



引用格式:周明圆,刘君龙,许继军,等.近48年长江源区降水时空变化特征[J].科学技术与工程,2020,20(2):474-480

Zhou Mingyuan, Liu Junlong, Xu Jijun, et al. Spatial and temporal characteristics of precipitation in the source area of the Yangtze River in recent 48 years[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(2): 474-480

近48a长江源区降水时空变化特征

周明圆,刘君龙,许继军*,洪晓峰,袁喆

(长江水利委员会长江科学院水资源综合利用研究所,武汉430010)

摘要 基于1966—2013年长江源区及周边在内7个气象站点的逐日降水资料,采用降水倾向率、Mann-Kendall趋势检验、Morlet小波分析及Hurst指数法等方法,分析了长江源区近48年来降水量时间序列空间分布特征、年际和年内变化趋势以及其周期性变化特征,并对降水未来的演变趋势进行了预测。分析结果表明:①长江源区降水量存在明显的空间变化差异,总体分布趋势为由东南向西北递减;②近48年长江源区降水量呈现较为明显的增加趋势,增加速率为17 mm/10a,多年平均降水量为351.5 mm;③长江源区降水量年内分配极不均匀,主要集中在汛期,约占全年总降水量的89.6%,而非汛期降水量仅占10.4%,且降水量具有较明显的季节差异,夏季降水最大,秋季次之,其次是春季,冬季降水量最小;④长江源区降水量变化存在28 a左右的第一主周期,第二、三、四主周期分别为21 a、12 a和5 a;⑤长江源区各气象站点及全流域的Hurst指数均大于0.5,表明降水量未来趋势与过去一致,即其未来仍将延续降水量增加的变化趋势。

关键词 长江源区;降水;降水倾向率;Mann-Kendall趋势检验;Morlet小波分析;Hurst指数

中图分类号 P426.62; 文献标志码 A

Spatial and Temporal Characteristics of Precipitation in the Source Area of the Yangtze River in Recent 48 Years

ZHOU Ming-yuan, LIU Jun-long, XU Ji-jun*, HONG Xiao-feng, YUAN Zhe

(Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

[Abstract] Based on the daily precipitation data of seven meteorological stations in the source area of the Changjiang (Yangtze) River from 1966 to 2013, the spatial distribution characteristics, inter-annual and intra-annual variation trends and their periodic changes of precipitation time series in the source area of the river in recent 48 years were analyzed by using precipitation tendency rate, Mann-Kendall trend test, Morlet wavelet analysis and Hurst index method, and the future precipitation was projected. The results show as follows. ① There are obvious spatial variations in precipitation in the source area of the Yangtze River, and the overall distribution trend is decreasing from southeast to northwest. ② Precipitation in the source area of the Yangtze River show an obvious increasing trend in recent 48 years, with an increase rate of 17 mm/10a and an average annual precipitation of 351.5 m. ③ Precipitation distribution in the source area of the river is very uneven. About 89.6% of the total annual precipitation occurs in flood season, only 10.4% in non-flood season, showing obvious seasonal differences. Summer precipitation is the largest, followed by autumn, spring, and winter. ④ The precipitation changes in the source area of the river have the first main cycle of about 28 years, the second, third, and fourth main cycles are 21, 12, and 5 years, respectively. ⑤ The Hurst index of each meteorological station and the whole basin in the source area of the Yangtze River is greater than 0.5, indicating that the future trend of precipitation is consistent with the past one. Therefore, the trend of precipitation increase will continue in the near future.

[Key words] source area of the Yangtze River; precipitation; precipitation tendency rate; Mann-Kendall trend test; Morlet wavelet analysis; Hurst index

政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第5次气候变化评估报告指出,20世纪以来,全球大部分地区经历了以升温为主要特征的气候变化过程^[1-2]。在当前全球变暖的大背景下,中国不同区域气候特征都在发生剧

烈的变化,在各种气候要素中,降水量是衡量一个地区气候及其变化的关键指标之一^[3]。但受地形地貌、水汽输送途径等自然因素的影响,降水量的时空分布特征区域分异明显,因此,在特定区域展开有针对性的降水量变化特征研究,对于认识气候

收稿日期:2019-05-14; 修订日期:2019-08-29

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC1502404);国家自然科学基金(51709008)

第一作者:周明圆(1994—),女,硕士研究生。研究方向:水文水资源。E-mail:1085228970@qq.com。

*通信作者:许继军,男,博士,教授级高级工程师。E-mail:xujj07@163.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

