

川西北高原甘孜州地区降水变化特征及旱涝研究

甄英¹, 李永飞², 何静³

(1.内江师范学院 地理与资源科学学院, 四川 内江 641199; 2.吉首大学 旅游与管理工程学院
生态旅游湖南省重点实验室, 湖南 张家界 427000; 3.成都信息工程大学 大气科学学院, 成都 610225)

摘要:为了解川西北高原降水及早涝情况,利用甘孜州 11 个气象站点 1961—2017 年的逐月降水资料,运用气候倾向率、M-K 检验、Morlet 小波分析、Z 指数方法,结合 GIS 空间分析技术,分析了甘孜州降水变化特征及早涝时空分布格局。结果表明:57 年来甘孜州年降水量 5 a 滑动平均以 21.47 mm/10 a 的速率增长;雨季为夏季,但四季降水均呈增加趋势,其中秋季降水增加最为显著,约 1.64 mm/10 a;受地形、大气环流、季风等因素的影响,甘孜州降水量总体趋势呈西北干、东南湿的格局,容易造成局部气象和地质灾害。经 Z 指数计算得出,甘孜州洪涝发生较干旱频繁,但干旱更为严重,在降水量于 1986 年发生突变后,干旱强度减弱,洪涝强度加大;从季节上看,四季都有干旱发生,但冬旱较为严重,这与冬季降水量偏少有关;从空间上洪涝从西向东逐渐减小,干旱分别从西北往西南、东南向东北减少。

关键词:川西北高原; 甘孜州; 降水; 旱涝频率

中图分类号: P426.616

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)06-0191-07

Research on Characteristics of Precipitation Change and Drought and Flood in Ganzi Region of Northwest Sichuan Plateau

ZHEN Ying¹, LI Yongfei², HE Jing²

(1.School of Geography & Resources Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641199, China; 2.Hunan Provincial Key Laboratory of Ecological Tourism, College of Tourism & Management Engineering, Jishou University, Zhangjiajie, Hunan 427000, China;

3.School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In order to understand the situation of precipitation and drought and flood in northwest Sichuan Plateau, monthly precipitation data of 11 meteorological stations in Ganzi Prefecture from 1961 to 2017 were selected. We used the climate propensity index, M-K test, Morlet wavelet analysis, Z index method and GIS spatial analysis technology to examine the precipitation characteristics of Ganzi Prefecture and the spatiotemporal distribution patterns of drought and flood disasters. The results show that the annual precipitation in Ganzi Prefecture increased by 21.47 mm/decade over the past 57 years. The rainy season is summer, but the precipitation in the four seasons is increasing, of which the most significant increase in autumn precipitation is about 1.64 mm/decade. Affected by the factors such as topography, atmospheric circulation and monsoon, the overall trend of precipitation in Ganzi Prefecture is dry in northwest area and wet in southeast area, which will easily cause local meteorological and geological disasters. The Z index shows that floods in Ganzi Prefecture were more frequent than droughts, but the drought was more serious. The intensity of drought was weakened and the intensity of flood and waterlogging increased after the precipitation abruptly changed in 1986. With respect to the seasonal pattern, there were droughts in all seasons, but the drought was more severe in winter due to the less precipitation. In space, the floods gradually decreased from west to east, and the drought decreased from the northwest to the south-west and southeast to the northeast.

Keywords: northwest Sichuan Plateau; Ganzi; precipitation; drought and flood frequency

收稿日期: 2018-11-09

修回日期: 2019-01-03

资助项目: 国家自然科学基金(41401217); 四川省教育厅项目(16ZB0303); 内江师范学院校级项目(18ZB02)

第一作者: 甄英(1983—), 女, 河北承德人, 硕士, 讲师, 主要从事资源脆弱区环境保护与利用研究。E-mail: zhen2153343@163.com

通信作者: 李永飞(1976—), 男, 湖南永兴人, 博士, 副教授, 主要从事环境演变与孢粉学研究。E-mail: qiuxiaolan0918@163.com

IPCC 评估报告中称近百年全球地表气温升高约 0.89°C ^[1], 全球环流模式与格局正处在调整时期, 极端气候事件常常发生^[2-3], 我国降水模式也发生深刻变化, 部分地区干旱和洪涝等气象灾害频发^[4-5]。不少专家学者对此做了大量研究, 如昌都市旱涝灾害变化特征具有明显阶段性^[6], 川滇地区气候暖干化与旱涝灾害的趋势表明两者的发生频率具有一致性^[7], 中国的干旱发生是多种因素作用的结果^[8]。因此, 通过分析某一地区气候时空变化特征与旱涝之间的关系, 对于旱涝等气象灾害及其引起的地质灾害的监测预警及防灾减灾具有重要意义。

