



三江源地区19612019年降水量时空变化特征

蔡永祥 罗少辉 王军 祁栋林 胡馨月

Spatiotemporal variations in precipitation in the Three-River Headwater region from 1961 to 2019

CAI Yongxiang, LUO Shaohui, WANG Jun, QI Donglin, HU Xinyue

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0376>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三江源地区高寒草地地上生物量时空动态变化

Temporal and spatial dynamics of alpine grassland biomass in the Three-River Headwater Region

草业科学. 2018, 12(5): 956 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0500>

三江源1982-2012年草地植被覆盖度动态及其对气候变化的响应

Spatiotemporal dynamics of grassland coverage in response to climate change from 1982 to 2012 in the Three Rivers Source Region, China

草业科学. 2017, 11(10): 1977 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0619>

三江源地区可持续发展的生态足迹

Analysis on ecological footprint of sustainable development in Sanjiangyuan Region

草业科学. 2019, 36(1): 11 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0063>

三江源区高寒草原土壤湿度变化特征及与气候因子的关系

Alpine grassland soil moisture variation characteristics and its relationship with climate factors in Three River Source

草业科学. 2018, 12(1): 46 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0153>

新疆地区降水分布的空间插值方法比较

Comparison of spatial interpolation methods for precipitation distribution in Xinjiang region

草业科学. 2018, 12(3): 521 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0608>

三江源草地总生物量对未来气候变化的响应

The response of total grassland biomass in Sanjiangyuan to future climate change scenarios

草业科学. 2021, 38(5): 835 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0575>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0376

蔡永祥, 罗少辉, 王军, 祁栋林, 胡馨月. 三江源地区 1961–2019 年降水量时空变化特征. 草业科学, 2022, 39(1): 10-20.

CAI Y X, LUO S H, WANG J, QI D L, HU X Y. Spatiotemporal variations in precipitation in the Three-River Headwater region from 1961 to 2019. Pratacultural Science, 2022, 39(1): 10-20.

三江源地区 1961–2019 年降水量时空变化特征

蔡永祥¹, 罗少辉¹, 王军¹, 祁栋林¹, 胡馨月²

(1. 青海省气象灾害防御技术中心, 青海 西宁 810000; 2. 西宁市湟中区气象局, 青海 西宁 811600)

摘要: 利用三江源地区 13 个气象站 1961–2019 年共 59 年的降水量资料, 基于一元线性回归、滑动平均法、气候倾向率和重标极差分析等方法, 研究源区降水量的时空演变规律和未来变化趋势。结果表明: 三江源地区年均降水量为 470.7 mm, 并以 $10.31 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 的速率增加。黄河源区春季降水量最大, 其余三季以澜沧江源区最高, 长江源区四季均处于最低值; 各源区降水量均呈增加趋势, 其中春季降水倾向率最大, 长江、黄河和澜沧江源区分别为 2.69、2.11 和 $2.80 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 。1961–2002 年降水量累积距平大致呈下降趋势, 2003–2019 年呈上升趋势, 2002 年为降水增加突变点; 不同年代际间平均年最大和最小降水量出现在 2011–2019 和 1961–1970 年, 分别为 512.82 和 452.23 mm。年、季降水量自西北向东南递增, 黄河源区各站点降水量空间变化幅度最大; 春、夏、秋三季的降水倾向率呈现出由西北向东南减少的趋势, 但冬季变化相反, 且降水量少的源区降水增加趋势明显。降水量长程变化 Hurst 值大于 0.5, 预测未来降水量变化与过去趋势一致。三江源地区降水时间和空间序列变化具有明显的区域和季节差异性特征, 且未来降水呈增加趋势。

关键词: 三江源地区; 降水变化; 时间序列; 空间特征; 区域特征; 降水倾向率; 长程趋势

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2022)01-0010-11

Spatiotemporal variations in precipitation in the Three-River Headwater region from 1961 to 2019

CAI Yongxiang¹, LUO Shaohui¹, WANG Jun¹, QI Donglin¹, HU Xinyue²

(1. Lightning Disaster Center of Qinghai Province, Xining 810000, Qinghai, China;

2. Huangzhong District Meteorological Bureau, Xining 811600, Qinghai, China)

Abstract: This study analyzed the spatiotemporal pattern of precipitation and its future trends in the Three-River Headwater region using the linear regression, moving average, climate trend rate, and recalibration range methods with 59 years (1961–2019) of precipitation data. The data were taken from 13 meteorological stations in the Three-River Headwater region. The results indicated that the average annual precipitation was 470.7 mm in this region and had an increasing trend of $10.31 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$. The Yellow River had the highest precipitation in spring, the Lancang River had the highest precipitation in the other three seasons, and the Yangtze River had the lowest precipitation in all four seasons. Precipitation in all source regions showed an increasing trend, and the greatest climatic trends in the rate of precipitation, which was seen in spring, were 2.69, 2.11, and $2.80 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ for the Yangtze, Yellow, and Lancang rivers, respectively. The cumulative precipitation anomaly showed decreasing trends from 1961 to 2002 and an increasing trend from 2003 to 2019. Catastrophic precipitation occurred in 2002. The average annual minimum and maximum precipitation in different years occurred in the periods 1961–1970 and

收稿日期: 2021-06-22 接受日期: 2021-09-15

基金项目: 青海省雷电监测网定位精度和探测效率基础研究 (2019-ZJ-7098)