变化下的区域水文循环及合理规划流域水资源具有重要意义,已成为气候变化研究的重要课题之一^[4]。

青藏高原是全球气候变化的驱动机与放大器^[5],从20世纪60年代以来增温显著。而长江源区深居青藏高原腹地是全球气候变化的前哨^[6],对气候变化非常敏感,其气候变化对于区域和全球气候变化具有重要的指示性意义^[7]。已有研究表明长江源区的气候水文要素发生了显著的变化^[8],且近来源区干旱、雪灾等自然灾害频繁发生,已对整个长江流域的生态系统和经济发展构成严重威胁^[9]。因此,多角度理解和认知气候变化条件下长江源区降水量时空变化特征,对进一步了解长江源区环境的响应是十分必要的。

现选取长江源区作为研究区域,以长江源区及周边地区在内的7个气象站点1966—2013年实测资料为基础,运用降水倾向率、Mann-Kendall趋势检验、Morlet小波分析及Hurst指数法,对长江源近48年降水的时空分布特征及其周期性变化特征进行详细分析,并预测其未来的演变趋势,研究结果不但有助于该区域合理开发与可持续利用水资源,同时也可以为未来气候变化条件下采取适应性的水资源保护措施提供科学依据。

1 研究区概况

长江源区(90°30′~97°10′E,32°30′~35°50′N)位于青海省南部,地处“世界屋脊”青藏高原腹地,直门达水文站以上流域面积 $13.77 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占中国三江源地区总面积的43.6%^[10]。长江源区地势西高东低,成北、西、南三面环山的盆谷地态势,平均海拔4000 m以上,属大陆性高原亚寒带和高原寒带,终年气候寒冷,年平均气温-5.3~3.3℃,月均正温期只有5个月(5—9月)^[11]。长江源区属高原亚寒带半湿润、半干旱区,年平均降水约为398 mm,是长江流域降水量最少的地区,年内降水时空分布不均,降水主要集中在汛期(5—9月),并以液态降水为主,占全年总降水量的80%以上,是长江源区气候比较湿润的时期,而非汛期(10月—翌年4月)由于气温相对较低,则主要以固态降水为主^[12]。长江源区流域位置如图1所示。

2 数据与方法

2.1 基本气象数据

研究所用实测降水量数据来自国家气象信息

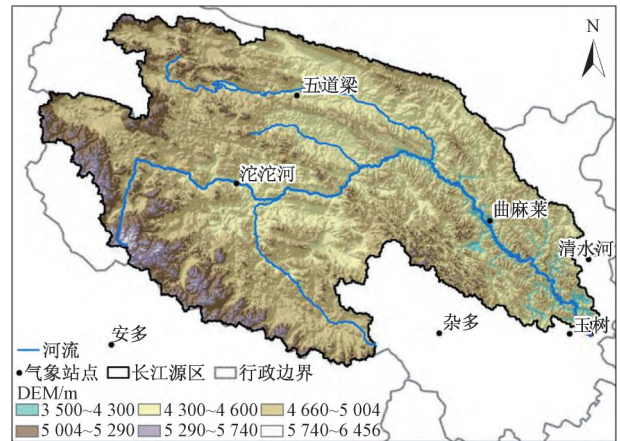


图1 长江源区及所选气象站点分布

Fig. 1 Distribution of Yangtze River source area and selected meteorological stations

中心气象资料室建立的中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(<http://cdc.cma.gov.cn/>)。由于长江源区范围内的气象站点较少,且各气象站点降水时间序列的起始年份不一,因此为保证时间序列的一致性和完整性,筛选了包含源区周边区域在内具有长期连续观测资料的7个气象站1966—2013年逐日降水数据作为本次研究的基础资料,整个长江源区面平均降雨量通过泰森多边形法求得。研究所选取的气象站点分布情况如图1所示。

2.2 研究方法

2.2.1 降水倾向率法

采用线性回归法来计算长江源区降水量演变趋势性,同时利用倾向率检验其演变趋势^[13],计算公式为

$$x = a + bt, t = 1966, 1967, \dots, 2016 \quad (1)$$

$$b = \frac{\sum_{t=1}^n tx_t - \frac{1}{n} \left(\sum_{t=1}^n x_t \right) \left(\sum_{t=1}^n t \right)}{\sum_{t=1}^n t^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{t=1}^n t \right)^2} \quad (2)$$

式中: x 为降水量要素; a 为截距; b 为倾向率,若 $b > 0$ 表示随时间增加降水量 x 呈增加趋势,若 $b < 0$ 则相反; n 为降水时间序列样本数。

