

# 南方农牧交错带 1960—2017 年降水特征及旱涝时空分布特征

张雪茂<sup>1</sup>, 杜华明<sup>1,2</sup>, 董廷旭<sup>1,2</sup>, 邱豪<sup>1</sup>, 廖传露<sup>1</sup>

(1.绵阳师范学院 资源环境工程学院, 四川 绵阳 621000; 2.生态安全与保护四川省重点实验室, 四川 绵阳 621000)

**摘 要:**了解南方农牧交错带降水及干旱特征,可为该区旱涝灾害评估、预测及灾害的积极应对等提供较好的科学依据。基于南方农牧交错带 1960—2017 年 20 个气象站点逐月降水量资料,采用标准化降水指数(SPI)、克里金空间插值、小波分析等方法对南方农牧交错带近 58 年来的降水特征及旱涝灾害时空分布特征进行了研究。结果表明:(1)近 58 年以来南方农牧交错带年平均降水量以 3.98 mm/10 a 的速率在增加,年降水量存在 31 a 左右的丰—枯—丰变化周期;(2)受季风、地形、海拔高差等因素的影响,降水量在空间分布上以维西—理塘—若尔盖为界,高值中心出现在东南部,低值中心出现在西北部,呈现出由东南向西北递减的趋势;(3)研究区 20 世纪 80、90 年代涝灾发生的频率较高,在 20 世纪 60、70 年代旱灾发生的频率较高,2000 年以来旱涝灾害发生的频率有所减少。该区域的年降水量在逐年增加并且存在着明显周期变化、降水空间分布由东南向西北呈递减的倾向;2000 年以来旱涝灾害减少。

**关键词:**SPI; 小波分析; 降水特征; 旱涝灾害; 南方农牧交错带

中图分类号:P426.616

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0126-07

## Precipitation Characteristics and Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Drought and Waterlogging in the Farming-Grazing Transitional Zone of South China in the Period 1960—2017

ZHANG Xuemao<sup>1</sup>, DU Huaming<sup>1,2</sup>, DONG Tingxu<sup>1,2</sup>, QIU Hao<sup>1</sup>, LIAO Chuanlu<sup>1</sup>

(1.Mianyang Teachers' College, Mianyang, Sichuan 621000, China;

2.Ecological Security and Protection Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang, Sichuan 621000, China)

**Abstract:**In order to understand the precipitation and drought characteristics in the farming-grazing transitional zone of south China, and provide a good scientific evidence for the assessment, prediction and active response of drought and flood disasters in this area, based on monthly precipitation data of 20 meteorological stations in the farming-grazing transitional zone of south China from 1960 to 2017, the precipitation characteristics, spatial and temporal patterns of drought and flood disasters in the farming-grazing transitional zone of south China in recent 58 years were studied by using standardized precipitation index(SPI), Kriging spatial interpolation and wavelet analysis. The results showed that:(1) in the past 58 years, the average annual precipitation of the farming-grazing transitional zone of south China had been increasing at the rate of 3.98 mm/decade, and the annual precipitation had a period of abundance-blight and abundance change of about 31 years;(2) due to the influence of monsoon, topography, altitude and other factors, precipitation in spatial distribution with Vici-Litang-Ruoergai as the boundary presented the high value center in the southeast, low value center in the northwest, showing the trend of decreasing from southeast to northwest;(3) the frequency of waterlogging occurred in the study area in 80s and 90s of the 20th century; then the frequency of drought occurred in the 60s and 70s of 20th century; in the end the frequency of drought and flood disasters had decreased since 2000. The annual precipitation in this area is increasing year by year, and there are

收稿日期:2019-05-20

修回日期:2019-11-20

资助项目:生态安全与保护四川省重点实验室开发资助项目 ESP1707(41171125);绵阳师范学院科研启动项目(QD2016A001);涪江流域土地利用覆被变化及生态环境效应研究(MYSY2018T003)

第一作者:张雪茂(1995—),女,四川宜宾人,硕士研究生,研究方向:3S 技术集成与应用。E-mail:1505006095@qq.com

通信作者:杜华明(1979—),女,四川广元人,副教授,博士,研究方向:区域环境与灾害。E-mail:352162436@qq.com

obvious periodic changes, and the spatial distribution of precipitation is decreasing from southeast to northwest. Drought and flood disaster have reduced since 2000 in this area.