甘孜州全称甘孜藏族自治州, 位于四川省西部, 介于北纬 $27^{\circ}58' - 34^{\circ}20'$, 东经 $97^{\circ}22' - 102^{\circ}29'$, 处于青藏高原东南缘向四川盆地过渡地带, 在地形上属高原区, 自然灾害多发, 特别是近年来强降雨引起的山洪、泥石流、滑坡等灾害, 以及干旱、冰雹等极端气象事件多发, 导致了重大经济损失和人员伤亡^[9]。已有较多学者对青藏高原^[10-12]、四川盆地^[13-15]及川西高原^[16-17]的降水特征进行了初步研究, 但是针对甘孜州地区降水特征及早涝的研究较少。通过对甘孜州降水变化情况及时空分布规律的研究, 为预测该区旱涝灾害的发生、保障农业正常生产、交通安全以及社会经济健康发展具有重要意义。

1 数据与方法

1.1 资料来源

气象资料来源于中国国家气象服务中心, 11 个气象站时间连续、均匀地分布在研究区(图 1)。数字高程数据(DEM)由地理空间数据云网站提供, 分辨率为 90 m。

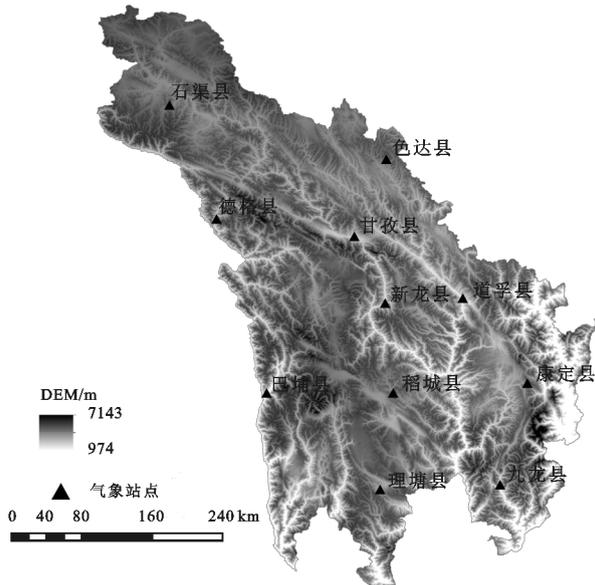


图 1 气象站点分布

1.2 研究方法

1.2.1 Mann-Kendall 非参数检验 Mann-Kendall 非参数检验(简称 M-K 检验法)是一种揭示时间序列趋势变化及突变特征的非参数统计检验方法, 广泛应用于气温、降水、径流等现象的研究中。假设时间序列是随机变量, 对于具有 n 个样本的时间序列 x , 构造一个秩序列^[18]:

$$U_{0.05} = \pm 1.96 \quad (1)$$

$$\text{其中: } r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

在时间序列独立的假定下, 定义统计量:

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{var}(s_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$\text{其中: } UF_1 = 0, E(s_k) = \frac{n(n+1)}{4},$$

$$\text{var}(s_k) = \frac{n(n+1)(2n+5)}{72}.$$

再按时间序列 X 的逆序重复上述过程, 并且令 $UB_k = UF_k$ ($k = n, n-1, \dots, 2, 1$), $UB_1 = 0$ 。

一般取显著性水平 $\alpha = 0.05$, 那么临界值 $U_{0.05} = \pm 1.96$ 。将 UF_k 和 UB_k 两序列曲线和 ± 1.96 两条直线均绘在一张图上。若 UF_k 和 UB_k 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。当它们超过临界直线时, 表明上升或下降趋势显著, 超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域。如果 UF_k 和 UB_k 两条曲线出现交点, 且交点在临界线之间, 那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。

1.2.2 小波分析 对于给定的小波函数 $\Psi(t)$, 离散水文时间序列为取样时间间隔的小波变换为^[19]:

$$WT_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \cdot t \sum_{k=1}^N f(k \cdot t) \overline{\Psi\left(\frac{k \cdot t - b}{a}\right)} \quad (3)$$

式中: $WT_f(a, b)$ 为小波变换系数; a 为尺度因子; b 为时间因子; $\overline{\Psi(t)}$ 为小波函数 $\Psi(t)$ 的复共轭函数。

文中选用复值 Morlet 小波函数: $\Psi(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}}$, 其中 $\omega_0 \geq 5$ 为常数, 取 $\omega_0 = 6$ 。复值小波变换比实数形式的小波变换优越^[20-21]。它的实部和虚部位相差 $\pi/2$, 可以消除实数形式的小波变换系数模的振荡, 并且能够把小波变换系数的模和位相分离开来^[22]。

1.2.3 Z 指数 关于旱涝指数目前有很多, 如 SPI (标准化降水指数)、SPEI (标准化降水蒸散指数) 及 Z 指数等, 对旱涝指数的评定目前没有唯一且普遍适用于任何地区的评定标准^[23]。然而 Z 指数在四川和西南地区有很好的适用性^[24-25], 因此选用 Z 指数对甘孜州地区旱涝进行具体研究。

