替出现,降水变化倾向率分别为 5.23 mm/10 a、4.15 mm/10 a、1.68 mm/10 a、0.22 mm/10 a。其中,春季降水量增加趋势最为明显,夏季降水量增加也较为明显,即春季降水的增加对于全年降水量的增加贡献最大,夏季次之。从 5 年滑动平均曲线来看,春、夏两季的降水量波动相较于秋、冬两季要小,但其趋势与全年降水量滑动平均曲线变化趋势大体一致,这进一步说明了春、夏两季降水量的变化对于全年降水量的影响很大。秋季降水量在 60、70 年代缓慢上升,70 年代小幅度减少;80 年代降水变化波动很大,降水量显著增加,又快速回落,2005 年后缓慢增长。甘孜州冬季降水量虽然在四季中最少,但在四季中波动最大,5 年滑动平均曲线出现了 3 次较为明显的波峰(1977、1992、2003)和 3 次较为明显的波谷(1967、1984、1999)。

与气温显著的上升趋势相比,甘孜州的降水总体虽递增,但增加的趋势并不显著,其波动较为明显,降水量不稳定,各个年代的变化趋势都有所差异。四季中春、夏季降水增加相对显著,对于年降水的增加贡献最大,主要是因为该地区的降水主要集中在春、夏两季;冬季降水量虽然最少,但年际波动最大。

2.2.2 降水突变分析

甘孜州全年、各季节降水 M-K 突变检验结果如图所示。从全年降水 M-K 突变检验(如图 6a)来看,大部分年份 $UF > 0$;70 年代绝大部分年份 $UF < 0$,即降水量在这一阶段有下降的趋势。 UF 与 UB 两线的交点有 3 个,且都在 80 年代,说明这一阶段降水量波动较大。结合 t 检验结果,这 3 个交点都不是突变点,即降水量在 55 年间未发生明显突变。