2.2.2 Mann-Kendall法

Mann-Kendall法是一种常用来评估检测降水、气温、径流等各种水文气象要素时间序列的长期变化趋势的非参数统计检验法^[14-15],其优势是不需要样本遵循某种特定的分布,且也不受少数异常值的干扰,其计算过程简便,检测范围广,并且干扰度小、定量化程度较高^[16-17]。对于具有 n 个样本数的降水时间序列变量 x_1, x_2, \dots, x_n ,其Mann-Kendall检

验统计量 S 为^[18]

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sgn}(x_j - x_k) \quad (3)$$

式(3)中: $\text{Sgn}()$ 为阶跃函数,其计算式为

$$\text{Sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1, & x_j - x_k > 0 \\ 0, & x_j - x_k = 0 \\ -1, & x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (4)$$

S 近似符合标准正态分布,其均值为0,其方差的计算公式为

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

Mann-Kendall 统计量 Z 的计算公式为

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)}, & S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

在趋势性检验中,给定的置信度水平 α 上,若 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则原假设不成立,即 α 在置信度水平上,时间序列存在增加或较小趋势较为明显。当 $Z > 0$ 时,表示增加趋势,当 $Z < 0$ 时,表示减少趋势。当 $|Z| \geq 1.28$ 时,表示通过了信度 90% 的显著性趋势检验;当 $|Z| \geq 1.64$ 时,通过了信度 95% 的显著性趋势检验;当 $|Z| \geq 2.32$ 时,通过信度 99% 显著性趋势检验。

2.2.3 小波分析法

小波分析是一种信号的时间尺度分析方法,具有时频两域多分辨的功能^[19],较好的适应了水文气象序列多时间尺度的结构特征。小波分析不仅能够反映时间序列的局部变化规律,而且能清晰展现出隐藏在时间序列内部的精细结构^[20]。小波分析法作为一种高效的信号分析方法^[21],目前已被广泛应用于水文气象时间序列变化趋势和周期性特征等研究中^[22]。本次研究选用水文气象分析中应用较为广泛的 Morlet 小波对长江源区降水量时间序列进行周期性分析。

2.2.4 Hurst 指数法

Hurst 指数是对水文气象序列的未来变化趋势有较强预测能力的方法,本研究采用了 R/S 分析法来估算 Hurst 指数,其中 R 为极差, S 为标准差,其相关计算公式可参见文献^[23]。由于 Hurst 指数可以分析降水的长期记忆特征^[24],因此采用 Hurst 指数可以很好地揭示出水文序列中的趋势性成分,并且根据 Hurst 指数值的大小能判断趋势性的持续性或反持续性的强度,Hurst 指数的分级标准见表 1,其中等级 1~5 级和 -1~-5 级分别用来表示持续性强度和反持续性强度。

表 1 Hurst 指数分级标准

Table 1 Hurst index classification standard

等级	Hurst 指数 值阈	持续性 强度	等级	Hurst 指数 值阈	持续性 强度
1	0.50 < H ≤ 0.55	很弱	-1	0.45 ≤ H < 0.50	很弱
2	0.55 < H ≤ 0.65	较弱	-2	0.35 ≤ H < 0.45	较弱
3	0.65 < H ≤ 0.75	较强	-3	0.25 ≤ H < 0.35	较强
4	0.75 < H ≤ 0.80	强	-4	0.20 ≤ H < 0.25	强
5	0.80 < H < 1.00	很强	-5	0.00 ≤ H < 0.20	很强

3 结果与分析

3.1 降水空间分布

根据选取的长江源区及周边在内 7 个气象站 1966—2013 年的多年平均降水量,采用克里金法插值得到流域多年平均降水量空间分布情况,如图 2 所示。从图 2 中可以看出,长江源区降水量存在明显的空间变化差异,总体分布趋势为由东南向西北递减,从上游至下游逐渐增大。其中位于流域出口的直门达附近区域降水量最高,多年平均降水量在 500 mm 以上,沱沱河和五道梁周边的西北广大地区降水量最低,多年平均降水量不足 300 mm,两地之间的差值高达 200 mm,呈现出极强的空间异质性。上述长江源区降水量空间分布格局的形成,究其原因,是因为长江源区降水量的空间分布与水汽输送途径和源区地形地貌密切相关。