第一作者: 蔡永祥 (1975-), 男, 青海西宁人, 工程师, 本科, 主要从事气象灾害防御研究。E-mail: 8202025@qq.com

通信作者: 罗少辉 (1986-), 男, 河南临颖人, 工程师, 硕士, 主要从事气象灾害防御研究。E-mail: 948347792@qq.com

2011–2019 年分别为 452.23 和 512.82 mm, 分别。年降水量和季节降水量从西北到东南增加, 且空间降水变率最大在黄河源区。春季、夏季和秋季降水率的变化趋势从西北到东南减弱, 但冬季相反; 这说明了在降水少的源区降水增加强烈。长期降水变化的 Hurst 值大于 0.5, 说明未来降水变化趋势与过去一致。三江源地区降水存在明显的时空变化特征, 未来降水将呈现增加趋势。

Keywords: Three-River Headwater region; precipitation changes; time series; regional features; characteristics of spatial variations; precipitation trends; long-term trend

Corresponding author: LUO Shaohui E-mail: 948347792@qq.com

三江源地区是我国重要的淡水之源, 其独特的生态环境, 营造出独有的高海拔、大面积湿地生态系统^[1]。源区生态环境的优劣影响青海省的国民经济发展, 也严重制约着江河中下游广大地区乃至全国的社会经济发展^[2]。同时, 三江源区拥有极脆弱的自然生态系统, 是东亚甚至全球气候变化的“启动区”和“敏感区”^[3-4]。受全球变暖影响, 中国气候不同年代间也在发生显著变化。研究表明, 1956–2004 年, 三江源区降水量以 $6.73 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 的幅度减少, 降水日数也呈现减少趋势^[5], 但降水强度增加; 1960–2010 年降水量总体却表现为增加态势, 不同源区季节降水量也存在显著差异^[6]; 1961–2012 年中国区域平均降水呈减少趋势, 而高海拔地区呈增加趋势^[7]。青藏高原气候自 1960 年至 80 年代中后期, 为相对暖干时期, 80 年代后期变为相对暖湿时期^[8], 而三江源区气候于 1990 年后趋于湿润化^[9]。上述结果的差异可能受选取序列长短、观测台站数量和研究方法等因素的影响, 对三江源地区降水量更长序列的时空演变特征与区域分布的多方法集成分析尚待进一步精准辨识。近些年来, 人类活动和极端气候出现频率的增加, 深刻影响了源区生态环境。其中, 降水量的变化对三江源区生态环境和社会经济等诸多方面产生的影响尤为显著^[10]。因此, 研究更长序列的降水量时空演变特征、诊断降水序列突变点、辨识源区年、季降水量的变化趋势, 能够反映三江源区生态环境对气候变化的响应。本研究基于线性回归、气候倾向率和重标极差分析等方法, 运用最新的降水资料研究源区降水时空特征差异及未来变化趋势, 可为三江源地区水资源可持续利用和生态系统的脆弱性研究提供科学依据, 也为预测源区乃至全国的未来气候变化提供参考。

1 材料和方法

1.1 三江源区概况及资料来源

三江源流域是长江、澜沧江和黄河源头区, 地处青藏高原腹地, 位于 $31^{\circ}39' \sim 36^{\circ}16' \text{N}$ 和 $89^{\circ}24' \sim 102^{\circ}23' \text{E}$, 海拔为 3 450~6 621 m, 流域面积为 36 万 km^2 ^[11], 为典型的高原大陆性气候。中国气象局在该地区现设气象台站 19 个, 受各台站建站时间及个别台站迁站影响, 有些台站气象数据不连续。为获取连续长时间序列气象数据, 将缺测 10 年以上的台站剔除, 最终本研究数据选用位于该区域的 13 个气象台站 (图 1)。本研究采用唐敏等^[4]的区域划分方法, 将三江源源区细划分为长江源区 (包括曲麻莱、玉树、五道梁、清水河和沱沱河 5 个站点), 澜沧江源区 (包括囊谦和杂多 2 个站点), 黄河源区 (包括兴海、达日、玛多、久治、玛沁和泽库 6 个站点)。降水量观测数据的时间跨度为 59 年 (1961–2019 年), 为保证降水资料的稳定和均一性, 所有数据经过时间一致性检验和极值检验。对于个别台站的缺测值, 以缺测时刻前后相邻时段的价值进行线性回归插值代替, 且通过了 0.01 水平的显著性检验。

1.2 数据处理方法

采用气象学上的标准进行季节划分: 3 月–5 月为春季, 6 月–8 月为夏季, 9 月–11 月为秋季, 12 月份–翌年 2 月为冬季。采用一元线性回归和滑动平均法, 拟合三江源流域及各源区降水序列年际、季节和月际变化趋势。序列相对于时间变化的相关性变动通过线性回归进行求解^[12]。滑动平均采用低通滤波的方式来确定变化趋势, 时间周期选为 5 年。采用变异系数和累积距平来衡量三江源地区

