Operations Research and Fuzziology 运筹与模糊学, 2024, 14(1), 1044-1056
Published Online February 2024 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/orf
https://doi.org/10.12677/orf.2024.141097

江西省九江市降水变化特征分析

徐聪颖[1]，**花　磊**[2]

[1]南京信息工程大学数学与统计学院，江苏　南京
[2]苏州博纳讯动软件有限公司，江苏　苏州

收稿日期：2024年1月1日；录用日期：2024年1月19日；发布日期：2024年2月29日

摘　要

为了深入了解九江地区的降水特征和趋势变化，优化农业生产，本文利用九江市8个站点1961~2020年的降水资料，采用线性趋势分析法、Mann-Kendall检验法、滑动T检验、小波分析和重标极差分析法，分析了九江市年、季降水量在长时间尺度上的变化特征。研究表明：1) 九江市近60a的年降水量呈上升趋势，降水倾向率为32.86 mm/10a。其中，春季降水量呈微弱的下降趋势，夏、秋、冬季降水量均为上升趋势；2) 在0.05的显著性水平下，年降水量突变点出现在1969、1978和2012年，其中1969与2012年出现降水量增长，1978年降水量下降。春季与秋季无明显突变点，夏季降水量的突变点出现在1969年，冬季降水量的突变点出现在1988年，均为增长现象；3) 九江市年、季降水量均存在明显的周期变化，两者的第一主周期均为36a，在该尺度下的变化周期约为23年；四季降水量的第二主周期在20a左右，变化周期约为12年；4) 九江市未来年降水量表现为下降趋势。其中，春季降水量增多，其他季节降水量均为减少趋势。

关键词

降水量，趋势分析法，突变检验，小波分析，重标极差分析法

Analysis of Precipitation Change Characteristics in Jiujiang City of Jiangxi Province

Congying Xu[1], **Lei Hua**[2]

[1]School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu
[2]Suzhou Beyondcent Software Co., Ltd., Suzhou Jiangsu

Received: Jan. 1st, 2024; accepted: Jan. 19th, 2024; published: Feb. 29th, 2024

文章引用: 徐聪颖, 花磊. 江西省九江市降水变化特征分析[J]. 运筹与模糊学, 2024, 14(1): 1044-1056.
DOI: 10.12677/orf.2024.141097

Abstract

In order to deeply understand the characteristics and trend changes of precipitation in Jiujiang area and optimize agricultural production, this paper uses the precipitation data of 8 stations in Jiujiang City from 1961 to 2020, and adopts linear trend analysis, Mann-Kendall test, sliding T-test, wavelet analysis and rescaled range analysis. The variation characteristics of annual and seasonal precipitation in Jiujiang City on a long time scale are analyzed. The results are as follows: 1) The annual precipitation in Jiujiang City showed an upward trend in recent 60 years, and the precipitation tendency rate was 32.86 mm/10a. The precipitation in spring showed a slight downward trend, while the precipitation in summer, autumn and winter showed an upward trend. 2) At the significance level of 0.05, the abrupt change points of annual precipitation appeared in 1969, 1978 and 2012, in which precipitation increased in 1969 and 2012, and decreased in 1978. There is no obvious mutation point in spring and autumn, the mutation point of summer precipitation appears in 1969, and the mutation point of winter precipitation appears in 1988, both of which are increasing phenomena. 3) There are obvious periodic changes in annual and seasonal precipitation in Jiujiang City. The first main period of both is 36a, and the change period is about 23 years at this scale. The second main cycle of precipitation in four seasons is about 20a, and the change cycle is about 12 years. 4) The future annual precipitation of Jiujiang City shows a downward trend. Among them, the precipitation in autumn increased, and the precipitation in other seasons showed a decreasing trend.

Keywords

Precipitation, Trend Analysis, Mutation Test, Wavelet Analysis, Rescaled Range Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

20 世纪以来，受自然因素和人类活动的影响，全球气候逐渐变暖。在此情况下，可能会出现降水的空间分布格局、季节分配以及年际变率等方面的形态变化。这种空间分布上的不均匀和时间变化上的不稳定性直接导致了干旱和洪涝的发生，严重影响了农业生产和社会经济的可持续发展。

九江市位于江西省最北部，长江中下游南岸，毗邻鄱阳湖，属于亚热带季风气候，其地势地貌比较复杂，易受台风影响。一直以来，诸多学者对江西省和九江市的气候现状研究都比较活跃。陆晴等对 1961~2016 年江西省地区降水量进行了时空变化特征分析[1]，结果表明：近 56 年来，江西省降水量呈波动变化趋势，20 世纪 60 年代为枯水期，而 90 时代为丰水期；夏季气候变化以降水增加为主，增加速率为 20.0 mm/10a ($p < 0.05$)。王伟等对九江市近 47 年来气候变化初步分析[2]，分析结果表明：47 年来九江市年降水量呈小幅上升趋势，增长率为 22.8 mm/10a；阙志萍等对江西省近 55 年秋季降水时空分布及异常环流特征进行了分析[3]，结果表明：近 55 年来江西省秋季降水呈弱增长趋势，在 1981 年、1984 年和 1987 年发生突变，存在 12~14 年和 2~4 年的周期；潘爱军等对九江市夏季降水的年际变化特征进行研究[4]，研究表明：1961~2018 年九江市夏季降水具有显著的年际变化特征，其中 1998 年最高，1968 年最低，多年平均降水量约为 500 mm，其年际变化存在准 4a 的变化周期。

以上文献虽然对九江市的年、部分季节降水量进行了深入研究，但缺乏对季节间变化特征的系统分析。并且，上述文献多是研究降水量的变化特征，并未对未来的降水趋势进行预测。因此本文以江西省九江市的年度、季度降水量为研究对象，选择九江市内具有代表性的 8 个气象站点的逐日降水量数据，采用线性趋势分析法、Mann-Kendall 突变检验、滑动 T 检验、小波分析以及重标极差法分析了 1961~2020 年九江市降水量的趋势、突变和周期特征，并对未来一段时间内九江市降水的趋势变化进行预测，旨在为当地的社会经济发展和产业布局提供参考。