**Keywords:** SPI; wavelet analysis; precipitation characteristics; drought and waterlogging disaster; farming-grazing transitional zone of south China

近年来,由于气候的异常,导致全球范围内的旱涝灾害频繁发生,造成了重大的经济损失,严重阻碍了社会经济的可持续发展,对旱涝灾害的研究引起国内外学者的广泛关注,国外近年来的研究状况如下,Urban M C 等<sup>[1]</sup>研究了气候变化造成的物种灭绝风险;Dan Penny 等<sup>[2]</sup>将吴哥窟的考古数据转化为数值模型以此来量化气候变化对关键城市基础设施的影响;Magadza CHD 等<sup>[3]</sup>用极端天气事件、粮食安全、病媒疾病带来的健康风险等方面的问题来说明了非洲的气候变化对人类居住地适应前景的影响;Zhang H 等<sup>[4]</sup>基于层次贝叶斯模型(BHM)东南亚地区的气候变化特征进行了一个较长时间尺度的研究。国内众多学者对此类研究,如袁祝香等<sup>[5]</sup>利用距平累积、Mann-Kendall、变差系数等方法对松辽流域 1961—2017 年极端降水变化特征进行了研究,得出了目前松辽流域处于极端降水偏强阶段,使得该区域对极端降水灾害的防范和应对能力有极大的增强;杜华明等<sup>[6]</sup>将数理统计方法与 ArcGIS 空间分析技术相结合对岷江流域的降水特征及早涝灾害的发展趋势进行了分析,得出该区域由涝转旱的趋势明显,有利于该区域的政府在未来一段时间内做好防旱抗旱的决策工作;罗那那等<sup>[7]</sup>基于标准化降水指数运用趋势分析法、EOF 法、REOF 法等对北疆地区近 52 a 旱涝变化特征进行了相关分析;李烁阳等<sup>[8]</sup>采用 M-K 趋势检验、Morlet 小波、Z 值法及 EOF 等分析计算方法对湖北省降水及早涝时空分布特征进行了相关的研究,对湖北省依据旱涝时空分布开展防洪抗旱工作提供了一定的理论依据。以上国内外专家、学者通利用距平累积、Mann-Kendall、变差系数标准化、趋势分析等数理统计方法与 ArcGIS 空间分析相结合对非洲、松辽流域、岷江流域等地的降水和旱涝灾害特征的研究都取得了显著的成效。但是在对四川贫困连片区的降水空间特征及早涝灾害的研究暂时还涉及不足,因此本文借鉴前人专家、学者的相关经验以及方法结合实际情况,选取南方农牧交错带作为研究区域进行研究。

南方农牧交错带<sup>[9]</sup>位于 25.55°—34.31°N,98.14°—104.42°E,地处于我国第一级阶梯和第二级阶梯交界处,是青藏高原与四川盆地农业和畜牧业的过渡地带<sup>[10]</sup>。交错带内地形地貌以山地和高原为主,均海拔大于

3 000 m。区内河流水系分布较多,主要江河有怒江、澜沧江、金沙江、雅砻江、大渡河、岷江等<sup>[10]</sup>,行政区划上包括四川省的阿坝藏族羌族自治州、甘孜藏族自治州和云南省迪庆藏族自治州<sup>[10]</sup>。交错带内的生态环境较为脆弱,在气候、生物、土壤等自然要素和人类活动的影响中具有过渡性和波动性的特点,即在人类活动和地表过程影响下表现出敏感性和不稳定性,而导致该区域在受到外界因素的影响时生态环境经常受到冲击和破坏<sup>[11]</sup>。其中,气候作为该区域的大尺度的背景要素,是影响脆弱环境形成的主导因素之一,该区域的主要气候类型为高原山地温带、寒温带季风性气候,夏季受东南季风和西南季风影响,降水丰沛;冬季受西北季风影响,气候寒冷,降水较少,降水极其不稳定。交错带内地广人稀,少数民族较多。由于自然、社会等客观因素的限制影响,致使该区域经济发展相对缓慢,属于典型的贫困连片区。

本文选取研究区域 23 个气象站点的逐日降水资料,使用标准化降水指数(SPI)<sup>[12]</sup>刻画旱涝特征,采用小波分析法<sup>[13]</sup>,克里金空间插值法<sup>[14]</sup>等方法分析近 58 a 来南方农牧交错带地区的降水时空变化特征及早涝灾害发生的时间特征和空间格局,从而掌握该区域旱涝灾害形成和演化的基本规律,为南方农牧交错带旱涝灾害评估、预测及灾害的积极应对等提供较好的科学依据,以最大限度减轻旱涝灾害对该区域造成的经济损失。

## 1 数据来源和研究方法

### 1.1 数据来源

本文研究的数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>),选取分布于该区域范围内的 23 个气象站点(图 1),但是由于贡山、丽江和六库 3 个站点的降水数据由于观测年份不完整,缺测数据较多,因此对该区域内的气象站点进行了筛选,剔除了数据不完整的 3 个站点,最终选取了该区域 20 个站点的降水数据进行了预处理,经过处理之后的数据通过 Kappa 数据一致性检验。用处理之后的数据来构建以月、季节、年为时间尺度的时间序列,SPI1 表示月平均降水量的时间序列;SPI3 表示季平均降水量的时间序列<sup>[6]</sup>,其中 3 月、4 月、5 月为春季,6 月、7 月、8 月为夏季,9 月、10 月、11 月为冬季,12