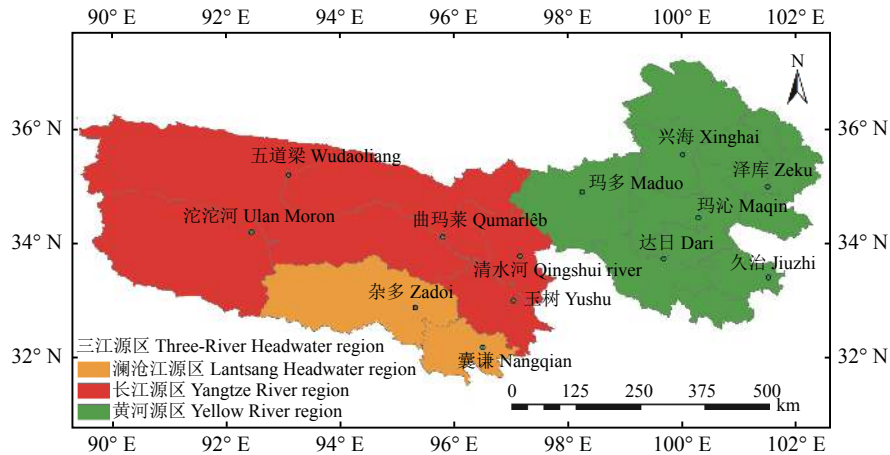


图 1 三江源区气象站点的地理位置分布

Figure 1 Distribution of meteorological stations across the Three-River Headwater region

降水数据波动特征^[13], 累积距平分析可通过距平累积值变动情况, 直观判断序列突变点。

累积距平计算公式为^[14]:

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^l (x_i - \bar{x})$$

式中: x_i 为某一年或年代的降水量, \bar{x} 为某一时段内的平均降水量。各年份累积距平值计算后, 绘制曲线, 从其起伏状况判断降水量长期演变趋势, 呈上升趋势, 表示增加, 反之减少。

运用重标极差分析计算 H 值 (Hurst 指数), 预测未来三江源地区降水量变化情形^[15-16]。考虑一个时间序列, 对于任意正整数 $\tau \geq 1$, H 值可根据计算出的 τ 值和极差/标准差的比值, 在双坐标系 ($\ln\tau, \ln R/S$) 中用最小二乘法拟合式 $R/S \propto \tau^H$ 得到, 根据该原理可由 Matlab 语言直接输出 H 值。计算相对简单, 其值可以有效探索非线性系统趋势变化。H 值为 0.5 表示降水序列有随机性不存在趋势变动, 且数据相互独立; $0 \leq H < 0.5$ 表明具有反持续性的序列变化, 即未来降水变化与过去相反; $0.5 < H \leq 1$ 表示正持续性。

1.3 数据统计与作图

降水量和降水日数原数据采用 Microsoft Excel 2010 进行预处理, 变异系数和趋势显著性检验采用 SAS 9.0 (SAS Institute, Cary, NC, 2010) 软件分析, 用最小差异显著法进行多重比较, 并进行 $P \leq 0.05$ 水平的差异显著性分析及方差分析。在 ArcGIS (Esri, Arcgis Server 10.2) 下通过反距离加权插值法绘制降

水量的空间分布图, 进行流域各季节降水量和年降水量的空间差异分析, 并采用 SigmaPlot 10.0 (MMIV Systat Software, Inc., San Jose, CA) 绘制图。

2 结果与分析

2.1 三江源地区降水量季节变化特征

近 59 年三江源区降水量季节变化较大, 降水主要集中在夏、秋两季, 冬季最少, 四季的降水量均呈上升趋势 (图 2)。具体而言, 春季的平均降水量为 76.3 mm, 远低于夏季 (281.0 mm) 和秋季 (103.2 mm), 但是春季降水倾向率最大, 达到 $5.27 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$, 且通过了 $P < 0.05$ 显著性水平检验, 夏季、秋季、冬季均未通过 $P < 0.05$ 显著性水平检验; 历年春季降水波动幅度相比其他三季比较平稳, 1995 年之前, 除 1989 年降水出现峰值 (104.8 mm), 其余年份基本低于平均值, 1966 年仅为 45.9 mm, 为历年最低值, 但自 1997 年始, 降水呈增加趋势, 基本在平均值以上。夏季的最大和最小值出现在 2012 年和 1978 年, 极差为 113.1 mm, 且年份之间浮动频率较大。秋季历年间多寡交替变化显著 ($P < 0.05$), 而冬季降水量最低, 平均为 10.2 mm, 最小年份降水量仅为 2.7 mm (1962 年)。

各源区降水集中在夏、秋两季, 不同源区之间的降水略有差异, 黄河源区春季降水量最大, 其余三季以澜沧江源区最高, 而长江源区四季基本均处于最低值 (图 3)。长江源区、黄河源区和澜沧江源区春季的平均降水量分别为 58.89、91.52 和 76.23 mm, 仅比冬季高, 但是该季节降水倾向率最大 (表 1), 尤