2. 资料与方法简介

2.1. 研究资料

本文选取了九江市 1961~2020 年共 60 年的逐日降水资料(数据来源于中国气象数据网 https://data.cma.cn/)，用 Python 和 Excel 统计得到年、季的降水量，按照季节划分法，以 3~5 月为春季，6~8 月为夏季，9~11 月秋季，12 月至次年 2 月为冬季。

2.2. 线性趋势分析法

用 x_i 表示样本量为 n 的某一气候变量，用 t_i 表示 x 所对应的时间，建立 x_i 与 t_i 之间的一元线性回归方程[5]：

$$x_i = a + bt_i,\ i = 1, 2, \cdots, n$$

回归系数 b 的符号表示气候变量 x 的趋势倾向。当 $b > 0$ 时，说明随时间 t 的增加降水量呈上升趋势；当 $b < 0$ 时，说明随时间 t 的增加降水量呈下降趋势。b 的值越大，说明降水的变化趋势越明显。

2.3. Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验法(简称“M-K 检验法”)是气象学中常用的一种检验序列突变的方法，它能够帮助我们确定时间序列数据中的突变点及突变时间。其优势是无需遵循特定的分布，对少数异常值不敏感，且计算简单，尤其适用于类型变量和顺序变量[6]。

假设降水序列是随机且独立的，那么我们可以定义统计量

$$\mathrm{UF}_k = \frac{\left[s_k - E\left(s_k\right)\right]}{\sqrt{\mathrm{var}\left(s_k\right)}}, k = 1, 2, \cdots, n$$

其中，

$$\begin{cases} E\left(s_k\right) = \dfrac{n\left(n+1\right)}{4} \\ \mathrm{var}\left(s_k\right) = \dfrac{n\left(n+1\right)\left(2n+5\right)}{72} \end{cases}$$

给定显著性水平 α，若 $\mathrm{UF}_k > 0$，则表明时间序列呈上升趋势，小于 0 则为下降趋势；若 $\left|\mathrm{UF}_k\right| > \mathrm{U}_\alpha$，即曲线 UF_k 超过显著性水平线，表明序列的上升或下降趋势显著；若 UF_k 与 UB_k 相交且交点在临界线内，那么交点对应的时刻就是突变开始的时刻，若两者有多个交点，则无法确定突变年份；若交点在临界线外，说明交点没有通过显著性检验，故该点不具有突变性。

2.4. 滑动 T 检验

滑动 T 检验判断样本是否发生突变的方法是通过检验两个样本的均值有无显著差异。它的基本思想

是通过比较某一段气象序列的两个子序列的平均值之间有无显著差异来判断两个样本是否有显著差异。该方法是对可能的突变点进行检验，通过与 M-K 突变结合分析以确定在该点是否发生突变。如果两个子序列的均值超过了给定的显著性水平，就认为在该点发生了突变。

2.5. 小波分析

小波分析可以揭示序列的变化尺度，并能得到序列周期变化的时间点，反映序列在不同时间尺度上的变化趋势。它的基本思想是将原始信号分解成不同尺度上的小波基函数，以揭示信号在时间和频率上的局部特征。它不仅可以给出气候序列的变化尺度，还可以显现出变化的时间位置，对于气候预测十分有用。

对于一个特定的小波函数，小波变换的形式为

$$\omega_f(a,b)=|a|^{-\frac{1}{2}}\Delta t\sum_{i=1}^{n}f(i\Delta t)\overline{\psi}\left(\frac{i\Delta t-b}{a}\right)$$

小波方差为

$$\mathrm{var}(a)=\sum\left[\omega_f(a,b)\right]^2$$

其中，$\omega_f(a,b)$ 是小波变换系数，a 是尺度因子，b 是时间因子，$f(t)$ 是时间序列，$\psi(t)$ 为小波函数。

通过小波系数实部等值线图，可以反映在不同时间尺度上时间序列发生的周期性变化[7]。小波方差随着时间尺度的变化图称为小波方差曲线图，它反映了信号能量随着时间尺度的变化，可以用来确定某个时间序列的主周期。

2.6. 重标极差分析法

重标极差分析法是一种基于长期相关思想的时间序列分析方法。基于重标极差分析法的 Hurst 指数是定量描述时间序列信息长期依赖性的有效方法，其基本原理是：

对于时间序列 $\{x_t\}$，对于任意的正整数 f，均值序列

$$\overline{x}_f=\frac{1}{f}\sum_{t=1}^{f}x_t,f=1,2,\cdots,n$$

累积离差

$$X(t,f)=\sum_{u=1}^{t}\left(x_u-\overline{x}_f\right),1\le t\le f$$

极差为

$$R(f)=\max_{1\le t\le f}X(t,f)-\min_{1\le t\le f}X(t,f),f=1,2,\cdots,n$$

标准差为

$$S(f)=\left[\frac{1}{f}\sum_{u=1}^{f}\left(x_u-\overline{x}_f\right)^2\right]^{\frac{1}{2}},f=1,2,\cdots,n$$

Hurst 指数 H 为

$$\frac{R(f)}{S(f)}=(cf)^H$$

H 的不同估值表示了降水时间序列过去与未来不同的趋势变化。当 $H=0.5$ 时，表示未来的降水量与

过去无关；当 $0 < H < 0.5$，表示降水量的未来变化趋势与过去相反；当 $0.5 < H < 1$，表示降水量的未来变化趋势与过去一致。

3. 年降水变化特征分析

九江市的年平均降水量约为 1500 毫米，降水丰沛，气候湿润。近几十年来，九江市的降水总体呈现稳定或略微增加的趋势。因此，我们对九江市 1961~2020 年的降水数据进行趋势、突变和周期分析，以探究其变化情况，为之后的降水分析及预测提供帮助。

3.1. 年降水变化趋势

图 1 是九江市年降水量的线性变化趋势，从图中可以看出，1961~2020 年间，九江市降水量最大的年份为 1998 年，降水量为 2157.4 mm，最小的年份为 1978 年，为 936.86 mm，两者相差 1220.54 mm。60 年的年平均降水量为 1535.54 mm。由 5a 滑动平均线可知，九江市 1961~2020 年间的降水大致可分为五个阶段，1960~1975 年间降水量明显上升，1975~1980 年间迅速下降，1980~2000 年间呈缓慢上升趋势，2000~2010 年间明显下降，2010~2020 年间又逐渐上升。气候倾向率为 32.86 mm/10a，年降水量整体呈上升趋势。