月—翌年 1 月、2 月为春季;SPI6 和 SPI12 则属于年平均降水量的时间序列<sup>[6]</sup>,以此来开展南方农牧交错带旱涝灾害时空分布特征的研究。

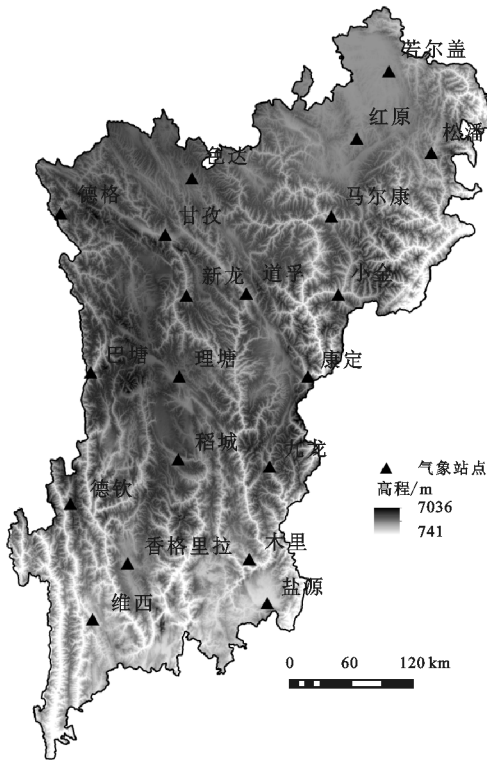


图 1 农牧交错气象站点分布

1.2 研究方法

1.2.1 克里金插值法(Kriging) 利用克里金空间插值法进行插值,其是假定采样点之间不存在潜在的全局趋势,只用局部的要素就可以估测非采样点的值,其基本原理是根据相邻变量的值,利用变异函数揭示的区域化变量的内在联系来估计空间变量数值<sup>[14]</sup>。其表达式如下:

$$Z(x_0)=\sum_{i=1}^n\lambda_iZ(x_i)$$
 (1)

式中: $Z(x_0)$ 为 $x_0$ 处的预测值; $Z(x_i)$ 为 $x_i$ 处的测量值; $\lambda_i$ 为克里金权重系数; $n$ 为测量雨量站个数。变异函数的形式是克里金内插质量的关键,目前常用的变异函数模型有:球面、指数、高斯、幂和线性模型等<sup>[14]</sup>。本文通过对原始数据进行分析,选择球面模型作为普通克里金法的变异函数理论模型,同样采用离中心点最近的 20 个站点数据来进行插值。

1.2.2 小波分析(Waveletanalysis) 小波分析(Waveletanalysis)<sup>[13-15]</sup>是时间—频率分析领域近年来迅速发展的一种新技术,具有多时间尺度、多层次和多分辨的特性。其基本思想是用一小簇小波函数来表示或者逼近某一函数或信号,因此小波函数是小波分析的关键,其是指能够快速的衰减到零且具有震荡性的一类函数<sup>[16]</sup>。其公式为:

$$\Psi(t)\in L^2(R)$$
 (2)

且满足:

$$\int_{-\infty}^{\infty}\Psi(t)dt=0$$
 (3)

式中: $\Psi(t)$ 为基小波函数,它可通过尺度周期的伸缩和时间轴上的平移从而形成一簇函数系:

$$\Psi_{a,b}(t)=|a|^{-\frac{1}{2}}\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$
 (4)

式中: $\Psi_{a,b}(t)$ 为子小波; $a$ 为尺度因子,反映小波的周期长度; $b$ 为平移因子,反映的是时间上的平移<sup>[13]</sup>。

本文即应用小波分析原理对南方农牧交错带近 58 年来的年和各季 W 指数进行各季节震荡周期分析。

1.2.3 标准化降水指数(SPI) 标准化降水指数(SPI)是 McKee 等<sup>[15]</sup>提出的衡量某个区域月以上尺度旱涝程度的指数,能较好地表征干旱强度和持续时间。SPI 指数首先利用  $\Gamma$  分布概率来描述降水量的变化,再将此频率进行正态标准化处理,最终用标准化后的降水累积频率分布来划分干旱等级<sup>[16]</sup>。干旱划分等级参照《气象干旱等级 GB/T20481—2017》国家标准,其计算步骤见参考文献<sup>[16]</sup>。干旱等级划分见表 1。