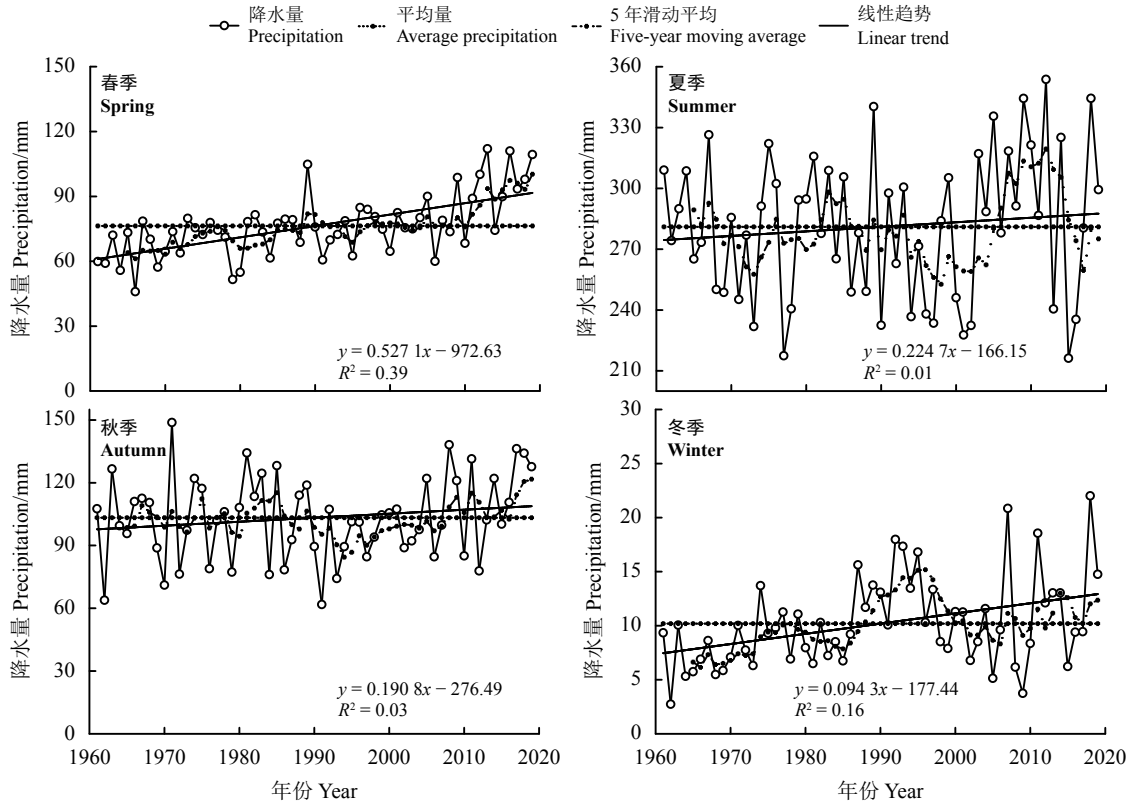


图 2 三江源流域 1961-2019 年降水的季节变化

Figure 2 Seasonal variation in precipitation in the Three-River Headwater region during the period 1961-2019

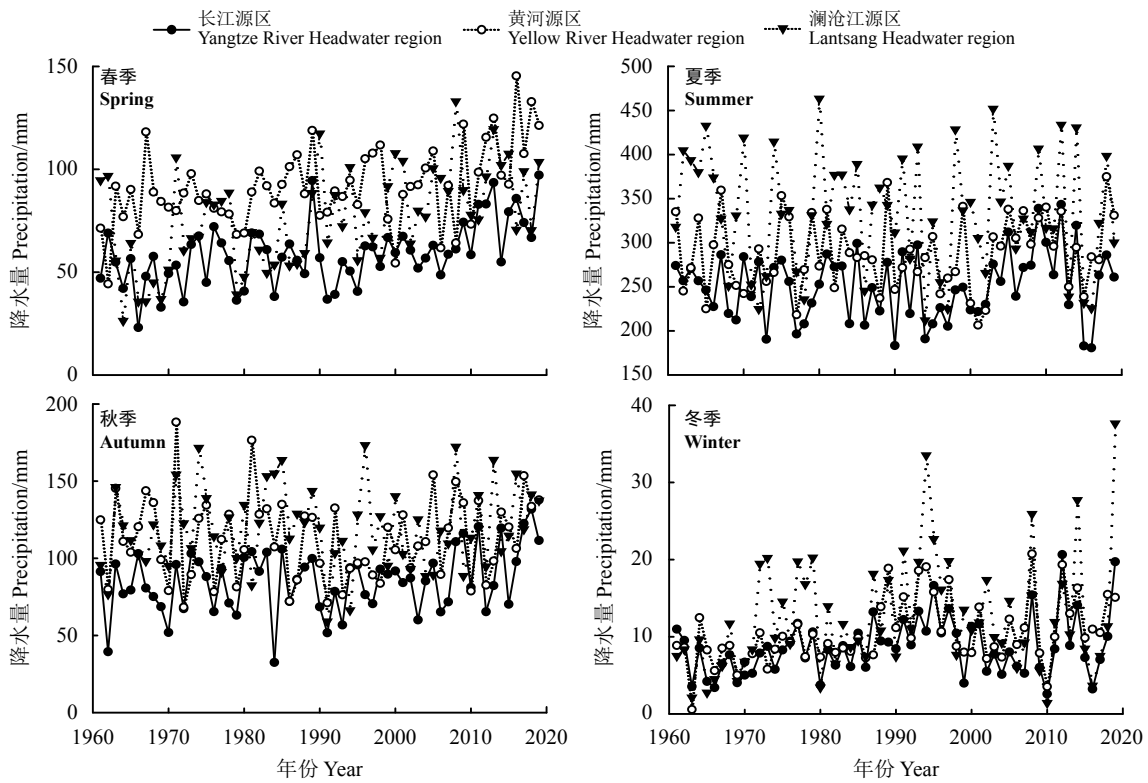


图 3 三江源区 1961-2019 年降水的季节变化

Figure 3 Seasonal precipitation in the Three-River Headwater region during 1961-2019

其是长江和澜沧江源区达到了 2.69 和 $2.80 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ，增湿现象最显著 ($P < 0.05$)。夏季 3 个源区历年的降水量多寡交替出现，变化趋势基本一致，降水量最大的澜沧江源区达到了 333.62 mm ，但是夏季降水倾向率为四季最低的季节。长江源区秋季平均降水量为 85.51 mm ，黄河和澜沧江源区平均降水量分别为 113.18 和 119.03 mm ，且呈不显著上升趋势 ($P > 0.05$)，降水倾向率仅为 0.01 和 $0.09 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 。冬季 3 个源区的平均降水量分别为 8.7 、 10.47 和 12.53 mm ，降水增速最大的年份为 2016 – 2019 年，其中仅黄河源区通过了显著性水平检验 ($P < 0.05$)。