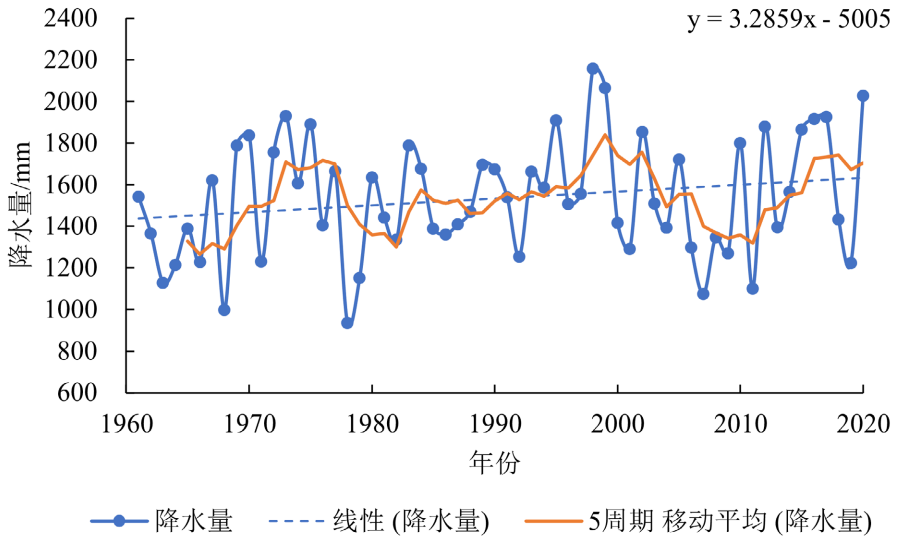

Figure 1. Linear variation trend of annual precipitation
图 1. 年降水量线性变化趋势

3.2. 降水突变分析

取显著性水平 $\alpha = 0.05$，由 M-K 突变分析(图 2)可知，UF 曲线先上升后下降，再上升而后下降。在 1960~1975 年间和 2000 年左右 UF 曲线超过显著性水平，表明年降水上升趋势明显。UF 曲线和 UB 曲线在临界线内存在多个交点，说明九江市降水复杂多变，单从 M-K 曲线中无法判断突变年份。此时，可以结合滑动 T 检验(图 3)来判断突变年份。

由图 3 可知，当步长为 5 时，T 统计量在 1969、1978 年和 2012 年超过了显著性水平，说明在这几个点可能出现突变(图 3)。再结合 M-K 突变检验图，在这三个点，UF 和 UB 线均在临界线内有交点。所以综合判断，在 1961~2020 年间，九江市在 1969、1978 年和 2012 年均出现过降水突变；其中，在 1969 和 2012 年时降水量骤增，1978 年时降水量减少。

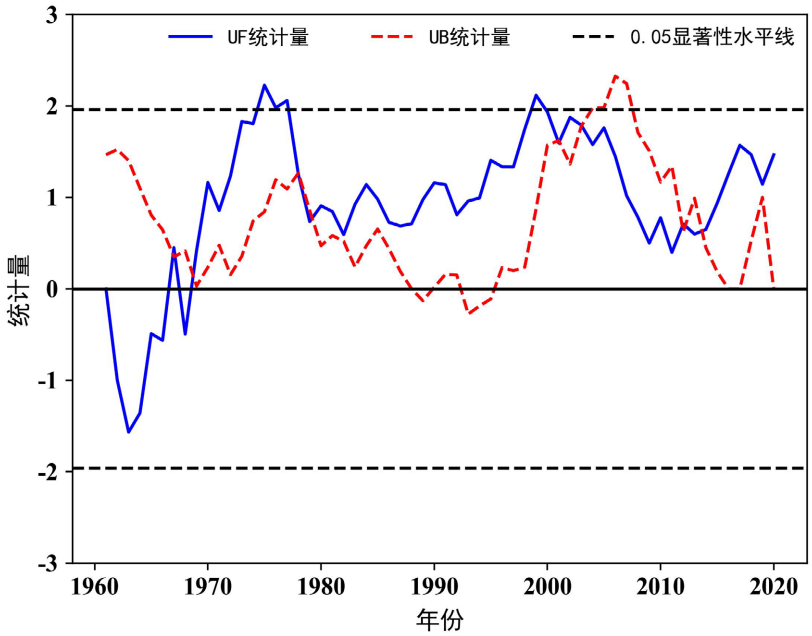

Figure 2. M-K mutation test of annual precipitation
图 2. 年降水量 M-K 突变检验

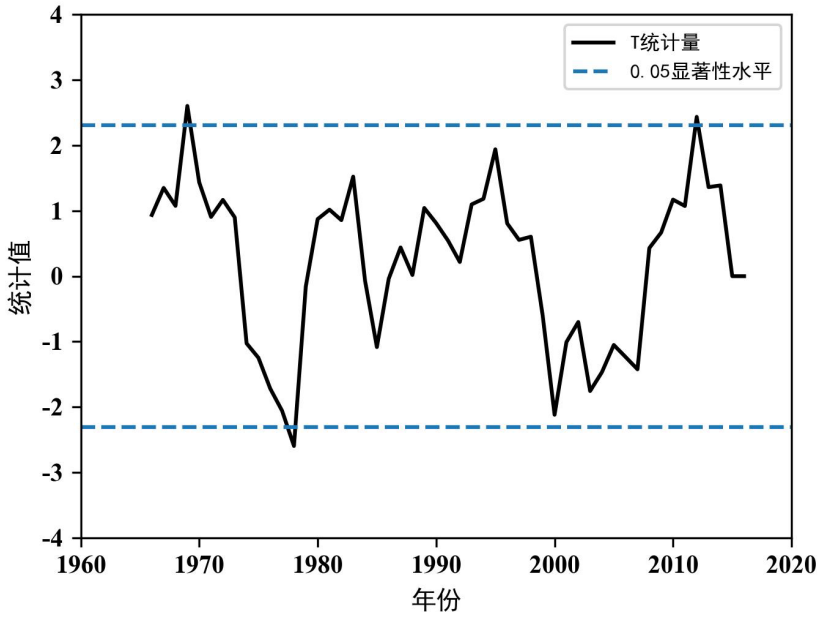

Figure 3. Sliding T test for annual precipitation
图 3. 年降水量滑动 T 检验

3.3. 降水周期变化分析

对九江市年降水量进行小波分析得到降水序列方差分析图(图 4)和实部等值线图(图 5)。由图 4 可知九江市 60a 降水量在 36a 和 20a 的时间尺度上存在周期性，结合图 5 可以得到，降水变化的第一主周期是 36a，在该尺度下，降水的周期变化约为 23 年，降水经历了 3 次“少－多”的变化。第二主周期是 20a，降水周期变化从 1960 年持续到 2020 年，在该尺度下的降水周期约为 14 年。