各个季节降水突变检验结果如图 6b ~ 6e 所示。

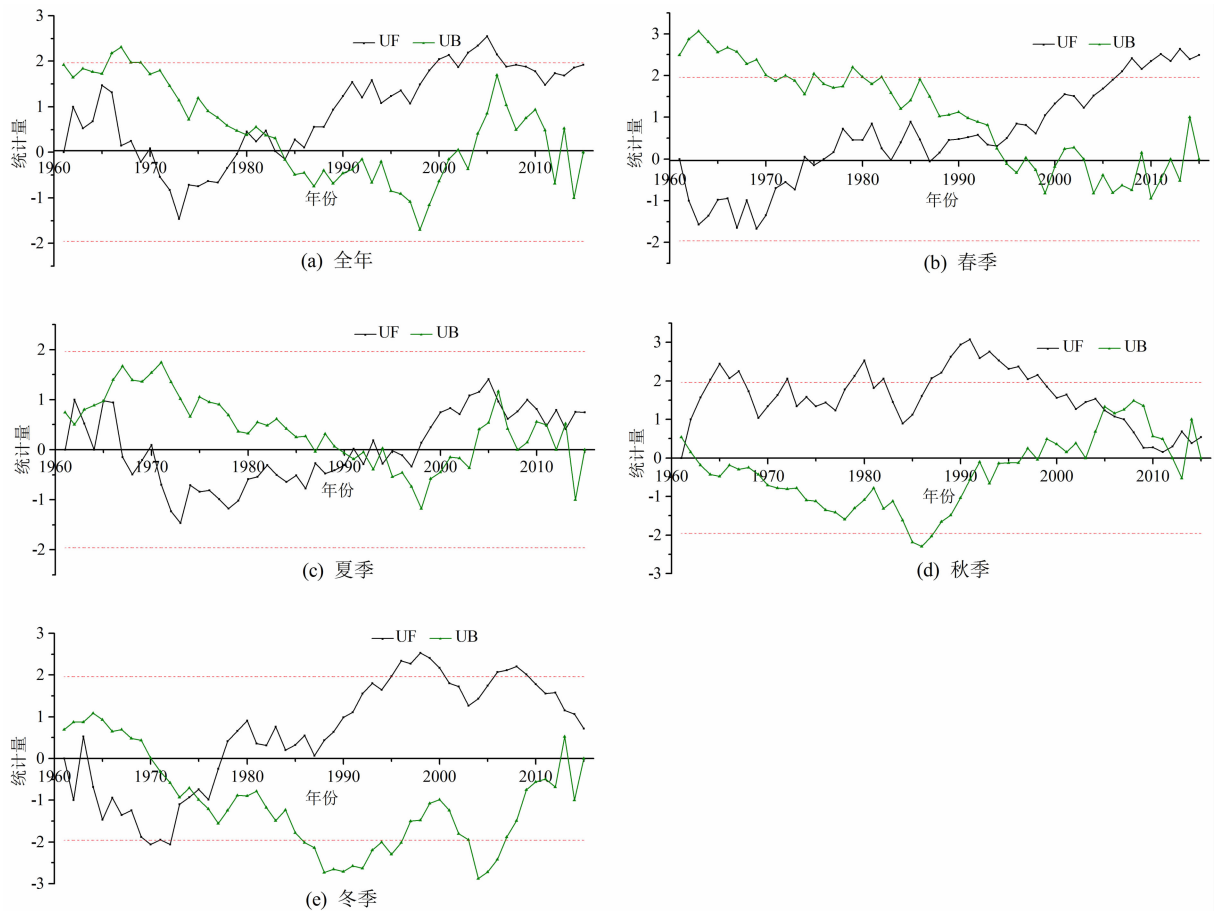


图6 1961—2015年甘孜州全年、各季降水 M-K 突变检验

Fig. 6 Mann-Kendall test of annual and seasonal precipitation in Ganzi during 1961–2015

春季 UF 曲线显示,1976 年前绝大多数年份 $UF < 0$,降水量表现出递减的趋势;1976 年后 $UF > 0$,降水量增加,并在 2006 左右超出 0.05 置信水平线,即春季降水量表现出显著增加的趋势。UF 和 UB 在 1994 年左右相交,且在置信区间内,因此,春季降水在 1994 年发生了由干转湿的突变。夏季 M-K 突变检验(图 6c)表明,UF 曲线都位于置信区间,其未表现出明显的上升或下降趋势。从 60 年代后期到 90 年代后期,绝大部分年份 $UF < 0$,即这段时期夏季降水表现出递减的趋势;从 1998 年开始 $UF > 0$,夏季降水量逐渐增多。夏季 UF、UB 曲线有多个交点,故未发生明显突变。由秋季降水 UF 曲线可见,55 年 $UF > 0$,说明秋季降水总体呈现增加趋势,但多数年份不明显。但 90 年代 UF 曲线超过信度水平,表明 90 年代秋季降水明显增多。秋季两曲线同样有多个交点,所以突变同样不明显。由冬季突变检验(图 6e)可见,1977 年前绝大部分年份 $UF < 0$,冬季

降水量呈现递减趋势;1977 年后所以年份 $UF > 0$,降水量增加,并在 90 年代后期超过置信区间,这一阶段降水增加较为明显。冬季降水 UF、UB 在 1974—1975 年间有一个交点,冬季降水在此期间完成了由干变湿的突变。

综上所述,年降水量在 55 年未发生明显突变,降水量主要以增加为主。春季降水在 1994 年发生突变,冬季降水在 1974—1975 年间发生突变。

2.2.3 降水空间变化特征

利用样条函数法对甘孜州全年、各个季节的降水变化倾向率做空间变化的分析,其结果如下图 7 所示。全年降水变化倾向率与气温变化倾向率的空间变化有很大差异,降水倾向率在空间上呈现由东向西逐渐减小的趋势,变化幅度在 $-21.92 \sim 35.51 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 之间。年降水倾向率的高值中心在康定地区,东部地区降水都表现出相对甘孜其他地区更为明显的增加趋势;中南部的理塘、稻城以及北