表 1 长江源区、黄河源区和澜沧江源区季节降水倾向率
Table 1 Climatic trends in the rate of seasonal precipitation in the Yangtze River, Yellow River, and Lantsang Headwater region during the period 1961–2019

源区 Region	季节 Season			
	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
长江源区 Yangtze River region	2.69	0.14	0.95	0.82
黄河源区 Yellow River region	2.11	0.21	0.01	1.81
澜沧江源区 Lantsang Headwater region	2.80	0.09	0.09	0.64

2.2 三江源地区降水量年份变化特征

三江源区 1961–2019 年平均降水量为 470.7 mm ，

多寡交替的波动状变化明显 (图 4)，降水倾向率为 $10.31 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ，呈现上升的趋势。M-K 检测结果表明，年份降水量在 95% 置信区间未通过显著性检验，年份降水系列变化趋势不显著 ($P > 0.05$)。降水量的最大和最小值年份出现在 1969 和 2018 年，分别为 399.3 和 589.1 mm ，极差值为 189.8 mm ，为平均降水量的 40.2%，年际间振幅变化较大。1961–1966 年降水量波动较小，在 1967 年显著增加，随后呈波动下降趋势；1971–1989 年波动幅度较大，1990–2005 年降水量小于平均值 (除 1999 和 2003 年)，自 2005 年之后呈波动上升趋势。1961–2002 年降水量累积距平大致呈下降趋势，2003–2019 年呈上升趋势，2002 年为降水增加突变点。

不同源区年均降水量由多到少依次为澜沧江源区、黄河源区和长江源区，多年平均降水量分别为 541.4 、 503.2 和 404.4 mm (图 5)。长江源区最大和最小降水量出现在 1984 年 (289.9 mm) 和 2009 年 (535.3 mm)，极差为 250.4 mm ，属于相对少雨地区，但是该源区的降水倾向率达到 $11.6 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ，高于黄河源区 ($10.1 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$) 和澜沧江源区 ($6.3 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$)，增湿效应显著 ($P < 0.05$)。黄河源区最大和最小降水量分别为 378.0 mm (1962 年) 和 656.9 mm (2019 年)，极差 278.9 mm ，而澜沧江源区降水量多寡交替现象最为显著 ($P < 0.05$)。从累积距平上来看，1961–1966 年澜沧江源区降水量显著上升 ($P < 0.05$)，随后下降，而黄河源区和长江源区则变动振幅相对较小，自 1966 年后，各源区变化趋势基本一致，1967–1973 年

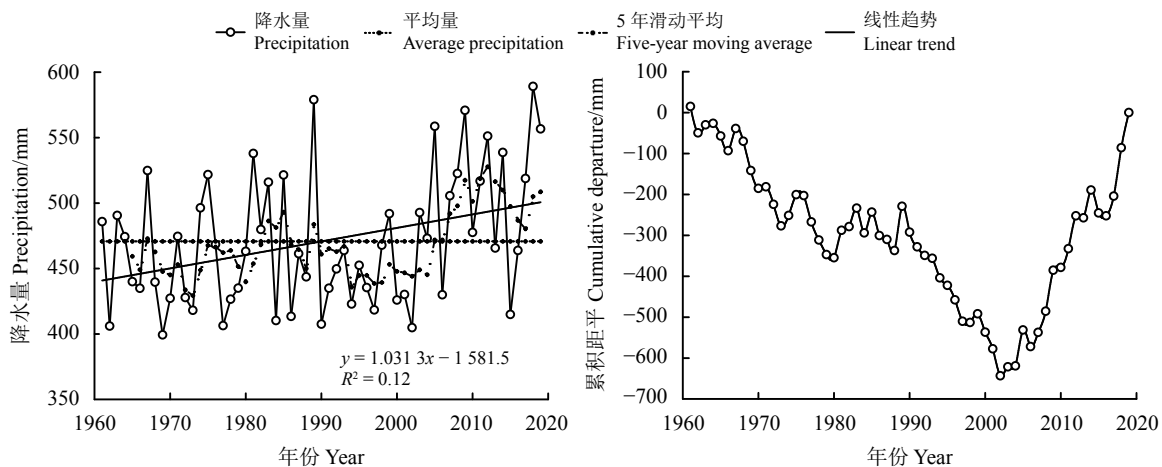


图 4 三江源区 1961–2019 年降水量的年份变化及其累积距平

Figure 4 Interannual variation in precipitation and the cumulative change therefrom during the period 1961–2019 in the Three-River Headwater region