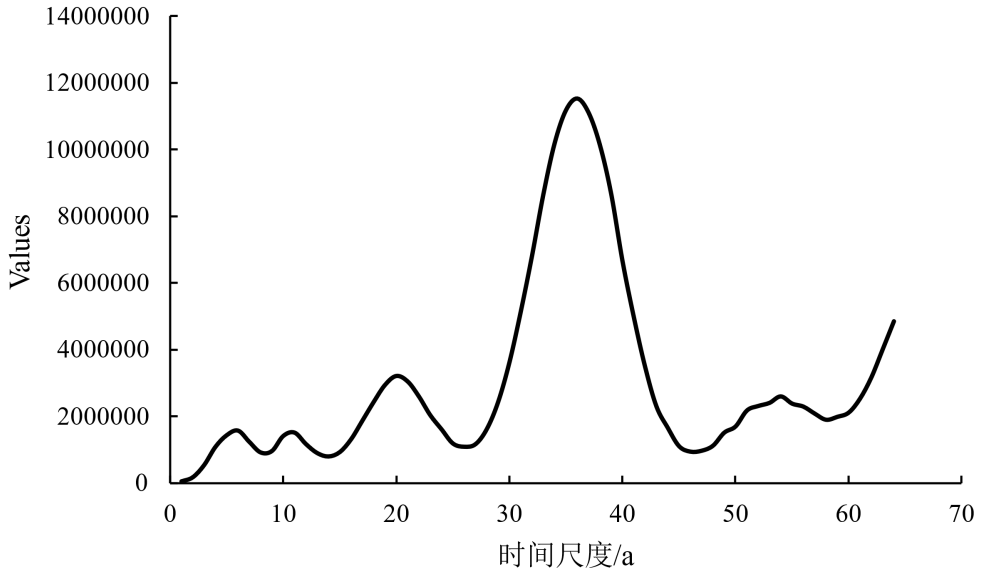

Figure 4. Analysis of variance of annual precipitation
图 4. 年降水量方差分析

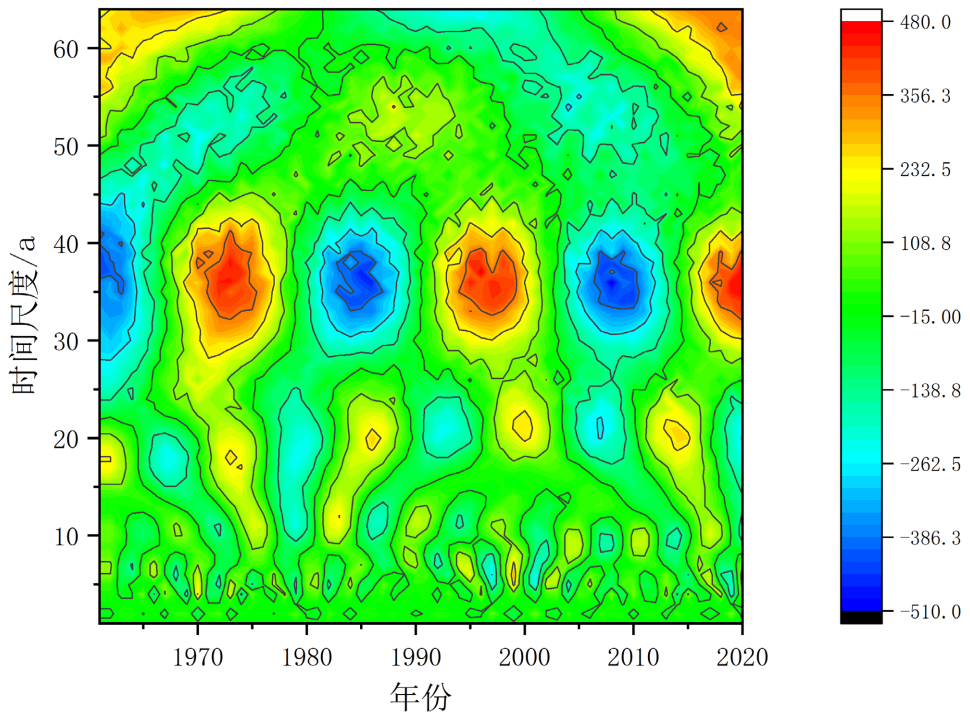

Figure 5. Contour map of the real part of the wavelet coefficient of annual precipitation
图 5. 年降水量小波系数实部等值线图

4. 各季节降水变化特征分析

九江市地势地貌比较复杂，区域性差异较大，使得降水在季节上变化明显。不同季节的降水变化特征不仅对农业生产有着直接影响，而且对于自然灾害的预警和防范也具有重要意义。因此，研究各个季节的降水变化特征对于农业生产、自然灾害预警和生态环境保护等方面都具有重要意义。

4.1. 各季节降水变化趋势

图 6 展示了各季节降水量的线性变化趋势，从图 6(a)中可以看出，在 1961~2020 年间，春季降水量最多的年份出现在 2002 年，降水量为 852.98 mm，最少的年份为 2011 年，为 243.53 mm，60 年的年平均降水量为 543.55 mm。由 5a 滑动平均线可知，从 1960 年到 21 世纪初，春季降水一直波动变化，升降趋势不明显；2000~2010 年降水量逐渐下降，而后至 2020 年又波动上升；春季降水量气候倾向率为−1.02 mm/10a，降水量整体呈微弱下降趋势。