表 1 标准降水指数(SPI)与旱涝等级

标准降水指数(SPI)	旱涝等级
$\leq -2.0$	极度干旱
$-2.0 < \text{SPI} \leq -1.5$	重度干旱
$-1.5 < \text{SPI} \leq -1.0$	中度干旱
$-1.0 < \text{SPI} \leq -0.5$	轻度干旱
$-0.5 < \text{SPI} < 0.5$	正常
$0.5 \leq \text{SPI} < 1.0$	轻度洪涝
$1.0 \leq \text{SPI} < 1.5$	中度洪涝
$1.5 \leq \text{SPI} < 2.0$	重度洪涝
$\geq 2.0$	极度洪涝

2 降水量时空变化特征分析

2.1 年降水量时间变化特征分析

图 2 是南方农牧交错带年均降水量时间分布图,由图 2 可知,该区域近 58 a 来的年平均降水量为 709.3 mm;1998 年的年平均降水量最高可达到 862.35 mm/a,比平均值高出了 21.5%,而降水量最少的年份是 1967 年,降水量为 612.58 mm,两者之间相差了 249.77 mm,降水量的年际变化较大。从图 2 的还可以看出,研究区的降水量在 58 a 以来呈递增的趋势发展,增长率为 3.98 mm/10 a。从变化阶段看,1983—1998 年降水量呈明显的上升趋势,20 世纪 60 年代前期、90 年代的降水量明显高于多年降水量的平均值,降水较为丰沛,相比较而言在该时间段内为该区域的多雨期;而在 20 世纪 60 年代后期到 80 年代前期的大部分年份、2006 年、2011 年的降水量明显低于平均水平,可以看出其降水量值为 58 a 中的最



低值,说明在该时间段内,该区域的降水量较少,为较明显的枯水期。

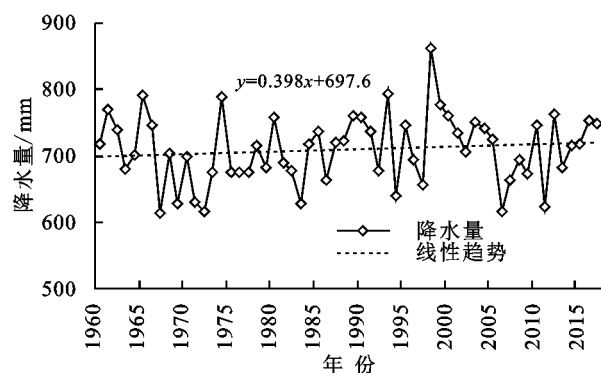


图 2 南方农牧交错带年平均降水量变化趋势

## 2.2 年均降水量变化周期分析

为了进一步揭示南方农牧交错带地区降水量在时间尺度上变化的多样性以及更进一步的了解其降水的周期性变化特征,利用 Matlab 软件的小波分析法对南方农牧交错带的多年平均降水量数据进行周期序列分析,分析南方农牧交错带地区在 58 a 降水过程中旱涝发生情况的时间尺度变化、突变点分布及位相结构特征(见图 3—4)。

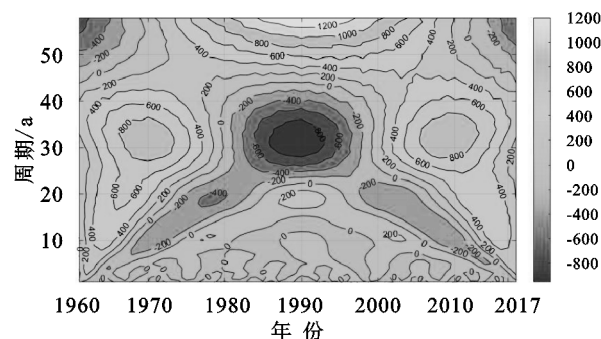


图 3 小波周期

图 3 为 1960—2017 年南方农牧交错带地区年均降水量小波周期图,正值表示降水较丰状态,负值表示降水较枯状态,小波系数为 0 时,对应着突变点。整个区域的降水量呈现多种尺度的周期变化特征,在整个 58 a 期间,南方农牧交错带地区年均降水量出现了 3 次较为明显的枯丰交替,在降水过程中 27~39 a 有较为明显的周期特征,其中心时间尺度为 31 a 左右,正负相位在图中可以很明显的看出交替出现,即表明出现了明显的丰—枯—丰交替的准 3 次振荡,其中 1965—1974 年为正相位,说明在此周期内该区域降水较为丰富,为降水丰沛期;1984—1996 年为负相位,说明在此周期内该区域降水量较少,为降水的干枯期;2005—2013 年为正相位,说明在此周期内降水也将为丰富,同样也为降水的丰沛期,因此可以说明在整个 58 a 的时间尺度上,31 a 为中心时间尺度,10 a 为一个时间周期,正负相位共出现了丰—枯—丰 3 次明显的交替。