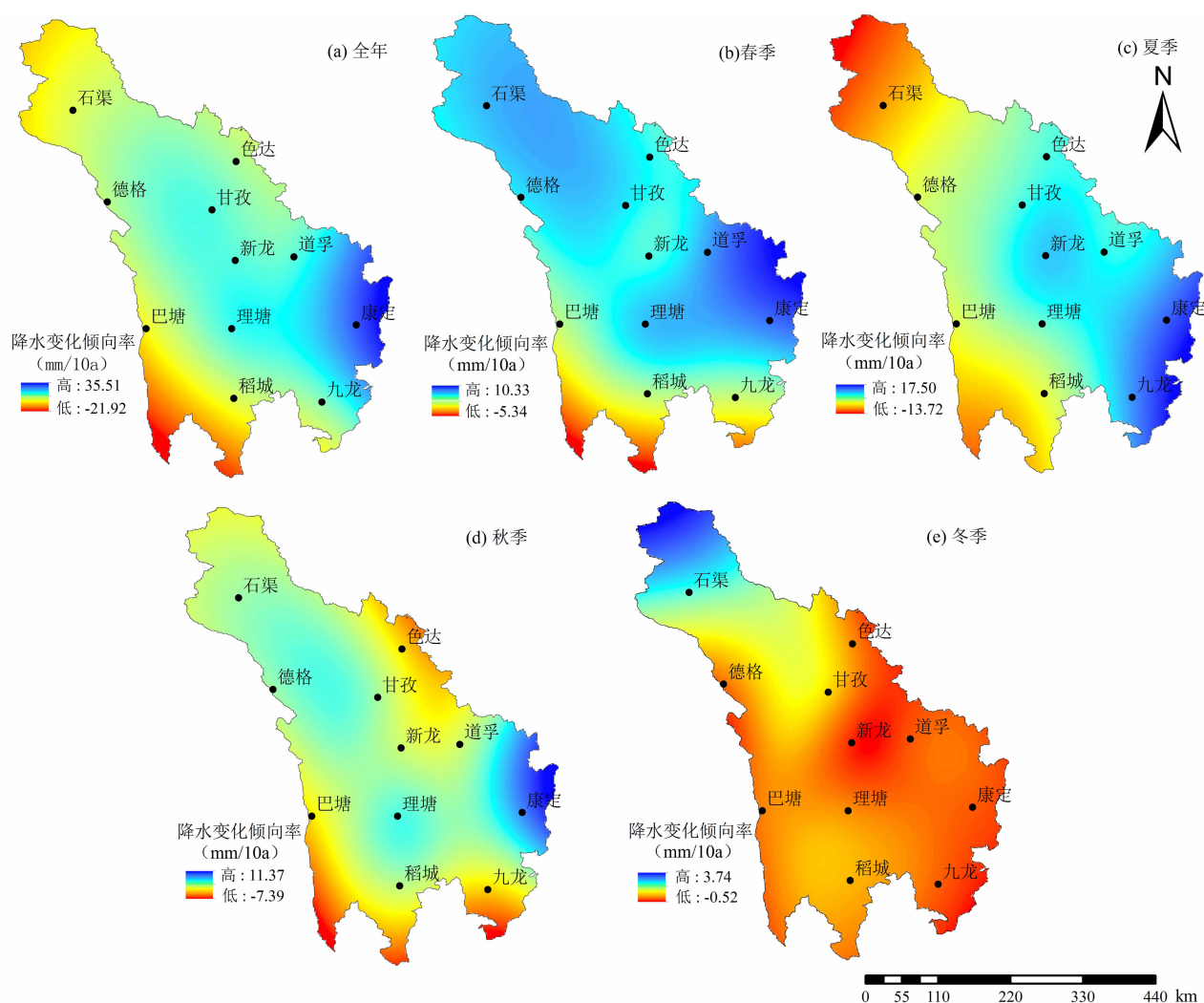


图7 1961—2015 年甘孜州全年及各季降水变化倾向率空间分布

Fig.7 Spatial distribution of annual and seasonal precipitation variation in Ganzi during 1961 – 2015

部的石渠、德格等地降水倾向率虽为正值,但值较小,即年降水的增加趋势并不显著;低值中心出现在稻城、巴塘地区以南,西南边缘地区降水倾向率为负值,年降水出现负增长。

从四季降水倾向率来看,夏、秋两季降水倾向率空间总体变化趋势与全年空间变化基本一致,都是自东向西递减,但还存在一定差异。夏季降水倾向率高值中心在康定、九龙地区,降水增加趋势相对明显,降水倾向率在 10 mm/10 a 以上,中部甘孜、新龙、理塘地区降水表现出不明显的增加;低值中心出现在北部地区,降水呈现相对明显下降趋势,西南部巴塘、稻城地区夏季降水减少值相对较小。秋季降水倾向率的高值中心与低值中心与全年降水相重合,但变化幅度相对较小。春季和冬季降水倾向率