在气象学上 Z 指数法是一种用来表征旱涝的空间分布以及旱涝程度的数学方法。对于某站的降水数据,假定其月降水量服从皮尔逊-Ⅲ型分布并进行正态化处理,将概率密度函数转换为以 Z 为变量的标准正态分布。然后根据 Z 变量的正态分布曲线,划分为 7 个等级并确定其相应的 Z 界限值,作为各级旱涝指标^[26],其划分标准见表 1。

表 1 Z 指数旱涝等级划分标准

等级	Z 值	类型
1	$Z > 1.645$	重涝
2	$1.037 < Z \leq 1.645$	大涝
3	$0.524 < Z \leq 1.037$	偏涝
4	$-0.524 \leq Z \leq 0.524$	正常
5	$-1.037 < Z \leq -0.524$	偏旱
6	$-1.645 < Z \leq -1.037$	大旱
7	$Z \leq -1.645$	重旱

区域旱涝指标能反映一个区域旱涝的空间分布和旱涝程度^[27],首先利用各单站历年 Z 指数判断其旱涝程度,然后分别利用不同权重计算区域的洪涝指标 I 和干旱指标 L ,即:

$$I = \frac{2n_1 + n_2 + n_3}{n} \quad (4)$$

$$L = \frac{n_5 + n_6 + 2n_7}{n} \quad (5)$$

式中: n_i 为该区域内旱涝等级分别为 1—7 的站数 ($i=1, \dots, 7$); n 为区域内站数总和,那么区域旱涝指数 HL 即为:

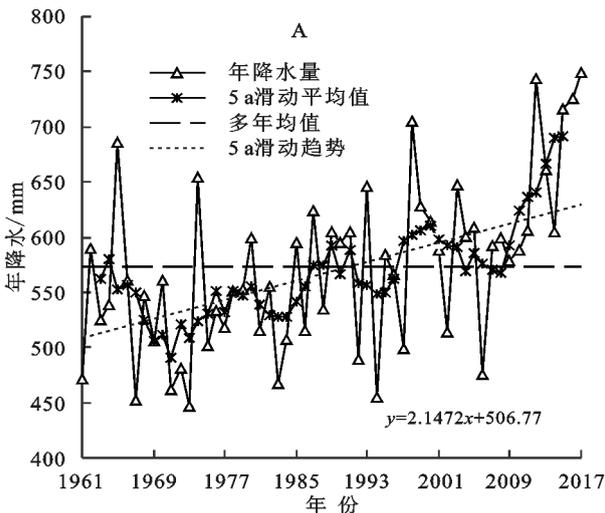
$$HL = (I - L) \times 100\% \quad (6)$$

然后根据表 2 来确定其旱涝类型。

2 降水时空变化特征

2.1 年际变化

通过甘孜州 57 年来年降水变化分析可知(图 2A),



其降水年际变化呈波动上升趋势。为减小极端降水的影响,对降水序列做 5 a 滑动平均处理,结果显示降水增幅约为 21.47 mm/10 a。5 a 滑动平均曲线中 1986 年以前为偏干时期,滑动平均值仅有 2 a 高于多年均值,说明 1986 年以前甘孜州的降水量偏少,这与川西高原降水变化规律相似^[17]。1986 年以后降水偏丰,滑动平均值仅有 9 a 是低于多年均值。

表 2 区域旱涝指数 HL 等级划分标准

等级	HL 值	类型
1	$HL \geq 75$	重涝
2	$50 \leq HL < 75$	大涝
3	$25 \leq HL < 50$	偏涝
4	$-25 \leq HL < 25$	正常
5	$-50 < HL \leq -25$	偏旱
6	$-75 < HL \leq -50$	大旱
7	$HL \leq -75$	重旱

利用 ArcGIS 软件分析各站 57 a 的降水分布,采用反距离加权插值法绘制空间分布图(图 2B)。降水分布特征为西北干、东南湿,高值位于九龙、康定,低值位于巴塘、石渠。甘孜州区域范围内降水量的空间分布除了受环流、季风的影响,地形也是重要的影响因素。甘孜州地处川西高原,属青藏高原东南部,地势由西北向东南倾斜,由西部雀儿山、沙鲁里山经中部雅砻江至东南大渡河,海拔相差较大,降水逐渐增多^[28]。北部石渠、色达一带平均海拔在 4 000~4 500 m,属川西北丘状高原区;甘孜一道孚以南、新龙—理塘以东、九龙以北为河谷山原区,雅砻江及其支流鲜水河贯穿全区,河谷从高原面强烈下切,大部分地区海拔在 3 900~4 500 m;雀儿山以南、沙鲁里山以西、金沙江以东的巴塘为高山区,不少山岭海拔在 5 000 m 以上,该区域的降水最少。