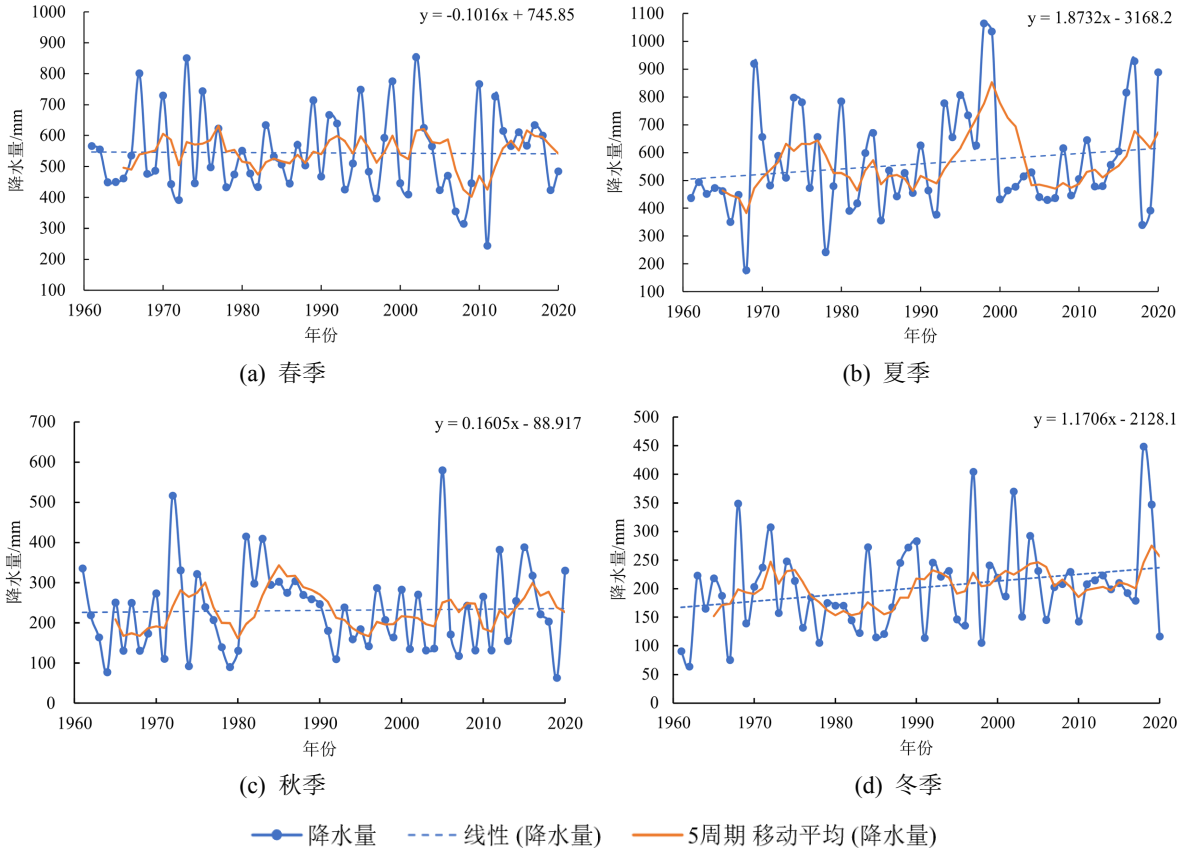

Figure 6. The linear variation trend of precipitation in each season
图 6. 各季节降水量线性变化趋势

从图 6(b)中可以看出，夏季降水量最多的年份出现在 1998 年，降水量为 1063.55 mm；最少的年份为 1968 年，降水量为 177.24 mm，60 年的年平均降水量为 560.45 mm。由 5a 滑动平均线可知，夏季降水倾向率为 18.73 mm/10a，整体呈上升趋势。其中，从 20 世纪 60 年代至 90 年代，夏季降水量波动变化且有微弱上升；1990~2000 年明显上升，而后几年又迅速下降；21 世纪初至 2020 年，降水量逐步上升。

从图 6(c)中可知，秋季降水量最多的年份出现在 2005 年，降水量为 579.43 mm，最少的年份出现在 2019 年，降水量为 62.74 mm，60 年的年平均降水量为 230.5 mm。由 5a 滑动平均线可知，秋季降水量一直呈明显的波动变化，气候倾向率为 1.61 mm/10a，整体呈微弱上升趋势。

由图 6(d)中可知，冬季降水量最多的年份出现在 2019 年，降水量为 347.09 mm，最少的年份出现在 1962 年，降水量为 63.85 mm，60 年的年平均降水量为 201.96 mm。由 5a 滑动平均线可知，冬季降水倾向率为 11.71 mm/10a，整体呈明显上升趋势，但每个年代的变化幅度不大，说明冬季降水量缓慢增加。

4.2. 各季节降水突变分析

图 7 和图 8 分别展示了九江市各季节降水量的 M-K 突变检验和滑动 T 检验结果。由图 7(a)可知，九江市春季降水量呈波动变化趋势，1964 年 UF 曲线超过 0.05 显著性水平线，说明此时降水下降趋势明显[8]。结合图 8(a)可知，在 2005 和 2016 年处可能发生突变，但由于在 M-K 突变分析中，这两个点处无交点，所以春季降水量没有明显的突变点。

夏季降水量的 UF 和 UB 曲线有多个交点(图 7(b))，其中，UF 曲线在 1998~1999 年超过了显著性水平线，说明夏季降水量在此时有明显的上升趋势。结合图 8(b)可知，夏季降水量可能在 1969、1973 和 2000 年发生突变，由于 UF 和 UB 曲线在 1969 年处有交点，所以可知夏季降水量在 1969 年发生突变，降水量明显上升。

秋季降水量的 UF 曲线先上升后下降，且在 1973~1978，1982~1995 年间超过了显著性水平线(图 7(c))，说明在这两个时间段降水量呈上升趋势。在置信区间内，UF 与 UB 曲线有多个交点，但结合图 8(c)可知，两幅图中没有相同的突变年份。因此，九江市秋季降水量没有出现突变。