在空间的变化趋势几乎相反,大部分地区春季降水是增加的,而冬季降水是减少的。春季除去南部边缘地区降水呈现递减趋势,其他大部分地区降水都表现出相对明显的增加的趋势。而冬季降水虽然是四季中最少的,但除去北部地区,大部分地区的冬季降水还在减少,冬季更加干燥。

全年降水变化倾向率与气温倾向率的空间变化有很大差异,降水倾向率在空间上呈现由东向西逐渐减小的趋势,在西南边缘地区降水甚至出现负增长。夏、秋两季降水倾向率空间总体变化趋势与全年空间变化基本一致,由东向西逐渐减小;大部分地区春季降水是增加的,而冬季降水是减少的。降水的空间变化表明了降水变化的复杂性,其主要原因是由于该区地形起伏多样以及季风系统的年际波

动变化对降水变化有重要影响。

3 讨论与结论

本文利用 1961—2015 年甘孜州 11 个站点的气温和降水数据,采用线性回归、距平分析、滑动平均、Mann-Kendall 突变检验及样条函数插值的方法,对甘孜州 55 年气温和降水的时空变化进行研究,主要结论如下:

(1) 甘孜州在 1961—2015 年间气温上升,年平均均温、四季平均气温从 90 年代明显升高,全年气温变化倾向率为 $0.242\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,春、夏、秋、冬气温倾向率分别为 $0.176\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.211\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.211\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.368\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,冬季气温的增加最为显著,这与全球气温变化趋势基本一致。区内气温变化空间差异很大,甘孜州北部的高原区和南部稻城古冰帽地区增温速率相对较高,中部和东部河谷地区增温速率相对较低,充分表明地形对山区气候变化的重大影响。

(2) 甘孜州的降水总体虽递增,但增加的趋势并不显著,其波动较为明显,降水量不稳定,各个年代的变化趋势都有所差异,全年降水倾向率为 $11.22\text{ mm}/10\text{ a}$,各季降水倾向率分别为 $5.23\text{ mm}/10\text{ a}$ 、 $4.15\text{ mm}/10\text{ a}$ 、 $1.68\text{ mm}/10\text{ a}$ 、 $0.22\text{ mm}/10\text{ a}$,春、夏季降水的增加对于年降水贡献最大。降水倾向率在空间上呈现由东向西逐渐减小的趋势,在西南边缘地区降水甚至出现负增长,表明了降水变化的复杂性。

总体而言,甘孜地区气候趋于暖湿化,这种趋势在高海拔地区表现得更为明显,这无疑会对甘孜州的环境产生很大影响。首先,高海拔地区气温的相对于其他地区更为明显的上升,会导致甘孜州现代冰川的融化速率增大,冰川面积缩小,对于冰川地区生态环境的损害很大。其次,由于大部分地区冬季气温增加是四季中最为显著的,而降水却是减少的,这会使得甘孜州冬季更加干旱。最后,因为春、夏季降水增加较为显著,加上州内地形起伏较大,可能会加大地质灾害如滑坡、泥石流等事件发生的概率。因此,当地要注意保护脆弱的冰川区生态环境,同时加强对于春、夏季地质灾害的防治工作,尤其是在甘孜州内的地形过渡区域。

本文在时间尺度上仅讨论了甘孜州气温和降水

在 1961—2015 年间的变化趋势和突变情况,未来可以对于其他气候指标如日照时数、极端气温(最高气温、最低气温)等进行研究,综合分析该地区的气候变化。在空间尺度上,由于该区域地形起伏较大,可以按地形分区,对不同地形区进行气候指标的分析与比较,突出不同地形区气候时空变化特征的差异性,从而为该区域规划和发展提供一定依据,因地制宜制定灾害防护措施。另外,本区气象站点较少,且气候数据存在一定的缺失,由于现有站点多分布在便于收集气象数据的地方及城镇地区,并不能充分反映高海拔地区的气温和降水的实际情况,因此,如何获取更为精准有效的气象数据也是一个亟待解决的问题。

参考文献(References)