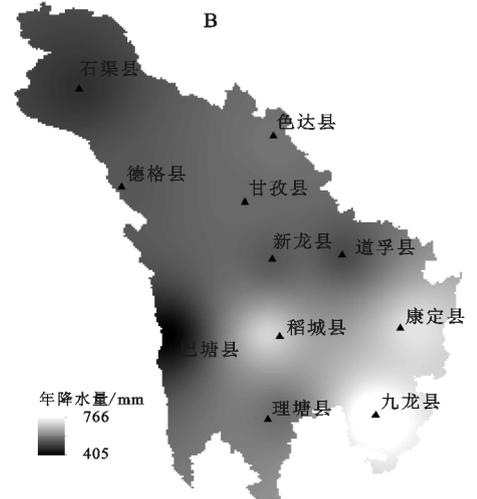


图 2 降水年际变化和空间分布

2.2 季节变化

将 12 月—次年 2 月划分为冬季,3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季。降水量季节变化如图 3 所示,可见降水主要集中在夏季,而冬季降水量显著低于其他 3 个季节。春季、夏季、秋季和冬季气候倾向率分别为 1.473、0.401、1.637、0.155 mm/10 a,增幅为秋季 >

春季 > 夏季 > 冬季,且秋季和春季的增幅显著大于其他两个季节,说明甘孜州地区降水增加主要是由于秋季和春季的降水量增加造成,这与甘孜州所在的高原位置及其毗邻地区大气环流有关^[29]。夏季降水量大且持续增加,因此局部降水造成洪涝和地质灾害的概率也随之增加,应当引起足够的重视。

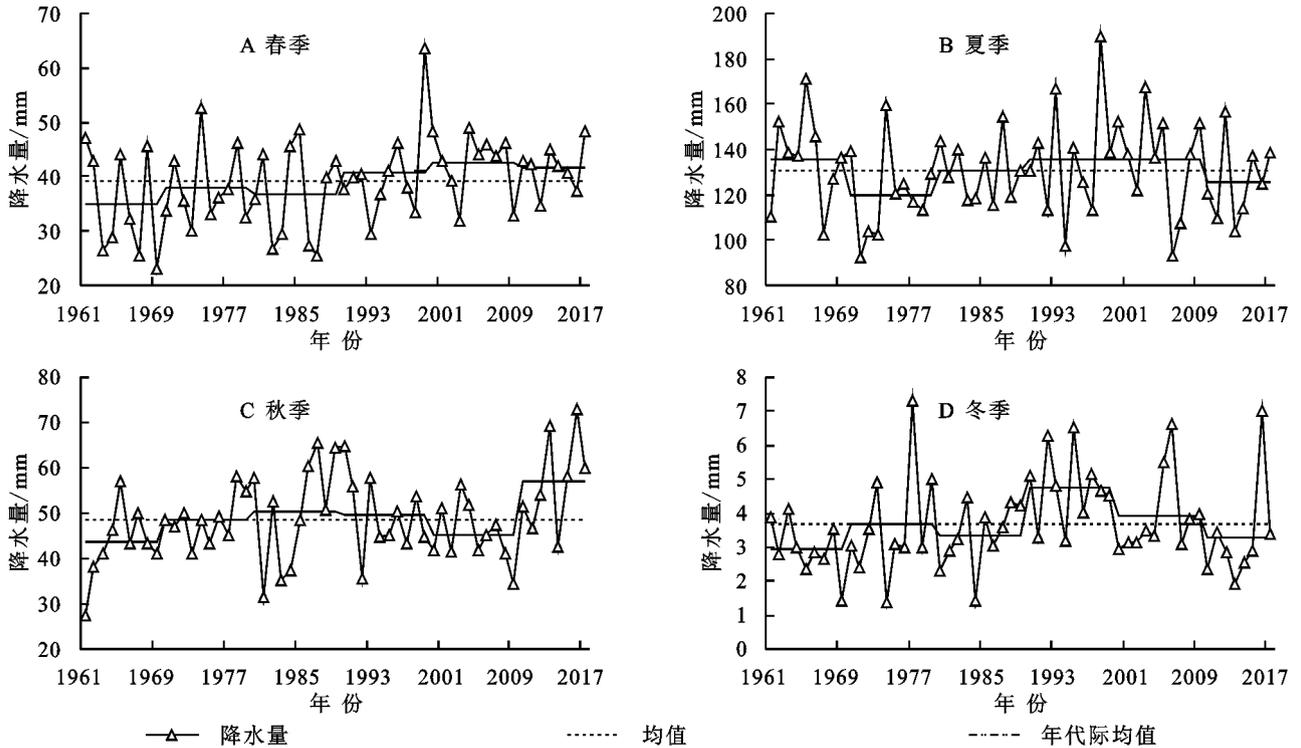


图 3 甘孜州降水季节变化特征

甘孜州降水的季节分布特征如图 4 所示,冬季和春季变化特征相似,形成东北部色达和东南部康定两个降水中心,以及西南部巴塘和南部稻城是两个相对少雨区,但是春季降水量要远大于冬季降水量,如色达冬季和春季降水量分别为 9.17、75.1 mm,巴塘冬季和春季分别只有 0.55、18.0 mm。这反映了冬季和春季都主要受西风环流的南支西风急流控制有关,西风急流中常有从亚洲西部移来的高空槽脊越过,来自北方的寒潮有时也可侵入此区,因此寒冷少雨^[30]。