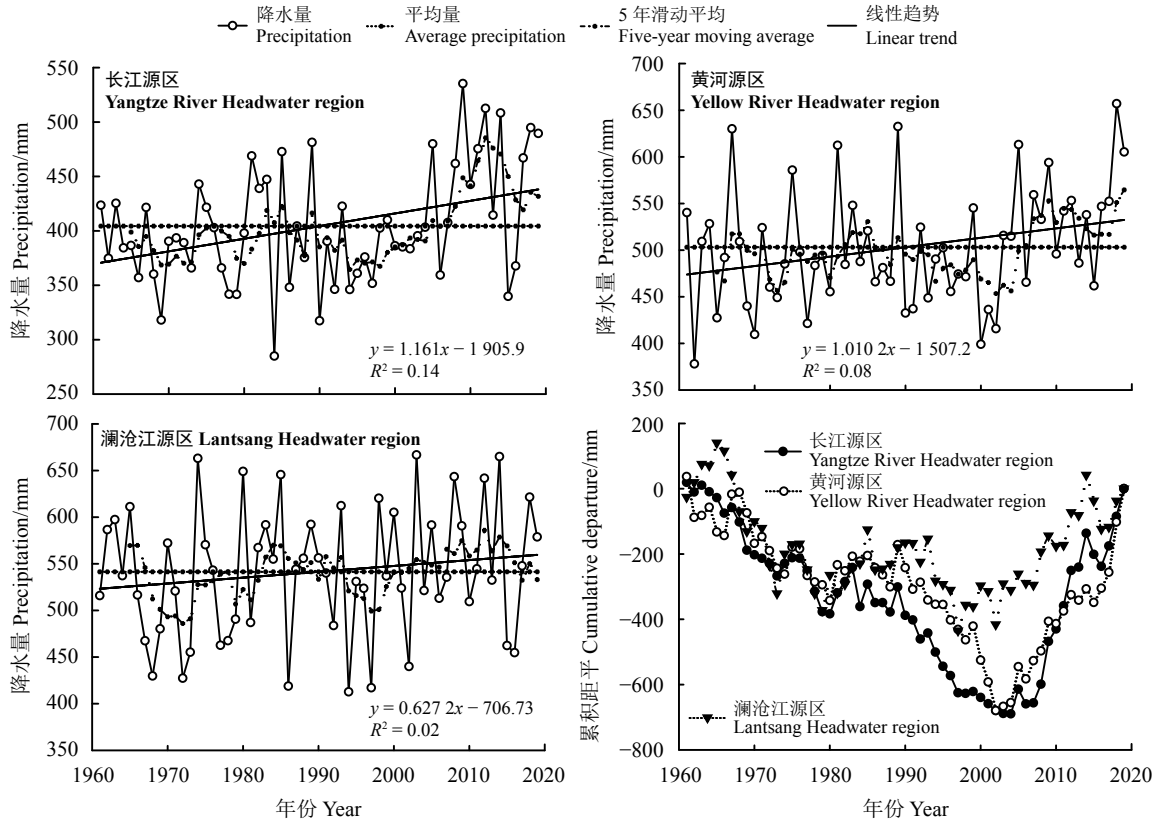


图 5 三江源区历年降水量变化和累积距平

Figure 5 Annual precipitation levels and the cumulative departure thereof of the Three-River Headwater region

下降, 1974–1976 年短暂上升后又下降, 1979 年出现低谷值, 1980–1985 年降水量增多, 90 年代初到 21 世纪初期则明显减少, 之后呈现逐渐上升的趋势。

2.3 三江源地区降水量的年代际变化特征

三江源流域每 10 年的降水量呈现波动变化 (表 2), 自 1960–1990 年降水量呈上升趋势, 在 1991–2000 年下降, 随后又上升, 在 2011–2019 年达到了最大值 512.82 mm, 增湿现象显著。春、秋两季的年代际降水量变化与全年趋势一致; 而夏季则为上升、下降交替出现的趋势, 最大降水量在 2001–2010 年达到 295.45 mm; 冬季在 1960–1990 年表现为上升, 2001–2010 年下降, 随后又上升至 13.17 mm。

2.4 三江源地区降水量空间变化特征

三江源流域 1961–2019 年降水量变化的空间分布 (图 6), 源区降水量表现出显著的空间差异, 大致呈现出自东南向西北减少的趋势。东南部地区的久治降水量最大, 达到 751.0 mm, 是三江源平均降水量的 1.6 倍; 其次为南部的囊谦 (538.7 mm) 和杂多地区 (536.9 mm); 而西北地区的五道梁和沱沱河仅

表 2 三江源区 1961–2019 年的年代际降水量
Table 2 Chronological characteristics of precipitation during the period 1961–2019 in the Three-River Headwater region

年份 Year	时段 Time				
	全年 Year	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
1961–1970	452.23	63.63	283.11	98.67	6.71
1971–1980	453.77	69.49	271.63	103.36	9.40
1981–1990	477.00	78.04	282.20	106.97	10.26
1991–2000	446.30	73.28	267.60	92.36	12.70
2001–2010	486.56	78.25	295.45	103.62	9.20
2011–2019	512.82	97.44	286.85	115.79	13.17

为 299.9 和 295.8 mm; 黄河源区各站点降水量变化幅度最大, 在 327.6~751.0 mm。

三江源区不同季节的降水倾向率在空间上差异较大 (图 7), 但不同源区各站点降水量均呈现增加的趋势, 且春、冬两季的增加量大于秋、夏两季。春季降水倾向率表现为澜沧江源区 > 长江源区 > 黄