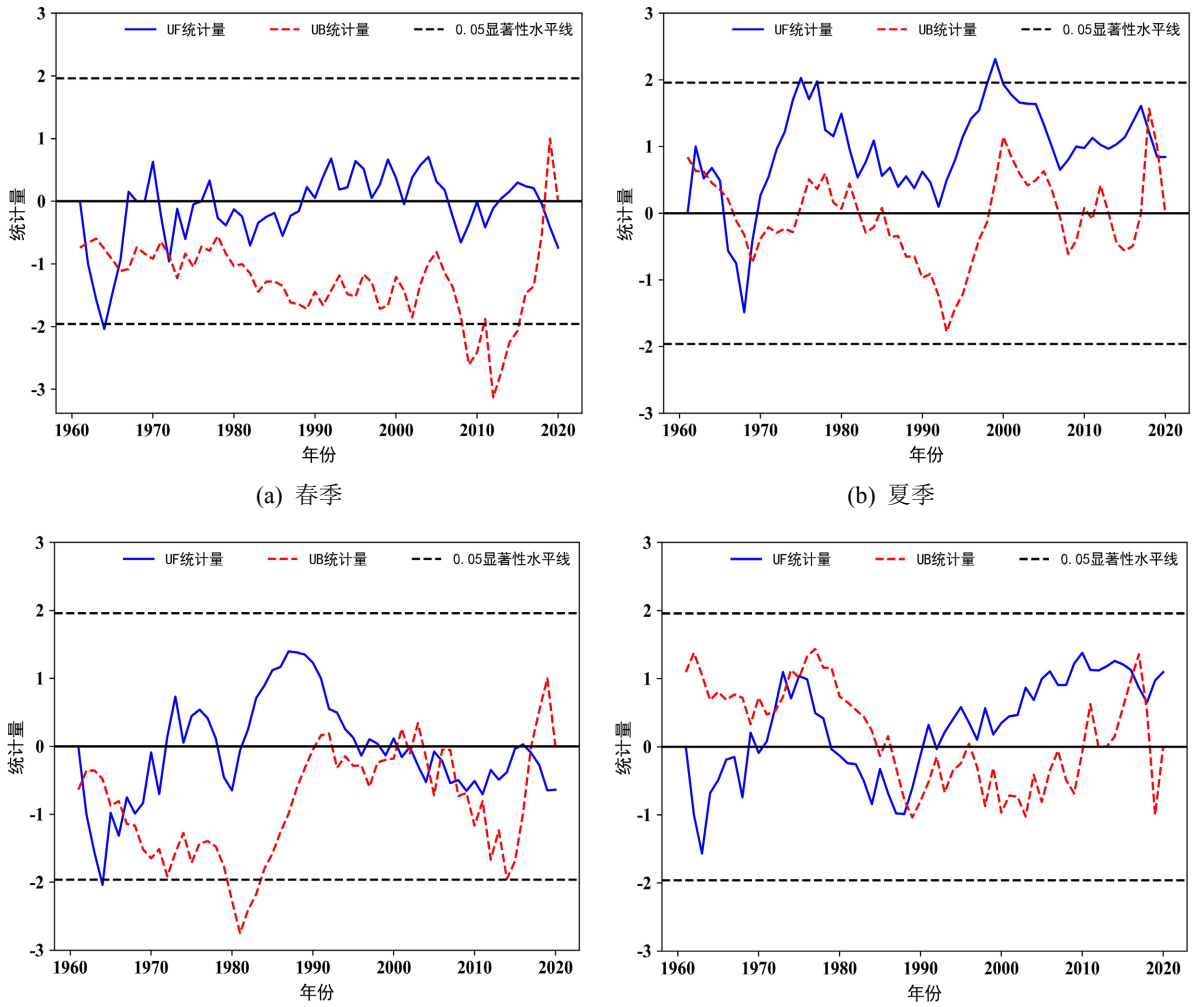

Figure 7. M-K mutation test of precipitation in each season
图 7. 各季节降水量 M-K 突变检验

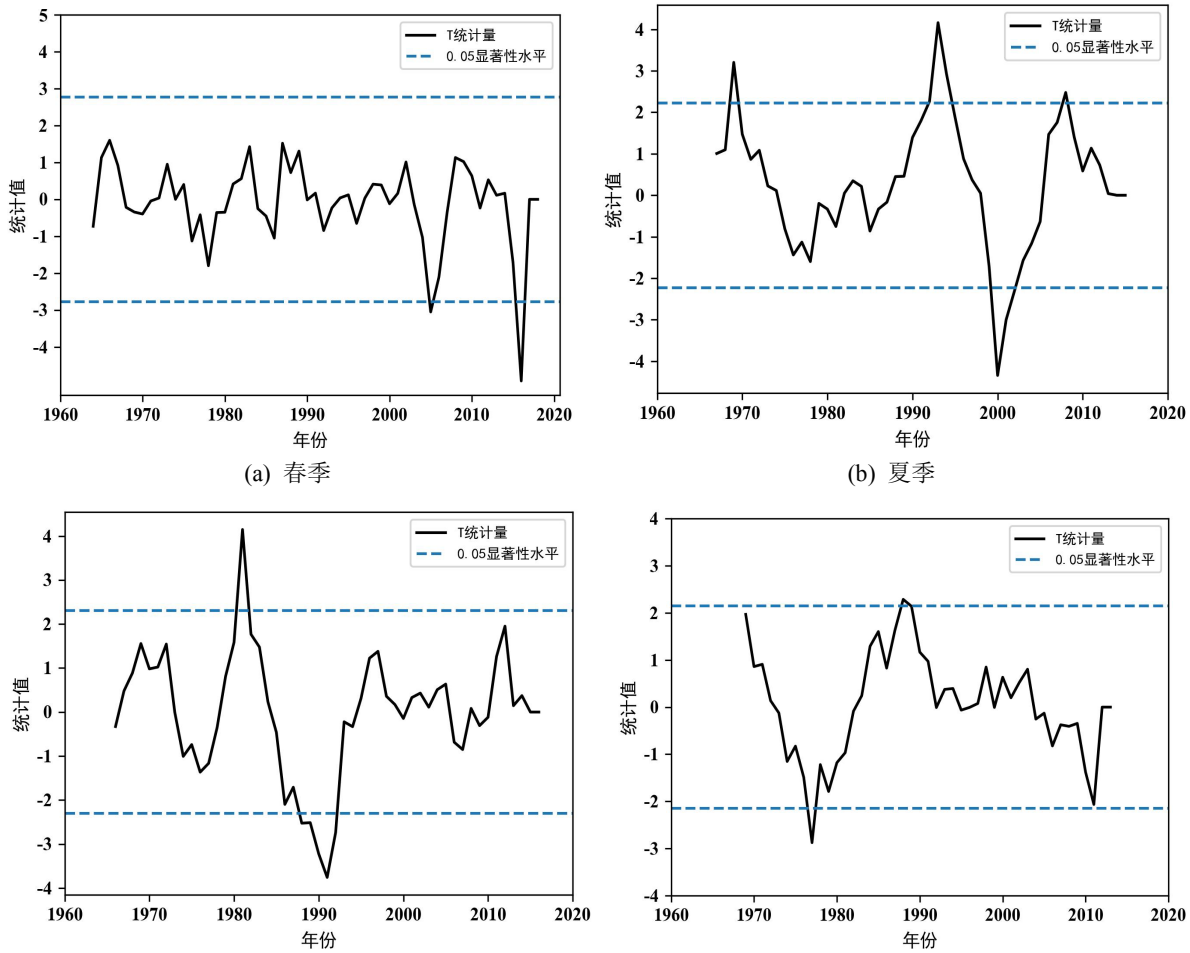

Figure 8. Sliding T test of seasonal precipitation
图 8. 各季节降水量滑动 T 检验

冬季降水量的 UF 曲线呈现“增－减－增”的趋势，且曲线都在显著性水平内，表明冬季降水量无太大变化趋势(图 7(d))。由于 UF 和 UB 曲线存在多个交点，所以结合图 8(d)来看。由图中可以看出，冬季降水量在 1977 和 1988 年处超过了显著性水平线，而 UF 和 UB 曲线在 1988 年处存在交点。综上所述，冬季降水量在 1988 年发生突变，降水量突增。

4.3. 各季节降水周期变化

对九江市各季节的降水量进行小波分析得到降水序列的周期分析图。由图 9(a)可知，九江市 60a 春季降水量在 36a，19a 和 5a 的时间尺度上存在周期性。再由图 10(a)可知，降水变化的第一主周期是 36a，在该尺度下，降水的变化周期约为 23 年，降水经历了三个“少－多”的趋势，降水量最多的阶段在 2014 年左右，最少的年份在 2008 年。第二主周期是 19a，降水周期变化大概集中在 1995~2020 年，在该尺度下的降水周期为 12 年；第三主周期是 5a，在该尺度下的降水周期约为 4 年，降水变化周期短，整体的降水量变化不明显。

由图 9(b)可知，九江市夏季降水量存在 36a 的显著周期变化。其中，36a 为第一主周期，表现为 3 次明显的降水量“少－多”趋势变化(图 10(b))，降水周期为 23 年。