夏季北部少雨,中心石渠降水仅 108.29 mm。除巴塘外,南部夏季多雨,中心九龙降水达 174.63 mm。这与夏季西风南支急流北跃,印度低压来临,并常有源自印度洋的暖湿气流—西南季风活动有关。秋季东北部少雨,其中心色达降水 16.12 mm;东南部多雨,其中心九龙降水 74.71 mm。秋季是环流转变的过渡季节,印度低压减弱而高压逐渐形成^[30],但西南季风尚未完全退出,因山地阻隔,南撤较慢,故秋季南部降雨仍然较多。

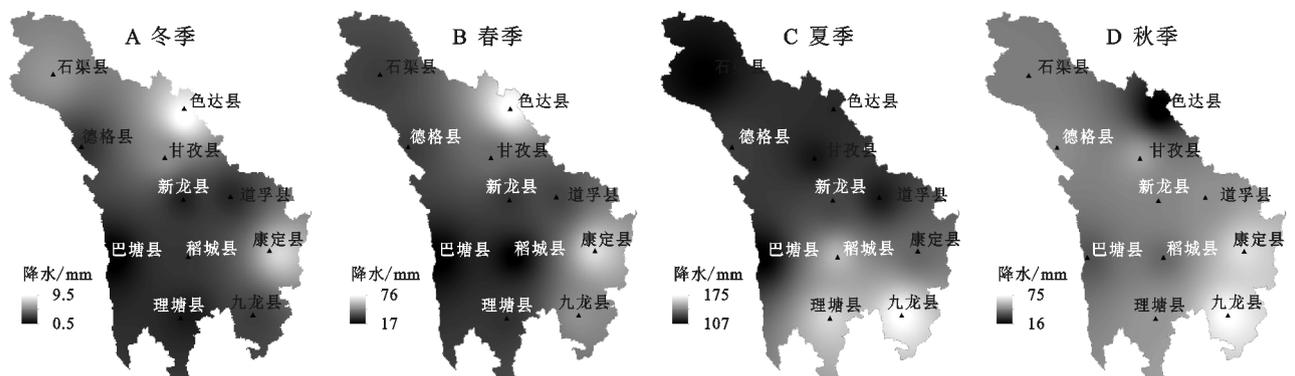
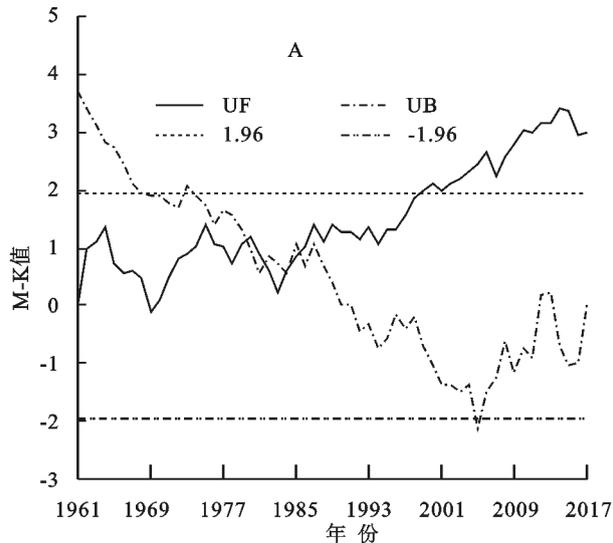


图 4 甘孜州降水四季空间分布特征

2.3 突变与周期变化

气候突变是气候系统中重要现象之一,主要指气候从一种稳定态跳跃式转变到另一种稳定态的现象^[31]。基于 M-K 非参数检验方法,可见 57 年内降水序列 UF 曲线先降后升(图 5A)。在整个研究时段内 UF 与 UB 曲线在置信度内有 3 个突变点,即 1979 年、1982 年和 1986 年。利用 Matlab 分解出小波系数的实部,绘出等值线图(图 5B),实线是正相位表示降水偏多,虚线是负



相位表示降水偏少。图中主要存在两个主周期震荡周期,即以 38 a 的长周期为主(小波方差图略),震荡强烈,经历了涝(20 世纪 60—70 年代)—旱(80—90 年代)—涝(21 世纪以来)3 个阶段;中长周期存在着 22 a 左右的震荡也较为明显,存在涝(60 年代)—旱(70 年代)—涝(80—90 年代中期)—旱(90 年代中后期—2007 年左右)—涝(2008 年左右—今)5 个阶段。2010—2017 年甘孜州降水正好处于 22 a 的降水偏多周期中。