根据图 4 的小波周期图可以明显的看出在整个时间尺度的降水过程中存在很明显的周期变化,再利用由 Matlab 软件绘制的小波方差图(图 4),小波方差图能够反映降水量时间序列的波动能量随时间尺度的分布状况,可以用来确定降水过程中出现的主要周期。从图中可以看出,该区域在尺度内的降水存在着 3 个较为明显的峰值,其依次对应着 9 a, 28 a, 52 a 的时间尺度,其中最大峰值对应着 28 a 的时间尺度,说明在 28 a 左右的周期震荡最强,为此区域年降水量变化的第一主周期;9 a 和 52 a 时间尺度分别对应着第二、第三峰值,说明 9 a 和 52 a 左右的的周期震荡较 28 a 左右的周期震荡较弱,分别为降水变化的第二、第三主周期。因此可以表明存在 3 个周期的波动,这 3 个周期的变动控制着整个南方农牧交错带的降水在整个时间尺度内的变化特征。

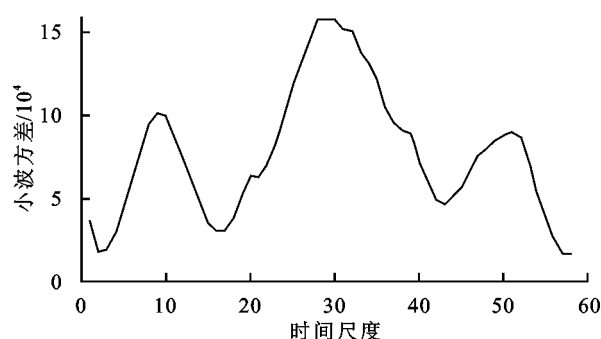


图 4 小波方差

## 2.3 年平均降水量空间变化特征分析

图 5 是南方农牧交错带年均降水量空间分布图,年均降水量在 484.59~947.93 mm 范围内变动,降水量最大值与最小值之间相差 450 mm 左右,降水的空间分异显著,且呈现出由东南向西北递减的趋势。大致以维西—理塘—若尔盖一线为该区域年均降水量的分界线,该界线以西地区的降水量大致为 484~755 mm;界线以东地区的降水量在 755~948 mm 范围内波动,降水较为丰富。从图 5 中还能够看出该区域在年均降水量上存在两个高值中心和一个低值中心,两个高值中心分别为“木里—九龙”、“维西”,其中“木里—九龙”的降水量高达 915.06 mm,“维西”的降水量高达 947.93 mm;降水量低值中心出现在“巴塘”,其多年平均降水量低至 484.59 mm。

南方农牧交错带的降水量主要集中在夏季,降水主要受东南季风和西南季风的影响,“九龙—木里”位于青藏高原东南缘与川东盆地向青藏高原的过渡地带,主要受东南季风的影响,降水量相对丰富;巴塘、德格等地远离海洋,由于青藏的屏障作用,使得西南季风在到达该区域西北部的时候,影响被大大的削弱,从而导致该区域西北部的降水较少,因此就形成

了在该地区东南地区降水较为丰富,西北地区降水较少的局面。其次,海拔高度也是影响降水量多少的一个关键性因素,通过对该区域 20 个站点的多年平均降水量及其站点相对应的海拔高度进行相关分析得出的结果发现,海拔越低,降水量越丰富,从图 1DEM 图中可以看出,南方农牧交错带地区整个东南地区的海拔要低于西北地区的海拔,因此也能够说明东南地区的降水量>西北地区的降水量;除此之外,地形地貌、植被覆盖率、人类的经济社会活动的强度等因素也会对降水量的区域分配不均匀产生一定的影响。

### 3 南方农牧交错带旱涝灾害多时间尺度分析

本文以南方农牧交错带 1960—2017 年逐月降水数据为基础,分别计算了 1 个月、3 个月、6 个月、12 个月 4 个时间尺度的 SPI 值(分别用 SPI1, SPI3, SPI6, SPI12 表示),其主要原因是本文主要从短时间尺度和长时间尺度两方面来表征该区域的旱涝发生的时间特征与旱涝灾害的严重程度,其中 SPI1, SPI3 是以月和季节为尺度下旱涝灾害发生的特征,而 SPI6, SPI12 能够表征较