- [1] 沈永平,王国亚. IPCC 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. [SHEN Yongping, WANG Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, **35**(5): 1068 - 1076]
- [2] 丁一汇,王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识[J]. 科学通报, 2016, **61**(10): 1029 - 1041. [DING Yihui, WANG Huijun. Newly acquired knowledge on the scientific issues related to climate change over the recent 100 years in China [J]. Chinese Sciences Bulletin, 2016, **61**(10): 1029 - 1041]
- [3] 韩翠华,郝志新,郑景云. 1951—2010 年中国气温变化分区及其区域特征[J]. 地理科学进展, 2013, **32**(6): 887 - 896. [HAN Cuihua, HAO Zhixin, ZHENG Jingyun. Regionalization of temperature changes in China and characteristics of temperature in different regions during 1951 - 2010 [J]. Progress in Geography, 2013, **32**(6): 887 - 896]
- [4] 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. [HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al. Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(2): 519 - 531]
- [5] 李宗省,何元庆,辛惠娟,等. 我国横断山区 1960—2008 年气温和降水时空变化特征[J]. 地理学报, 2010, **65**(5): 563 - 579. [LI Zongxing, HE Yuanqing, XIN Huijuan, et al. Spatio-temporal Variations of Temperature and Precipitation in Mts. Hengduan Region during 1960 - 2008 [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, **65**(5): 563 - 579]
- [6] 王建兵,王振国,汪治桂. 甘南地区近 40 年气温变化特征[J]. 气象, 2007, **33**(1): 112 - 117. [WANG Jianbing, WANG Zhenguo, WANG Zhigui. Analysis of variation characteristics of temperature in

- Gannan, Gansu Province [J]. *Meteorological Monthly*, 2007, **33** (1): 112–117]
- [7] 孟秀敬, 张士锋, 张永勇. 河西走廊 57 年来气温和降水时空变化特征[J]. *地理学报*, 2012, **67** (11): 1482–1492. [MENG Xiujing, ZHANG Shifeng, ZHANG Yongyong. The temporal and spatial change of temperature and precipitation in Hexi Corridor in recent 57 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67** (11): 1482–1492]
- [8] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析[J]. *气象学报*, 2004, **62** (2): 228–236. [WANG Zunya, DING Yihui, HE Jinhai, et al. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, **62** (2): 228–236]
- [9] 王英, 曹明奎, 陶波, 等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. *地理研究*, 2006, **25** (6): 1031–1040. [WANG Ying, CAO Mingkui, TAO Bo, et al. The characteristics of spatio-temporal patterns in precipitation in China under the background of global climate change [J]. *Geographical Research*, 2006, **25** (6): 1031–1040]
- [10] 商沙沙, 廉丽姝, 马婷, 等. 近 54 a 中国西北地区气温和降水的时空变化特征[J]. *干旱区研究*, 2018, **35** (1): 68–76. [SHANG Shasha, LIANLishu, MA Ting, et al. Spatiotemporal variation of temperature and precipitation in Northwest China in recent 54 years [J]. *Arid Zone Research*, 2018, **35** (1): 68–76]
- [11] 任国玉, 吴虹, 陈正洪. 我国降水变化趋势的空间特征[J]. *应用气象学报*, 2000, **11** (3): 322–330. [REN Guoyu, WU Hong, CHEN Zhenghong. Spatial patterns of change trend in rainfall of China [J]. *Journal of Applied Meteorological Sciences*, 2000, **11** (3): 322–330]
- [12] 周长艳, 岑思弦, 李跃清, 等. 四川省近 50 年降水的变化特征及影响[J]. *地理学报*, 2011, **66** (5): 619–630. [ZHOU Changyan, CEN Sixuan, LI Yueqing, et al. Precipitation variation and its impacts in Sichuan in the last 50 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66** (5): 619–630]
- [13] 杜华明, 延军平. 四川省气候变化特征与旱涝区域响应[J]. *资源科学*, 2013, **35** (12): 2491–2500. [DU Huaming, YAN Junping. Climatic change and drought-flood regional responses in Sichuan [J]. *Resources Science*, 2013, **35** (12): 2491–2500]
- [14] WANG S, JIAO S, XIN H. Spatio-temporal characteristics of temperature and precipitation in Sichuan Province, Southwestern China, 1960–2009 [J]. *Quaternary International*, 2013, **286** (5–6): 103–115.
- [15] 潘保田, 李吉均. 青藏高原: 全球气候变化的驱动机与放大器——Ⅲ. 青藏高原隆起对气候变化的影响[J]. *兰州大学学报*, 1996, **32** (1): 108–115. [PAN Baotian, LI Jijun. Qinghai-Tibetan Plateau: a driver and amplifier of the global climatic change [J]. *Journal of Lanzhou University*, 1996, **32** (1): 108–115]
- [16] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势[J]. *地理学报*, 2005, **60** (1): 3–11. [WU Shaohong, YIN Yunhe, ZHENG Du, et al. Climate changes in the Tibetan Plateau during the last three decades [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, **60** (1): 3–11]
- [17] 杜军, 马玉才. 西藏高原降水变化趋势的气候分析[J]. *地理学报*, 2004, **59** (3): 375–382. [DU Jun, MA Yucui. Climatic trend of rainfall over Tibetan Plateau from 1971 to 2000 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, **59** (3): 375–382]
- [18] 王晓. 1961—2011 年甘孜州气温变化特征分析[J]. *安徽农业科学*, 2015, **43** (25): 222–223. [WANG Xiao. Analysis of temperature variation characteristics of Ganzi Prefecture during 1961–2011 [J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2015, **43** (25): 222–223]
- [19] 常婷婷. 青藏高原东部区域气候变化特征研究——以甘孜为例[D]. 成都: 四川师范大学, 2016: 2–10. [CHANG Tingting. Study on the characteristics of regional climate change in eastern Tibetan Plateau—Take Ganzi as an example [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2016: 2–10]
- [20] 徐飞, 贾仰文, 牛存稳, 等. 横断山区气温和降水年季月变化特征[J]. *山地学报*, 2018, **36** (2): 171–183. [XU Fei, JIA Yangwen, NIU Cunwen, et al. Variation character of annual, seasonal and monthly temperature and precipitation [J]. *Mountain Research*, 2018, **36** (2): 171–183]
- [21] 宋超辉, 孙安健. 非均一性气温气候序列订正方法的研究[J]. *高原气象*, 1995, **14** (2): 215–220. [SONG Chaohui, SUN Anjian. The research on adjusting inhomogeneity temperature series [J]. *Plateau Meteorology*, 1995, **14** (2): 215–220]
- [22] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. *大气科学*, 1992, **16** (4): 482–493. [FU Congbin, WANG Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, **16** (4): 482–493]