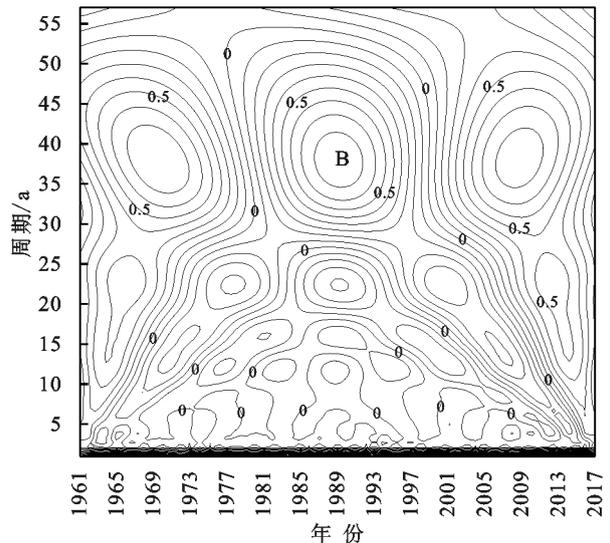


图 5 降水 M-K 检验和小波分析

3 旱涝时空变化特征

3.1 年际变化

基于 Z 指数法计算甘孜州单站旱涝等级状况及区域旱涝等级指标,得出 57 年来甘孜州旱涝统计直方图(图 6)。该地区发生洪涝的概率为 38.60%,重涝 7 a(1965 年、1974 年、1998 年、2012 年、2015 年、2016 年、2017 年),大涝 9 a(1980 年、1987 年、1991 年、1993 年、1999 年、2000 年、2003 年、2008 年、2013 年),6 a 偏涝;旱情概率为 36.84%,发生重旱 8 a(1961 年、1967 年、1971—1973 年、1983 年、1994 年、2006 年),大旱 8 a(1969 年、1977 年、1981 年、1984 年、1986 年、1992 年、1997 年、2002 年),偏旱 5 a。由此可见,甘孜州 57 a 洪涝较干旱频繁,但洪涝更为严重,这与聂光荣等^[29]统计的 1961—2004 年的甘孜州旱涝趋势基本一致。结合前文分析出的降水突变时间可知,前半期 60—80 年代中期发生干旱频率(62.96%)大于洪涝频率(14.8%),且干旱强度(重旱 22.22%)大于洪涝强度(重涝 7.41%);后半期 80 年代后期—2017 年,发生洪涝频率(60.00%)大于干旱频率(16.67%),但洪涝强度(大涝 16.67%)大于干旱强度(大旱 6.67%)。由此可见,降水突变后,干旱强度减弱,洪涝强度增加。

图 7 为甘孜州的洪涝和干旱频率分布图,57 年中甘孜州洪涝频率从西向东逐渐减小,其中中部洪涝灾害最为严重,高值中心为新龙和九龙 33.33%,低值中心是东部道孚地区 22.81%。干旱频率从西北往西南往、东南往东北减少,高值中心是石渠—德格和稻城地区 33.33%;低值中心是道孚地区 22.81%。

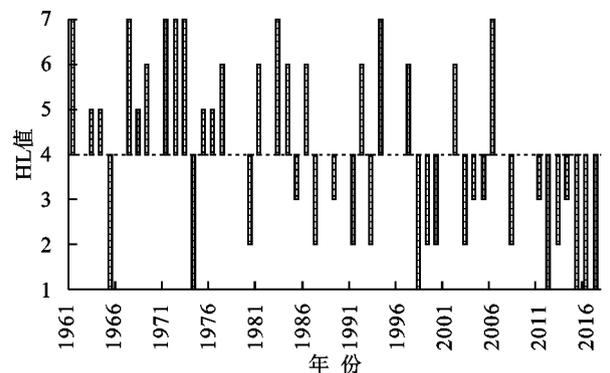


图 6 甘孜州旱涝等级

3.2 四季变化

甘孜州 11 个气象站点 57 年间四季旱涝等级次数见表 3,春季 Z 指数等级正常值有 254 个,占 40.51%;洪涝 187 个,占 29.82%,由于近 57 年各站点的春季降水普遍较少,Z 指数对涝情的反应过重,在这里不予考虑^[32];春季干旱 186 个,占 29.67%,且偏旱>大旱>重

旱。夏季正常值是 252 个,占 40.19%;洪涝 189 个,占 30.14%;干旱 186 个,占 29.67%。夏季降水虽多,但洪涝和干旱的次数和比例较相似。秋季正常值最多,为 279 个,占 42.90%;洪涝 175 个,占 27.91%;干旱 173 个,占

27.59%。冬季正常值最少 243 个,占 38.76%;洪涝 188 个,占 29.98%;干旱 196 个,占 31.26%。综合来看,甘孜州地区夏季洪涝次数与频率最大,冬季干旱的次数与频率最大,由于冬季降水最少,这反映冬季旱情最为严重。