长时间尺度下其发生的频率。

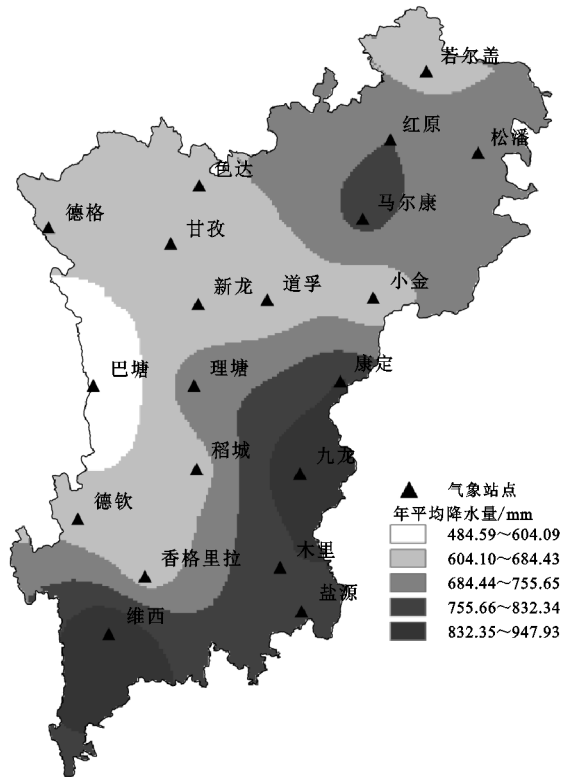
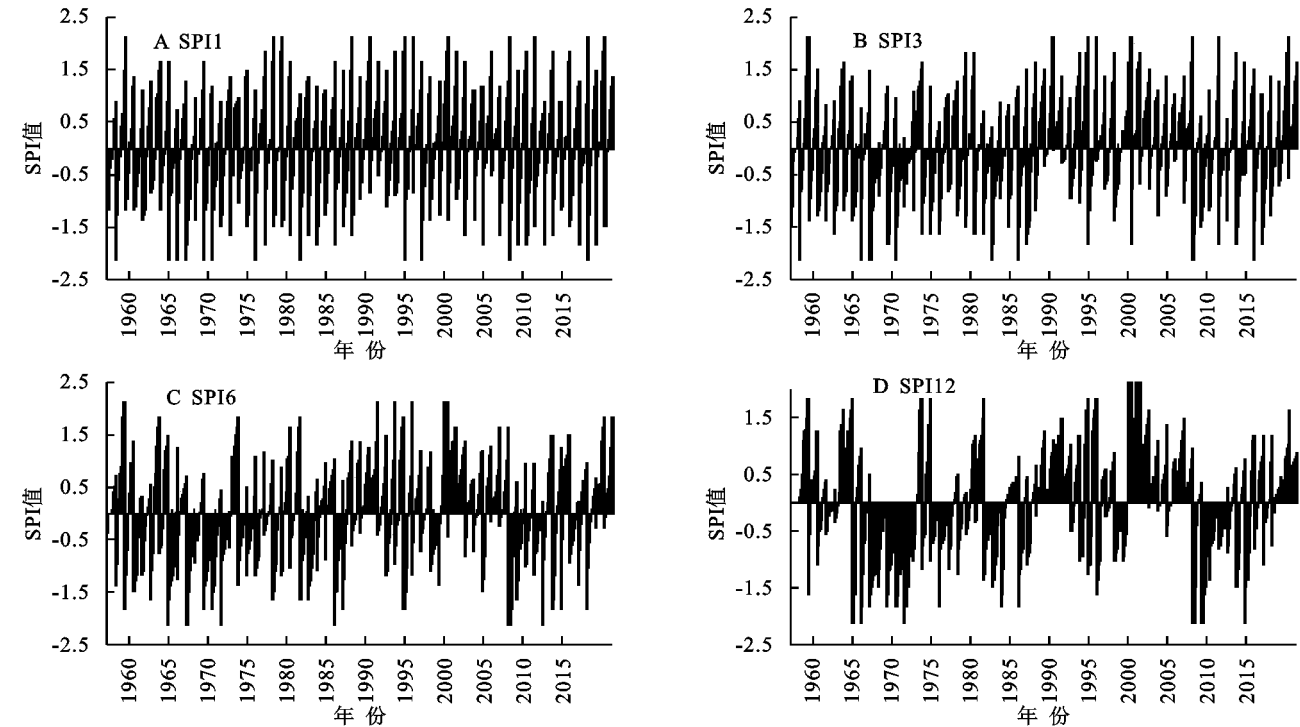


图 5 年平均降水量分布



注: X 轴上方为旱涝, 下方为洪涝。

图 6 南方农牧交错带 1960—2017 年 1,3,6,12 个月时间尺度的 SPI 变化过程

SPI1 与 SPI3 是较短时间周期内旱涝尺度分析,受短时间内的降水影响较大,数值波动较为频繁,能够较好的反映短时间内的旱涝变化情况。在 SPI1 序列图中,1961 年 5 月、1978 年 11 月、1979 年 12 月、1987 年 9 月、1989 年 10 月、1993 年 8 月、1994 年 3

月、1998 年 7 月、2005 年 2 月、2008 年 1 月、2014 年 6 月、2016 年 4 月 SPI1 值达到 2.12,达到了极度洪涝的程度,而在 1961 年 9 月、1967 年 4 月、1968 年 10 月、1969 年 2 月、1971 年 3 月、1972 年 8 月、1977 年 6 月、1982 年 5 月、1994 年 7 月、1996 年 12 月、2006