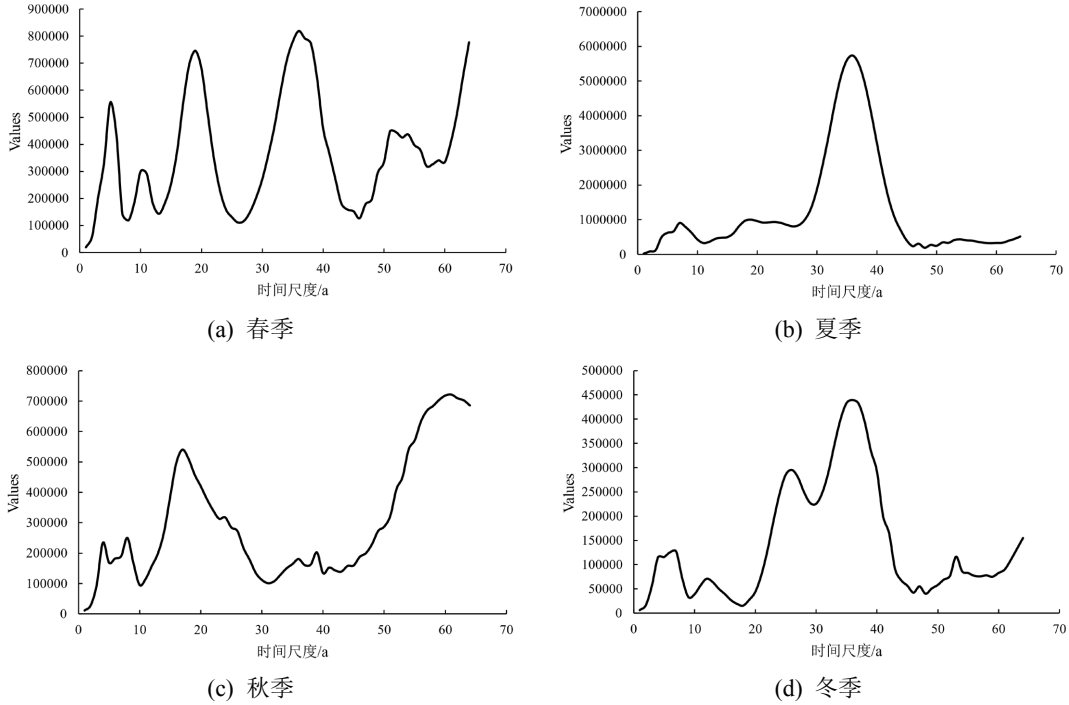

Figure 9. Analysis of variance of precipitation in each season
图 9. 各季节降水量方差分析

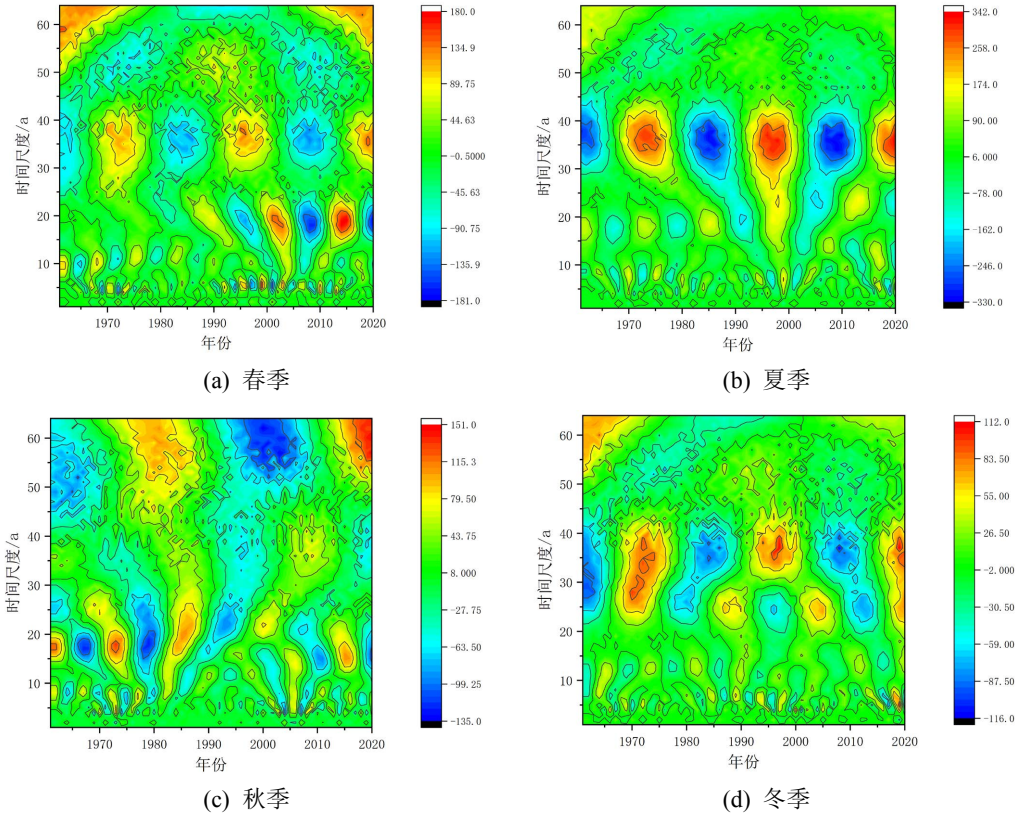

Figure 10. Real contour map of wavelet analysis of precipitation in each season
图 10. 各季节降水量小波分析实部等值线图

由图 9(c)可知，九江市秋季降水量存在 17a 的显著周期变化。17a 为第一主周期，在该尺度下的降水变化周期为 11 年，持续时间为 1960~2020 年，存在 5 次“多－少”的降水量变化(图 10(c))。

由图 9(d)可知，九江市冬季降水量存在 36a 和 26a 的显著周期变化。其中，36a 为第一主周期，该尺度下的降水变化周期为 24 年，表现为 3 次“少－多”降水量趋势交替(图 10(d))；26a 为第二主周期，该尺度下的降水变化周期为 17 年，持续时间约为 1960~1995 年，存在 3 次“少－多”的降水量变化，且第一次周期比第二次周期的降水量波动更明显。

4.4. 未来趋势分析

为了对九江市未来的降水趋势进行预测，本节利用重标极差分析法计算得到九江市年降水量和各季节降水量的 Hurst 指数并进行拟合优度检验，见表 1。由表 1 可知，年降水量和四季降水量的 Hurst 指数分别为 0.283，0.216，0.307，0.334 和 0.285。经过对数据的拟合优度的检验，发现 5 个 Hurst 指数的 R^2 分别为 0.802，0.703，0.845，0.849，0.805，以上数据均大于 0.7，绝大部分大于 0.8，说明拟合效果较好。由于 Hurst 指数均小于 0.5，所以年、季降水量均与当前降水量趋势呈相反趋势。其中，春季降水表现为降水增多趋势，年降水量及其他季节均表现为降水减少趋势[9]。

Table 1. Hurst index of precipitation and its future trend
表 1. 降水量 Hurst 指数及未来趋势

时间	年	春季	夏季	秋季	冬季
Hurst 指数	0.283	0.216	0.307	0.334	0.285
R^2	0.802	0.703	0.845	0.849	0.805
未来趋势	减少	增加	减少	减少	减少

5. 结论

本文利用 1961~2020 年九江市的年、季平均降水量，采用多种统计分析方法，对九江市近 60a 的降水量进行趋势、突变和周期分析。主要结论如下：

1) 九江市近 60a 的降水量呈明显上升趋势，降水倾向率为 32.86 mm/10a。四级降水量除春季降水量略有下降之外，夏、秋、冬季降水量均为上升趋势，降水倾向率分别为−1.02 mm/10a，18.73 mm/10a，1.61 mm/10a，11.71 mm/10a。