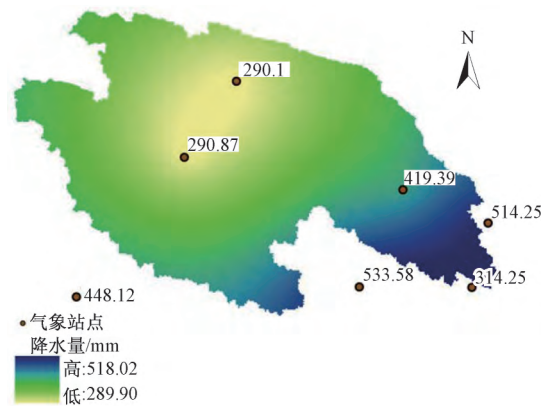


图 2 长江源区降水多年平均空间分布

Fig. 2 Multi-year average spatial distribution of precipitation in the source area of the Yangtze River

3.2 降水年际变化特征

图 3 为 1966—2013 年期间长江源区降水量年际变化过程情况,可以看出:近 48 年来长江源区降水量整体呈现出较为明显的增加趋势,年际变化倾向率为 17 mm/10a,其变化通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验;长江源区 1966—2013 年期间多年平均降水量为 351.5 mm,其中最大降水量年份为 2009 年,该年降水量达 503.04 mm,是研究时段内多年平均值

的1.43倍,1984年则达近48年来降水量的最低值239.2 mm;同时,由5 a滑动平均曲线可以看出,20世纪60年代初至90年代中期长江源区降水量变化相对较平稳,处于年际波动状态,基本在多年平均值附近波动,而90年代中期—2013年(近10 a)降水量则呈显著上升趋势,这可能与近年来长江源区气温显著增加导致区域水文循环加快存在一定的相关性^[11],此结果与王可丽等^[25]对黄河、长江源区降水变化的水汽输送研究结果基本吻合。

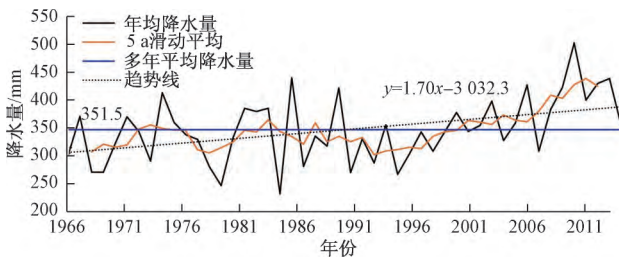


图3 1966—2013年长江源区降水量年际变化过程

Fig. 3 Interannual variation of precipitation in the source area of the Yangtze River from 1966 to 2013

3.3 降水年内分配及季节性特征

图4为长江源区降水量的年内分配过程,可以看出:长江源区年内降水分布曲线呈现出典型的“单峰形”,降水量年内分配极不均匀,主要集中在汛期,降水量为315.39 mm,约占全年总降水量的89.6%,而非汛期降水量仅为36.65 mm,约占全年总降水量的10.4%,不足汛期降水量的13%;其中年内降水量最大的月份为7月,月降水量达89.35 mm,约占全年降水量的25.38%,最小年内降水量出现在12月,降水量仅为1.54 mm,约占全年降水量的0.44%,比最大月降水量偏低98.3%。

由于长江源区降水主要集中在汛期,这也导致年内降水量的季节分配差别较大。四季中降水量分配比例最高的为夏季,降水量为232.80 mm,占全年总降水量的百分比高达66.13%,分别为春季降水量的5.48倍、秋季降水量的3.32倍和冬季降水量的34.69倍;其中,流域夏、冬两季降水量差距最大,秋季和春季次之,其主要原因在于长江源区水汽输送和水汽含量存在明显的季节性变化。具体而言,冬季在西北气流的控制下,虽然有一些水汽输送到高原腹地,但仍然是一年中水汽含量最少的

季节;春季西风开始减弱,气温开始逐渐回升,水汽含量也伴随着融冰蒸发而缓慢增加;夏季太平洋副热带高压北抬西伸,同时配合高原低压,将低纬度的湿热空气源源不断地输送到高原,使得空气中水汽含量迅速增加;秋季西风带逐渐南移,同时夏季风环流也南撤减弱,但此时空气中水汽含量较春季仍偏高^[10]。长江源区各季的多年平均降水量的具体数据见表2。