年1月、2015年11月SPI1值降到了一2.12,旱情达到了极端干旱的程度,由此可以反映出,SPI1能够较好地反映在短时间尺度下(月尺度)旱涝发生的严重程度及其短时间尺度下特征。

从SPI3序列图中可以看出,在1961年的夏季、1968年的冬季、1969年春季、1972年的夏季、1983年的夏季、1986年的夏季、2006年的夏季和秋季、2013年的冬季、2015年的秋季SPI值为-2.11,表明在此几个年份的该季节旱涝程度达到了极端干旱的程度,旱情严重;而在1961年夏季、1989年秋季与冬季、1993年秋季、1994年春季、1998年夏季与秋季、2005年冬季、2008年冬季、2016年春季的SPI值为2.11,表明在这些年份的季节中涝情严重,达到了重涝的程度,降水量极为丰富从而导致极端湿润。因此从关于SPI3的旱涝情况分析中可以看出,SPI3能够很好地反映旱涝发生的季节变化特征。

SPI6和SPI12是较长时间尺度下的旱涝变化情况,在此种较长时间尺度下旱涝的周期变化特征较为明显,根据上述的SPI6序列图可得,南方农牧交错带地区在1961年为极度洪涝年份,1999年、2017年为重涝年份,1974年、1995年、2000年、2004年、2010年、2016年为中度洪涝年份,1978年、1981年、1985年、1990年、2001年、2002年、2003年、2012年为轻度洪涝年份。1986年为极度干旱年份,1983年、1987年为重度干旱年份,1963年、1967年、1969年、1977年、1979年、1980年为中度干旱年份,1993年、1982年、1971年、1972年、2009年、2007年、1988年、1966年、1970年为轻度干旱年份。

由SPI12序列图可以得知,南方农牧交错带地区20世纪80、90年代偏涝,在该时间段内涝灾发生的频率较高;20世纪70年代偏旱,在该时间段内旱灾发生的频率较高;20世纪60年代、90年代旱涝灾害交替出现,但是60年代发生的旱灾频率要高于涝灾频率,90年代发生涝灾的频率要高于旱灾的频率,所以60年代整体偏旱,干旱化趋势明显,90年代整体偏涝;进入21世纪之后旱涝发生的频率有所减少,2006年、2007年、2009年、2011年处于偏涝年份、2000年、2003年、2010年、2017年处于偏旱年份,其于年份发生旱涝灾害的程度从SPI12的指示状态来看都属于正常的年份,表明进入21世纪,南方农牧交错带地区的旱涝灾害发生的频率有所减少,降水量趋于正常,这种现象的发生是由于多种因素影响而形成的。通过对SPI12序列图的分析发现,SPI12对长时

间尺度内的旱涝灾害程度的变化具有良好的判断作用,其不仅能够较为准确的判断出旱涝变化情况的年际变化特征,还能够很好的反映研究区域内旱涝灾害的发展趋势,对于预防旱涝灾害有一定的指导作用。从SPI12序列值可以看出,南方农牧交错带地区总体在21世纪之前偏涝,在2000年之后的前几年涝灾减少,发生旱灾的频率增加,但是在2010年之后的SPI12指数值趋于正常,且保持平稳,旱涝灾害减少,指数趋于平稳。

## 4 结论

(1) 南方农牧交错带地区在58 a来降水量时间变化上整体呈现出增加的趋势,平均递增率为3.98 mm/10 a,年平均降水量在时间变化上存在较为明显的“丰一枯一丰”振荡周期。

(2) 南方农牧交错带地区的年平均降水量在空间上的分布其大致以维西—理塘—若尔盖为分界线,呈现出一种由东南向西北递减的趋势;研究区域的年平均降水量存在高、低值中心,其中降水量高值中心存在两个,即“九龙—木里”、“维西”降水量高值中心,年平均降水量的低值中心出现在川西高原的“巴塘”。季风、地形、海拔高差等因素是影响该区域降水量空间分布不均的主要因素。

(3) 对南方农牧交错带地区旱涝灾害进行多时间尺度分析发现其具有一定的时间阶段特征,20世纪80、90年代偏涝,涝灾发生的频率较高;在20世纪70年代偏旱,旱灾发生的频率较高;20世纪60、90年代旱涝灾害交替出现,但是60年代以旱灾为主,进入21世纪之后,研究区旱涝灾害发生的频率有所减少。

### 参考文献:

- [1] Urban M C. Accelerating extinction risk from climate change[J]. Science, 2015,348(6234):571-573.
- [2] Penny D, Zachreson C, Fletcher R, et al. The demise of Angkor: Systemic vulnerability of urban infrastructure to climatic variations[J]. Science Advances, 2018,4(10):eaau4029.
- [3] Magadza C H D. Climate change impacts and human settlements in Africa: prospects for adaptation[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2000,61(1): 193-205.
- [4] Zhang H, Werner J P, García-Bustamante E, et al. East Asian warm season temperature variations over the past two millennia[J]. Scientific Reports, 2018,8(1):1-11.