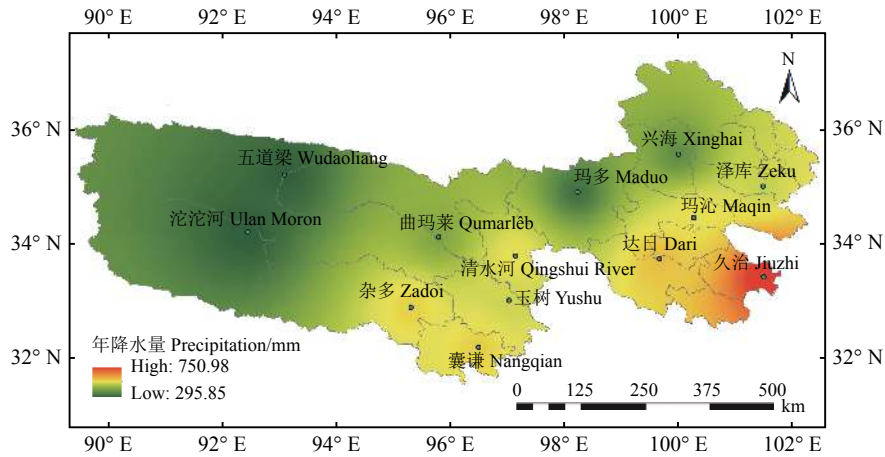


图 6 三江源区 1961–2019 年降水量的空间特征

Figure 6 Spatial characteristics of interannual precipitation during the period 1961–2019 in the Three-River Headwater region

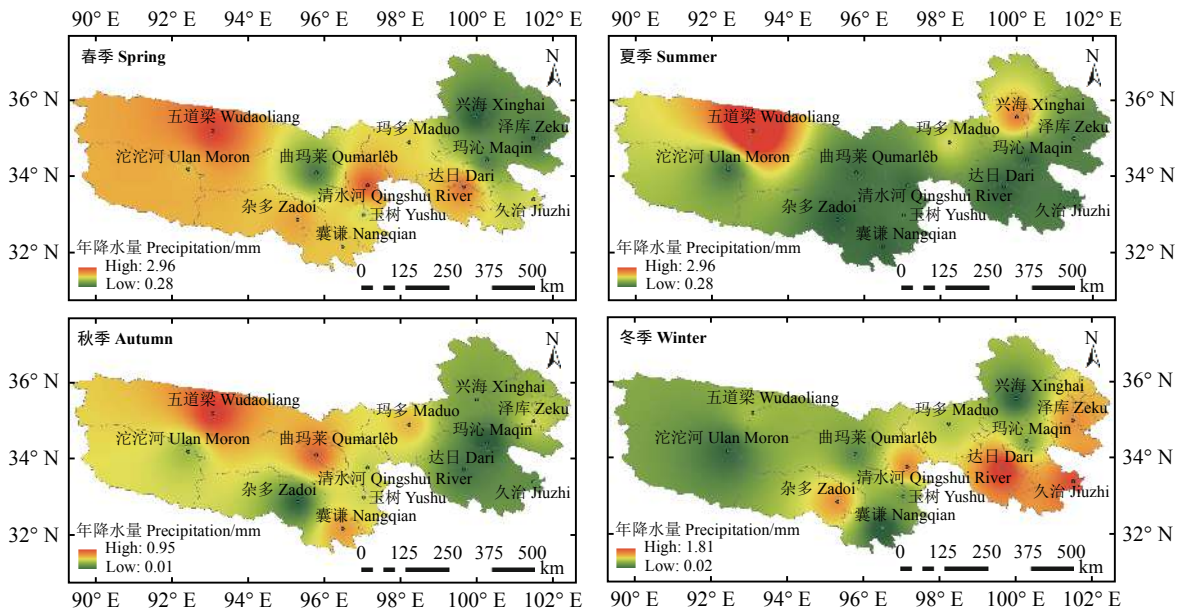


图 7 三江源区 1961–2019 年降水倾向率的四季变化空间特征

Figure 7 Spatial characteristics of seasonal precipitation in the Three-River Headwater region during the period 1961–2019

河源区,最大和最小值分别为五道梁 ($2.97 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$) 与兴海 ($0.28 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$),曲麻莱站点降水倾向率为 $0.57 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$,为长江源区最低站点,达日站点降水倾向率为 $2.52 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$,为黄河源区最高站点。夏、秋两季的降水倾向率表现为由西北向东南减少的趋势,降水增加量夏季小于秋季,但最大值均出现在五道梁地区。冬季降水量变化的空间分布与其他三季相反,由西北向东南增加,黄河源区降水倾向率最大。

2.5 三江源地区降水日数变化特征

三江源流域年均降水日数为 139.61 d,变异系

数为 0.07,呈不显著性降低趋势 ($P > 0.05$),降水日数倾向率为 $-0.01 \text{ d} \cdot 10^{-1}$ (表 3);降水日数以夏天最多,冬天最少,整体上春、冬两季呈上升趋势,尤其是春天降水日数倾向率最大,达到 $0.67 \text{ d} \cdot 10^{-1}$,夏、秋两季逐渐减少。长江源区降水日数小于三江源流域平均值,澜沧江源区最大 (144.12 d),且该区降水日数倾向率也最大,为 $1.27 \text{ d} \cdot 10^{-1}$,黄河源区变异系数为 0.1,降水日数呈减少趋势。

2.6 三江源地区降水量变化的未来趋势预测

运用重标极差分析法对三江源流域近 59 年的年际和季节降水量的 Hurst 值进行计算 (图 8)。三江

表 3 三江源区 1961–2019 年降水日数变化特征

Table 3 Change in the characteristics of precipitation days during the period 1961–2019 in the Three-River Headwater region

地域 Site	时段 Time	平均日数 Mean days/d	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	降水日数倾向率 Rates of climatic trends/(d·10 a ⁻¹)
三江源流域 Three-River Headwater region	全年 Year	139.61	10.16	0.07	-0.01
	春 Spring	34.20	4.08	0.12	0.67
	夏 Summer	58.73	5.09	0.09	-0.85
	秋 Autumn	34.02	4.55	0.13	-0.09
	冬 Winter	12.68	3.86	0.30	0.27
长江源区 Yangtze River region	全年 Year	134.99	15.49	0.12	0.45
澜沧江源区 Lantsang Headwater region	全年 Year	144.12	12.91	0.09	1.27
黄河源区 Yellow River region	全年 Year	141.76	14.22	0.10	-0.17