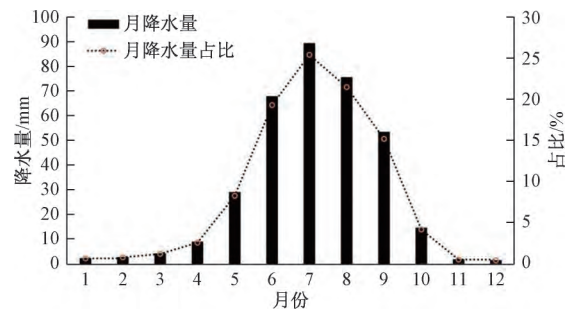


图4 长江源区降水量年内分配过程

Fig. 4 Annual distribution of precipitation in the source area of the Yangtze River

3.4 降水变化周期

小波变换实部等值线图可以清晰地显示降水量时间尺度变化及其位相结构,本研究采用泰森多边形法计算了长江源区的面降水量,利用Morlet小波并结合Matlab和surfer软件对流域降水量序列进行连续小波变换,从而得到长江源区降水小波变换实部等值线图,如图5所示。由图5可以看出,长江源区降水量具有不同尺度的周期性振荡特征,研究期内大致存在5 a和12 a左右的短周期性时间尺度,21 a和28 a左右的中长周期性时间尺度,且各振荡中心均呈现出正位相和负位相交替出现的现象,表明近48年内长江源区降水量存在偏少偏多的波动性变化。此外,从2013年后未闭合的小波变换实部等值线图来看,以5 a或28 a为周期,未来几年降水将会继续增加;以12 a或21 a为周期,未来降水则可能会减少。

小波方差反映信号波动的能量随时间尺度的分布,可由此判定降水在研究时间域中不同尺度扰动的相对强度和存在的主周期^[7]。研究区降水量的小波方差如图6所示,图6中显示2个明显的峰值,对应着的时间尺度分别为21 a和28 a,同时存在5 a和12 a两个次峰值。其中最大峰值为28 a,

表2 长江源区季节降水量年内分配统计

Table 2 Annual distribution statistics of seasonal precipitation in the source area of the Yangtze River

区域	春季(3—5月)		夏季(6—8月)		秋季(9—11月)		冬季(12月—翌年2月)	
	降水量/mm	比例/%	降水量/mm	比例/%	降水量/mm	比例/%	降水量/mm	比例/%
长江源区	42.50	12.07	232.80	66.13	70.03	19.89	6.71	1.91

说明 28 a 左右的周期振荡最强,可以认为是长江源区降水量的第一主周期;第二周期的峰值仅次于第一周期,对应的时间尺度为 21 a;12 a 时间尺度对应着第 3 峰值,为降水变化的第三周期;第 4 峰值对应着 5 a 的时间尺度,为第四主周期,这 4 个周期在长江源区近 48 a 降水量序列中起主要作用,其中 28 a 尺度最为显著,此结果进一步验证了小波实部时频图中主导周期的准确性。但由于受降水量序列长度时间尺度的制约,振荡周期和降水周期在更长的时间尺度下是否能够保持一致,需待后续进行更加深入的研究。

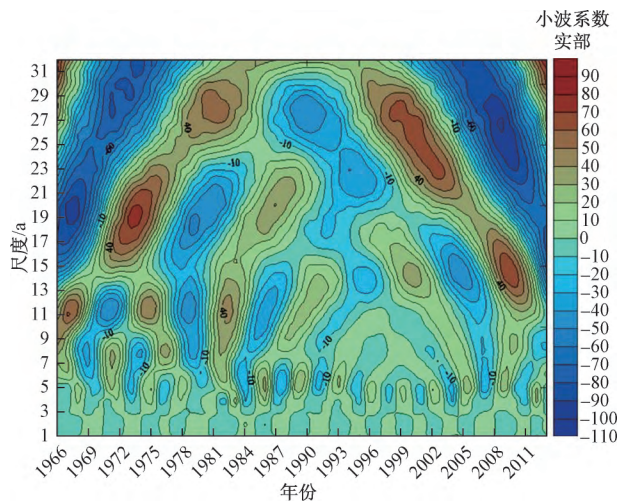


图 5 长江源区降水 Morlet 小波变换实部时频分布

Fig. 5 Morlet wavelet transform real part time-frequency distribution of precipitation in the source area of the Yangtze River