- [5] 袭祝香,杨雪艳,刘玉汐,等.松辽流域 1961—2017 年极端降水变化特征[J].水土保持研究,2019,26(3):199-203,212.
- [6] 杜华明,贺胜英.岷江流域降水特征与旱涝灾害趋势分析[J].水土保持研究,2015,22(1):153-157..
- [7] 罗那那,巴特尔,巴克,等.基于标准化降水指数的北疆地区近 52 年旱涝变化特征[J].水土保持研究,2017,24(2):293-299.
- [8] 李烁阳,刘小燕,杨贵羽,等.湖北省降水及旱涝时空分布特征分析[J].水土保持研究,2019,26(2):202-207.
- [9] 吴贵蜀.农牧交错带的研究现状及进展[J].四川师范大学学报:自然科学版,2003(1):108-110.
- [10] 赵唯茜,杜华明,董廷旭,等.2005—2014 年南方农牧交错带净初级生产力时空分布特征[J].水土保持研究,2018,25(6):236-241.
- [11] 傅伯杰.景观生态学原理及应用[M].北京:科学出版社,2001.
- [12] 胡甲秋,杨云川,邓思敏,等.基于多尺度 SPI 的广西干湿特征与未来趋势[J].水土保持研究,2018,25(5):319-324,336.
- [13] 马佳宁.近 50 年黄河上游流域年均降水与极端降水变化分析[J].高原气象,2019,38(1):124-135.
- [14] 汤国安. ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程.第 2 版[M].北京:科学出版社,2012.
- [15] Bonaccorso B, Bordi I, Cancelliere A, et al. Spatial Variability of Drought: An Analysis of the SPI in Sicily[J]. Water Resources Management, 2003, 17(4): 273-296.
- [16] 中国气象局.气象干旱等级:GB/T 20481—2017[M].北京:中国标准出版社,2018:3.

(上接第 125 页)

- [10] Raito G, Provenzano G. Modelling eco-physiological response of table olive trees to soil water deficit conditions[J]. Agricultural Water Management, 2012, 120(2):79-88.
- [11] Mengistu D K. The influence of soil water deficit imposed during various developmental phases on physiological processes of tef[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 132(3/4):283-289.
- [12] 李军,陈兵,李小芳,等.黄土高原不同干旱类型区苜蓿地深层土壤干燥化效应[J].生态学报,2007,27(1):75-89.
- [13] 朱炜歆,牛俊杰,刘庚,等.植被类型对生长季黄土区土壤含水量的影响[J].干旱区资源与环境,2016,30(1):152-156.
- [14] 韦红波,李锐,杨勤科.我国植被水土保持功能研究进展[J].植物生态学报,2002,26(4):489-496.
- [15] 张平仓,郑粉莉.土壤侵蚀与生态环境演变[J].中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊,1993,1(3):11-16.
- [16] Wang Y, ming'an Shao, Shao H. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2010, 381(1/2):9-17.
- [17] 杨磊,卫伟,莫保儒,等.半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J].生态学报,2011,31(11):3060-3068.
- [18] 高宇,樊军,彭小平,等.水蚀风蚀交错区典型植被土壤水分消耗和补充深度对比研究[J].生态学报,2013,34(23):7038-7046.
- [19] Wang Y, Shao M, Liu Z, et al. Regional spatial pattern of deep soil water content and its influencing factors [J]. Hydrological Sciences Journal, 2012, 57(2):265-281.
- [20] Wang, Y, Liu, et al.. Vertical distribution and influencing factors of soil water content within 21-m profile on the Chinese Loess Plateau [J]. Geoderma, 2013, 193:300-310.
- [21] 郭忠升.半干旱区柠条林利用土壤水分深度和耗水量[J].水土保持通报,2009,29(5):69-72.
- [22] 程积民,万惠娥,王静,等.黄土丘陵半干旱区天然草地土壤水分调控研究[J].草地学报,2003,11(4):296-300.
- [23] 陈洪松,邵明安,王克林.黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征[J].应用生态学报,2005,16(10):1853-1857.
- [24] 王力,邵明安,王全九,等.黄土区土壤干化研究进展[J].农业工程学报,2004,20(5):27-31.
- [25] Yang L, Wei W, Chen L, et al. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China[J]. Catena, 2014, 115:123-133.
- [26] Yang L, Wei W, Chen L, et al. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 475:111-122.
- [27] Satyanaga A, Rahardjo H, Leong E C, et al. Water characteristic curve of soil with bimodal grain-size distribution[J]. Computers & Geotechnics, 2013, 48(3): 51-61.