2) 在 0.05 的显著性水平下，对降水量进行突变分析，发现年降水量的突变点在 1969、1978 和 2012 年，其中 1969 与 2012 年发生降水量增长，1978 年降水量下降。春季与秋季降水无明显突变点，夏季降水的突变点发生在 1969 年，冬季降水的突变点发生在 1988 年，均为降水量增长现象。

3) 九江市年降水量和各季节降水量均存在明显的周期变化，两者的第一主周期均为 36a，在该尺度下的变化周期约为 23 年；四季降水量的第二主周期在 20a 左右，变化周期约为 12 年。

4) 九江市未来降水趋势整体表现为下降趋势。其中，春季降水量表现为降水增多趋势，年降水量及其他季节降水量均为减少趋势。

通过以上分析，可以更全面深入地了解九江市降水量的变化情况及未来趋势，为以后降水量变化的应对提供科学依据。

致　谢

感谢国家自然科学基金对本论文的支持，感谢给予引用的所有文章作者，感谢导师及同门在论文写

作中的帮助。

基金项目

国家自然科学基金(2081112000701)。

参考文献

[1] 陆晴, 闫冰, 赵东升. 1961-2016 年江西省气候时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 166-173.

[2] 王伟, 殷鹏. 九江市近 47 年来气候变化初步分析[C]//中国气象学会 2008 年年会气候变化分会场论文集. 2008: 466-470.

[3] 阙志萍, 吴凡, 吴菲菲, 等. 江西近 55 年秋季降水时空分布及异常环流特征分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(18): 103-115.

[4] 潘爱军, 田敬生. 1961-2018 年九江夏季降水的年际变化特征及其可能原因[J]. 气象与减灾研究, 2019, 42(2): 83-88.

[5] 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.

[6] 王国强. 1951 年-2019 年延安市安塞区降水时序变化特征分析[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021. https://doi.org/10.27409/d.cnki.gxbnu.2021.000939

[7] 宋扬, 熊俊松, 翟胜强, 等. 1961~2020 年四川省达州市降水变化特征分析[J]. 水利水电快报, 2023, 44(7): 15-20.

[8] 陈宏松, 何生录, 李兴, 等. 近六十年青海长江源区降水变化特征分析[J]. 青海环境, 2022, 32(4): 200-204+213.

[9] 吕姗姗. 1980 年-2016 年农安县降水变化特征分析[J]. 农业技术与装备, 2022(11): 120-123.