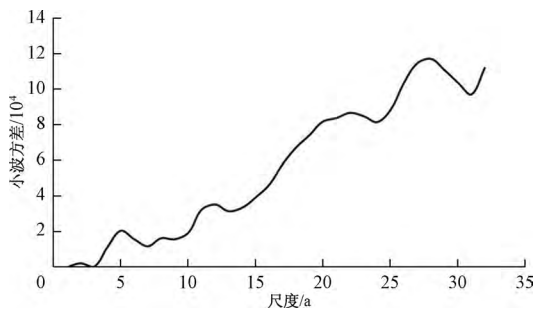


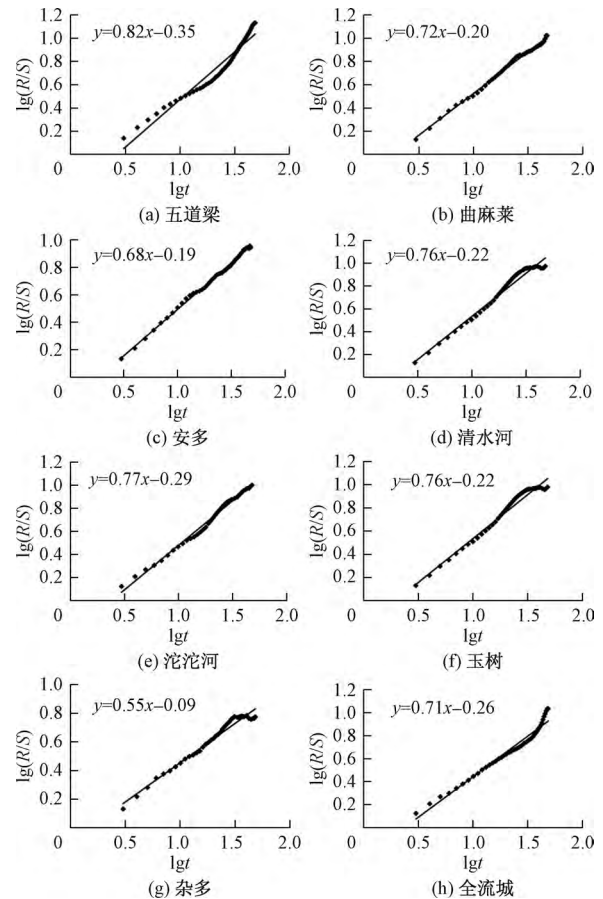
图 6 长江源区降水过程小波方差

Fig. 6 Wavelet variance of precipitation process in the source area of the Yangtze River

3.5 降水未来变化趋势

现利用 Hurst 指数来判断长江源区降水量序列是否存在持续性(或反持续性),结果,如图 7 和表 3 所示。可以看出:长江源区各气象站点及全流域的 Hurst 指数均大于 0.5,表明降水量未来变化趋势与过去一致,即其未来仍将延续降水量增加的变化趋势。除杂多站的 Hurst 指数为 0.55,仅表现出很弱的方向持续性外,其余站点都分别表现出很强、强

和较强的方向持续性。其中,五道梁气象站的 Hurst 指数高达 0.82,其持续性强度达到 5 级,说明方向的持续性很强;清水河、沱沱河和玉树 3 个气象站的 Hurst 指数介于 0.75~0.80,表明方向的持续性强;曲麻莱、安多站及全流域的 Hurst 指数 0.65~0.75,即方向的持续性较强。此结果与上述以 5 a 或 28 a 为周期时,小波分析得出的结论一致,同时也与刘光生等^[26]在对长江黄河源区气候变化的研究中得出长江源区降水量有增加趋势的结果相吻合。



R 为极差;S 为标准差;t 为任意整数,t ≥ 1

图 7 降水 Hurst 指数拟合

Fig. 7 Hurst index fitting of precipitation

4 结论

(1)长江源区降水存在较为明显的空间差异,总体分布趋势为由东南向西北递减,从上游至下游逐渐增大。其中,位于流域出口的直门达附近区域降水量最大,沱沱河和五道梁周边的西北广大地区降水量最低,变化差值高达 200 mm,呈现出极强的空间异质性,这与源区水汽输送途径和地形地貌密切相关。

(2)近 48 年长江源区降水呈现出较为明显的增加趋势,年际变化倾向率为 17 mm/10a,多年平均降

表3 长江源区各气象站点降水 Hurst 指数及其分级结果

Table 3 Hurst index of precipitation at meteorological stations in the source area of the Yangtze River and its grading results

站点	五道梁	曲麻莱	安多	清水河	沱沱河	玉树	杂多	全流域
Hurst 指数	0.82	0.72	0.68	0.76	0.77	0.76	0.55	0.71
持续性	很强(+)	较强(+)	较强(+)	强(+)	强(+)	强(+)	很弱(+)	较强(+)