Spatio-temporal Variations of Temperature and Precipitation in Ganzi of Western Sichuan in China during 1961 – 2015

MEI Jing^{1,2,3,4}, WANG Jian^{1,2,3,4}, HE Liang⁵, ZHANG Mengyuan^{1,2,3,4}, ZHANG Zhigang^{1,2,3,4*}

(1. School of Geographical Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

3. State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution of Jiangsu Province, Nanjing 210023, China;

4. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China;

5. National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Ganzi is situated in the transition zone between the Qinghai-Tibetan Plateau and the Sichuan Basin with a large areas of national nature reserves and marine glaciers. Analyzing the temporal and spatial trends of regional climate change is of special significance for planning tourism development, environmental protection and ecological civilization construction in the region. Based on the temperature and precipitation data from 11 sites in Ganzi during 1961 to 2015, methods of linear regression, anomaly analysis, moving average, Mann-Kendall mutation test, and spline interpolation were applied to analyze spatial and temporal characteristic of temperature and precipitation in Ganzi. The study showed that: Ganzi had a significant upward trend in the annual and seasonal temperatures, with a temperature change rate of 0.242 °C/10 a for the whole year and 0.176 °C/10 a、0.211 °C/10 a、0.211 °C/10 a、0.368 °C/10 a for the spring, summer, autumn and winter temperatures respectively. The increase in winter temperature contributed most to the increase in annual average temperature. Spatial distribution of annual and seasonal temperature variation varied greatly in the area. With the increase of altitude, the rate of warming increased. Although the precipitation in Ganzi Prefecture was generally increasing, the trend was not significant. The annual precipitation increased at a rate of 11.22 mm/10 a, and the seasonal precipitation increased at a rate of 5.23 mm/10 a, 4.15 mm/10 a, 1.68 mm/10 a, and 0.22 mm/10 a respectively. The increase of precipitation in spring and summer contributed the most to annual precipitation. Annual precipitation tended to decrease from east to west in space, and precipitation may even decrease in the southwestern margin. In general, there is a warming and wetting trend of the climate in Ganzi, and this trend is more pronounced in high altitude areas.

Key words: Ganzi; temperature; precipitation; temporal and spatial variation