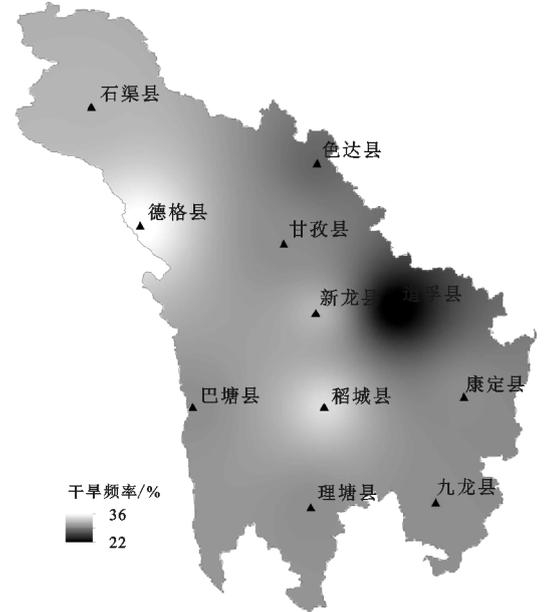
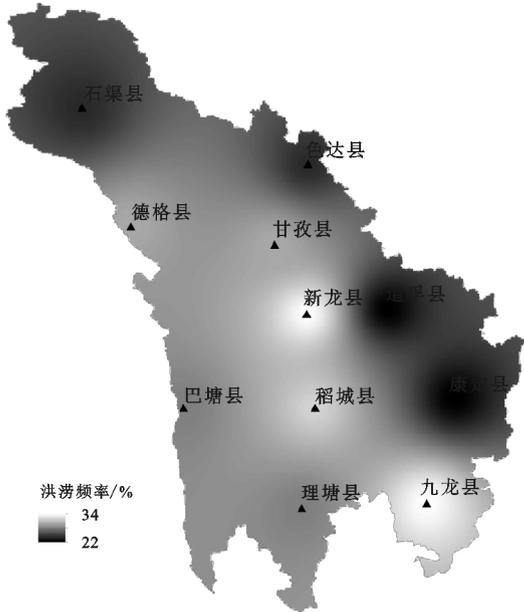


图7 甘孜州洪涝和干旱频率分布

表3 四季旱涝等级次数

季节	重涝	大涝	偏涝	正常	偏旱	大旱	重旱
春	32	60	95	254	91	61	34
夏	32	68	89	252	93	60	33
秋	26	74	75	279	89	42	42
冬	43	50	95	243	115	54	27

4 结论

(1) 57 年来甘孜州降水整体上呈波动上升趋势,5 a 滑动增长率为 21.47 mm/10 a。通过年际变化曲线和 M-K 检验可知 1986 年为降水量突变点,此后降水量明显增加。降水在空间上表现为西北干、东南湿的格局,除了环流、季风影响外,地形因素也不可忽视。

(2) 甘孜州地区降水存在季节分配不均匀的特征,虽然各季节均呈增加趋势,尤其是秋季降水增幅也为明显。空间上冬季与春季分布形态较相近。

(3) 由区域旱涝指数 HL 显示 57 年来发生洪涝的频率大于发生干旱的频率,但干旱更为严重。从 20 世纪 80 年代中后期开始干旱频数有所增加,但是洪涝的强度逐渐增大。空间上旱涝分布极不均匀,洪涝频率从西向东逐渐减小;干旱频率从西北往西南往、东南往东北减少。

由于研究区较小,区域差异不大,难以分析环流和季风对降水的作用;选用 Z 指数分析旱涝规律时主要探讨了降水的影响,而对旱涝形成的其他因素,如气温、厄

尔尼诺等影响涉及较少,这都有待于下一步的研究。

参考文献:

- [1] Qin D, Plattner G K, Tignor M, et al. Climate Change 2013: the Physical Science Basis[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.
- [2] 李洋,王玉辉,吕晓敏,等.1961—2013 年东北三省极端气候事件时空格局及变化[J].资源科学,2015,37(12): 2501-2513.
- [3] 闫慧敏,陈伟娜,杨方兴,等.过去 50 年内蒙古极端气候事件时空格局特征[J].地理研究,2014,33(1):13-22.
- [4] Zhang A J, Zhang C, Fu G B, et al. Assessments of impacts of climate change and human activities on runoff with SWAT for the Huifia River Basin, Northeast China[J]. Water Resources Management, 2012,26(8):2199-2217.
- [5] Milliman J D, Farnsworth K L, Jones P D, et al. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951—2000 [J]. Global and Planetary Change, 2008,62(3/4):187-194.
- [6] 孙晓光,王腾,李白萍,等.基于标准化降水指数的西藏昌都市旱涝时空特征[J].中国农学通报,2017,33(8): 112-118.
- [7] 杜华明,延军平.近 51 年川滇地区气候暖干化与旱涝灾害趋势判断[J].长江流域资源与环境,2014,23(5):714-721.
- [8] 王素萍,张存杰,李耀辉,等.基于标准化降水指数的 1960—2011 年中国不同时间尺度干旱特征[J].中国沙漠,2014,34(3):827-834.
- [9] 赵占群,杨强国,谷明成,等.四川得荣峡谷公路边坡稳