注:(+)表示正向持续性。

水量为 351.5 mm;其中 20 世纪 60 年代初到 90 年代中期源区降水量变化相对较平稳,基本在多年平均值附近波动,而 90 年代中期到 2013 年降水量则呈显著上升趋势。

(3)长江源区降水量年内分配极不均匀,主要集中在汛期,约占全年总降水量的 89.6%,而非汛期降水量仅占 10.4%;其中,年内降水量最大和最小的月份分别出现在 7 月和 12 月,分别占全年总降水量的 25.38%和 0.44%;此外,降水量具有较明显的季节差异,降水量分配比例最高的为夏季,秋季次之,其次是春季,冬季降水量最小。

(4)长江源区降水时间序列存在多个周期,其中 28 a 为第一主周期,21 a、12 a 和 5 a 分别为第二、三、四主周期。

(5)长江源区各气象站点及全流域的 Hurst 指数均大于 0.5,表明降水量未来仍将延续增加的变化趋势。

由于长江源区地域辽阔,自然条件恶劣,目前该地区气象观测站点非常稀少,而高密度、长序列的气象监测数据又是研究降水量时间序列演变特征的基础,因此,如何在可能的条件下获取更为准确而又详实的降水量资料来分析其演变规律是亟待解决的问题。此外,研究仅基于实测历史资料来对降水量未来的演变趋势进行预测,但考虑到历史规律反映的是重现特性,不能完全指导未来降水的演变特征,因此,下一步研究将结合全球或区域气候模式作更加深入的研究。

参 考 文 献

- IPCC. Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report, climate change 2013: the physical science basis: summary for policymakers[M]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- 袁 喆, 许继军, 王永强, 等. 基于水热平衡的抚河流域地表径流长期预估[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(1): 60-67.
Yuan Zhe, Xu Jijun, Wang Yongqiang, et al. Long-term estimation of surface runoff in Fuhe River Basin based on water-heat balance [J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(1): 60-67.
- 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.
Bai Yingying, Zhang Yan, Gao Yanghua, et al. Regional differences in precipitation changes in the Sichuan Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(4): 478-484.
- 张志才, 陈 喜, 王 文, 等. 贵州降雨变化趋势与极值特征分析[J]. 地球与环境, 2007, 35(4): 351-356.
Zhang Zhicai, Chen Xi, Wang Wen, et al. Analysis on the change trend and extreme value of rainfall in Guizhou[J]. Earth and Environment, 2007, 35(4): 351-356.
- 潘保田, 李吉均, 朱俊杰, 等. 青藏高原: 全球气候变化的驱动机与放大器——II. 青藏高原隆起的基本过程[J]. 兰州大学学报, 1995(4): 160-167.
Pan Baotian, Li Jijun, Zhu Junjie, et al. Qinghai-Tibet plateau: drivers and amplifiers for global climate change—II. the basic process of the Qinghai-Tibet Plateau uplift[J]. Journal of Lanzhou University, 1995(4): 160-167.
- Immerzeel W W, Van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the asian water towers[J]. Science, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- 梁 川, 赵莉花, 张博雄. 长江江源高寒地区气候变化对水文环境影响研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 81-86.
Liang Chuan, Zhao Lihua, Zhang Boxiong. A summary of studies on the influence of climate change on hydrological environment in the cold region of the Yangtze River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1): 81-86.
- 韩 丽, 宋克超, 张文江, 等. 长江源头流域水文要素时空变化及对气候因子的响应[J]. 山地学报, 2017, 35(2): 129-141.
Han Li, Song Kechao, Zhang Wenjiang, et al. Temporal and spatial changes of hydrological factors in the source waters of the Yangtze River and their responses to climatic factors[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 35(2): 129-141.
- 王菊英, 丘玉俐. 长江源年径流量变化趋势分析[J]. 水利水电快报, 2008, 29(增刊1): 62-64, 67.
Wang Juying, Qiu Yuli. Analysis on the change trend of runoff in the source of the Yangtze River[J]. Express Water Resources & Hydro-power Information, 2008, 29(S1): 62-64, 67.
- 陈 进. 长江源区水循环机理探讨[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(4): 1-5.
Chen Jin. Discussion on the mechanism of water circulation in the source region of the Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(4): 1-5.
- 梁 川, 侯小波, 潘 妮. 长江源高寒区域降水和径流时空变化规律分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(1): 53-59.
Liang Chuan, Hou Xiaobo, Pan Ni. Discussion on the mechanism of water circulation in the source region of the Yangtze River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(1): 53-59.
- 詹 存, 梁 川, 赵 璐, 等. 基于云模型的江源区降雨时空分布特征分析[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(8): 23-28.
Zhan Cun, Liang Chuan, Zhao Lu, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of rainfall in source region of rivers based on cloud model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(8): 23-28.