- 定性评价与防治措施建议[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(2):55-60.
- [10] 刘晓东,青藏高原隆升对亚洲季风形成和全球气候变化与环境的影响[J].高原气象,1999,18(3):321-332.
- [11] 韦志刚,黄荣辉,董文杰,青藏高原气温和降水的年际和年代际变化[J].大气科学,2003,27(2):157-170.
- [12] 马耀明,胡泽勇,田立德,等.青藏高原气候系统变化及其对东亚区域的影响与机制研究进展[J].地球科学进展,2014,29(2):207-215.
- [13] 齐冬梅,李跃清,陈永仁,等.近50年四川地区旱涝时空变化特征研究[J].高原气象,2011,30(5):1170-1179.
- [14] 白莹莹,张焱,高阳华,等.四川盆地降水变化的区域差异[J].地理科学,2011,31(4):478-484.
- [15] 陈超,庞艳梅,张玉芳.近50年来四川盆地气候变化特征研究[J].西南大学学报:自然科学版,2010,32(9):115-120.
- [16] 郑浩,许武成,孙高敏. ENSO事件对川西高原区气候的影响[J].气象与环境学报,2013,29(1):40-46.
- [17] 李川,陈静,朱燕君.川西高原近50年气候变化的初步研究[J].高原气象,2003(S1),138-144.
- [18] 朱歆炜,叶成志,彭晶晶,等.湖南省55a极端气温事件变化特征[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(2):82-88.
- [19] 姜世中,黄河源区达日至玛曲段近50年径流量变化趋势分析[J].地理研究,2008,27(1):221-228.
- [20] Morlet J, Arens G, Fourgeau, et al. Wave propagation and sampling theory and complex waves[J]. Geophysics, 1982,47(2):222-236.
- [21] Meyers S D, Kelly B G, O'Brin J J. An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology: with application to the dispersion of Yanai waves[J]. Mon. Wea. Rev., 1993,121:2858-2866.
- [22] 刘俊萍,田峰巍,黄强.黄河上游河川径流变化多时间尺度分析[J].应用科学学报,2003,21(2):117-121.
- [23] 李柏桢,周广胜.干旱指标研究进展[J].生态学报,2014,34(5):1043-1052.
- [24] 齐冬梅,李跃清,王莺,等.基于Z指数的四川干旱时空分布特征[J].干旱气象,2017,35(5):734-744.
- [25] 刘琳,徐宗学.西南地区旱涝特征及其趋势预测[J].自然资源学报,2014,29(10):1792-1801.
- [26] 范思睿,王维佳,陈添宇,等.西南地区春季降水异常与大尺度环流关系[J].干旱区地理,2016,39(1):47-57.
- [27] 杨辉,宋洁,晏红明,等.2009/2010年冬季云南严重干旱的原因分析[J].气候与环境研究,2012,17(3):315-326.
- [28] Hulme M. Estimating global changes in precipitation [J]. Weather, 1995,50(2):34-42.
- [29] 聂光荣,刘斌华.青藏高原及毗邻地区的环流对甘孜州旱涝的影响[J].高原气象,2004,23(S1):104-108.
- [30] 西南师范学院地理系四川地理研究室.四川地理[M].重庆:西南师范学院学报编辑部,1982.
- [31] 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.
- [32] 张丽艳,杨东,薛双奕,等.陕西省降水特征及其对旱涝灾害的影响[J].中国农学通报,2017,33(21):126-133.

(上接第190页)

- [16] Jang K, Kang S, Lim Y J, et al. Monitoring daily evapotranspiration in Northeast Asia using MODIS and a regional Land Data Assimilation System[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013, 118(23): 927-940.
- [17] 吴桂平,刘元波,赵晓松,等.基于MOD16产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征[J].地理研究,2013,32(4):617-627.
- [18] 闫俊杰,黄辉,崔东,等.2001—2015年伊犁河谷草地植被覆盖度时空变化特征[J].华中师范大学学报:自然科学版,2017,51(6):865-872.
- [19] 闫俊杰,黄辉,崔东,等.新疆伊犁河谷草地退化及其对生态服务价值的影响[J].生态经济,2018,34(1):191-196.
- [20] 张军民.伊犁河流域气候资源特点及其时空分布规律研究[J].干旱气象,2006,24(2):1-4.
- [21] 赵丽,杨青,韩雪云.1961—2009年伊犁地区降水指数的时空分布及变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(10):82-89.
- [22] 周聿超.新疆河流水文水资源[M].乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,1999.
- [23] 刘芳,张红旗,董光龙.伊犁河谷草地植被NDVI变化及其降水敏感性特征[J].资源科学,2014,36(8):1724-1731.
- [24] Purevdorj T S, Tateishi R, Ishiyama T. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998,19(18):3519-3535.
- [25] Xu S Q, Yu Z B, Yang C G, et al. Trends in evapotranspiration and their responses to climate change and vegetation greening over the upper reaches of the Yellow River Basin[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018,263:118-129.
- [26] Chang Y, Qin D, Ding Y, et al. A Modified MOD16 Algorithm to Estimate Evapotranspiration over Alpine Meadow on the Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2018,561:16-30.