投稿网址:www.stae.com.cn

- 13 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
Wei Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: Meteorological Press, 1999.
- 14 Mann H B. Non-parametric test against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- 15 Chong J, Li D, Gao Y, et al. Impact of climate variability and anthropogenic activity on streamflow in the Three Rivers Headwater Region, Tibetan Plateau, China[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2016, 129(1): 1-15.
- 16 简虹, 骆云中, 谢德体. 基于 Mann-Kendall 法和小波分析的降水变化特征研究——以重庆市沙坪坝区为例[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 36(4): 217-222.
Jan Hong, Luo Yunzhong, Xie Deti. Research on precipitation variation characteristics based on Mann-Kendall method and wavelet analysis: taking Shapingba District of Chongqing as an example[J]. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 2011, 36(4): 217-222.
- 17 魏永富, 崔英杰, 吴英杰. 基于 Mann-Kendall 法与草地分类的气候变化特征[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(24): 6-13.
Wei Yongfu, Cui Yingjie, Wu Yingjie. Climate change characteristics based on Mann-Kendall method and grassland classification[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(24): 6-13.
- 18 郭世兴, 刘斌, 王光社, 等. 基于 Mann-Kendall 法的汉江上游水沙趋势分析[J]. *水电能源科学*, 2015, 33(11): 140-142.
Guo Shixing, Liu Bin, Wang Guangshe, et al. Analysis of water and sediment trend in the upper reaches of Hanjiang River based on Mann-Kendall method[J]. *International Journal Hydroelectric Energy*, 2015, 33(11): 140-142.
- 19 张平, 夏军, 邹磊, 等. 近 50 年来淮河蚌埠以上流域降水时空变化特征分析[J]. *中国农村水利水电*, 2017(3): 1-8.
Zhang Ping, Xia Jun, Zou Lei, et al. Temporal and spatial variation characteristics of precipitation in the upper reaches of the Huaihe River Basin in the past 50 years[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(3): 1-8.
- 20 袁喆, 杨志勇, 郑晓东, 等. 近 50 年来淮河流域降水时空变化特征分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2012(2): 98-103.
Yuan Zhe, Yang Zhiyong, Zheng Xiaodong, et al. Temporal and spatial variation characteristics of precipitation in the Huaihe River Basin in the past 50 years[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2012(2): 98-103.
- 21 田莉娟, 薛丽芳, 杨慧, 等. 近 60 年来南四湖流域降水变化特征分析[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(2): 201-206.
Tian Lijuan, Xue Lifang, Yang Hui, et al. Analysis of precipitation variation characteristics in Nansihu Lake Basin in the past 60 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(2): 201-206.
- 22 Peng Y, Xia J, Zhang Y, et al. Temporal and spatial variations of precipitation in Northwest China during 1960 ~ 2013[J]. *Atmospheric Research*, 2017, 183: 283-295.
- 23 王孝礼, 胡宝清, 夏军. 水文时序趋势与变异点的 R/S 分析法[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2002(2): 10-12.
Wang Xiaoli, Hu Baoqing, Xia Jun. R/S analysis of hydrological time series trends and variability points[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2002(2): 10-12.
- 24 Jiang R, Wang Y, Xie J, et al. Multiscale characteristics of Jing-Jin-Ji's seasonal precipitation and their teleconnection with large-scale climate indices[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 137(1-2): 1495-1513.
- 25 王可丽, 程国栋, 丁永建, 等. 黄河、长江源区降水变化的水汽输送和环流特征[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(1): 8-14.
Wang Keli, Cheng Guodong, Ding Yongjian, et al. Water vapor transport and circulation features of precipitation changes in the source regions of the Yellow River and the Yangtze River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(1): 8-14.
- 26 刘光生, 王根绪, 胡宏昌, 等. 长江黄河源区近 45 年气候变化特征分析[J]. *资源科学*, 2010, 32(8): 1486-1492.
Liu Guangsheng, Wang Genxu, Hu Hongchang, et al. Analysis on the characteristics of climate change in the source region of the Yellow River in the Yangtze River in recent 45 years[J]. *Resources Science*, 2010, 32(8): 1486-1492.