源流域年份 Hurst 值为 0.701 2, 四季中最高值为冬季, 达到 0.735 4, 最低值出现在春季, Hurst 值为 0.632 4。各源区年份 Hurst 值表现为长江源区 < 黄河源区 < 澜沧江源区, 春、夏季长江源区 Hurst 值最大, 而秋、冬季 Hurst 值最大分别出现在澜沧江源区和黄河源区, 但是所有值均大于 0.5, 具有显著 Hurst 现象, 表现为正持续性, 未来降水变化呈增加趋势。

候变化的关键区和敏感区, 对全球气候有重要的影响和指示作用^[19-20]。本研究发现 1961–2019 年三江源地区降水量以 10.31 mm·10 a⁻¹ 的速率增加, 这与 Deng 等^[21] 研究结果一致, 表明近年来三江源区暖湿化增强, 并且 2002 年降水量年份累积距平达到最低值, 随后距平值上升, 表明 2002 年为降水增加突变点; 但是这与唐红玉等^[5] 得出的三江源区降水量以 6.73 mm·10 a⁻¹ 的幅度减少的结论相反。降水变化特征存在差异是由于采用的降水数据系列长短不同造成的^[22], 唐红玉等^[5] 的数据年代为 1956–2004 年, 而 2002 年为降水增加突变点, 2003–2019 年降水量累积距平逐渐上升, 增湿显著。因此本研究更能反映近期三江源区对全球气候变化的响应趋势。三江源地区草地面积占我国草地总面积的 30%, 草地植被深刻影响着源区生态系统平衡^[23], 降水量变化趋势的研究, 可为牧草地的合理布局提供理论基础。

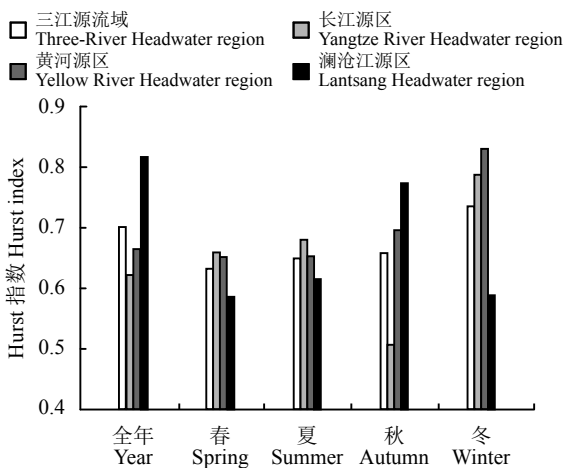


图 8 三江源区年际和季节降水量的 Hurst 指数

Figure 8 Hurst indexes of yearly and seasonal precipitation in the Three-River Headwater region

3 讨论

3.1 三江源地区 1961–2019 年降水量的变化特征

降水时空演变反映区域气候与生态环境变动, 可指导人类的生活生产^[17-18]。三江源地区是全球气

受经纬度、地形起伏和不同季风环流的交替等因素影响, 降水量呈现出明显差异且变化复杂的区域特性^[24]。不同源区降水量由小到大表现为长江源区、黄河源区和澜沧江源区, 降水与海拔呈反比关系, 但不表现为线性相关, 这与强安丰等^[13] 研究结果类似。不同源区降水量多寡交替现象显著, 年极差均超 250 mm, 大于源区平均年降水量 (470.7 mm) 的 50%, 尤其是 2002 年之后, 降水整体增多, 但极差现象也表现出显著趋势。由于受南方涛动–厄尔尼诺与北大西洋涛动因素综合影响, 自西南方向输送

的水汽在近 30 年增强,引起更多的降水^[25],也造成了三江源区极端降水年际波动剧烈^[26]。三江源区降水主要集中在夏、秋两季,春、冬季较少,具有典型的高原大陆性气候特征;春季平均降水量为 76.3 mm,仅较冬季降水量高,但是春季降水倾向率达到 $5.27 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$,增湿速率最快。年降水倾向率的增加,与春、冬季增湿密切相关。春季降水量的增加,可能与我国西北地区西风偏弱,南风偏强有关,利于源自西太平洋及印度洋的南方水汽向北输送^[27],并且降水强度也呈增强趋势。

3.2 三江源地区 1961–2019 年降水量空间格局变化及影响因素

三江源地区地形复杂,气候条件和气候变化带有明显的空间属性差异^[28]。本研究表明源区的降水量空间变化表现为自东南向西北减少趋势,这与郭佩佩等^[29]研究结果一致,与青藏高原整体的降水特征分布相同,可能是由于高原的阻挡,导致西南季风无法深入以及东部降水充沛等因素的综合作用。黄河源区、澜沧江源区和长江源区的降水量依次减少,但长江源区降水倾向率最高,说明源区越干燥的地区增湿现象越明显。长江源区地处高原腹地,受地势与气流输送变化的影响,该区年、季降水倾向率周期等与黄河、澜沧江两源区差异性较大,降水量变化特征更趋同于青藏高原的降水变化^[7],高原气候特征更显著。

地形是降水量存在空间差异的主要影响因素,另一方面,全球变暖背景下,不同流域的海拔和下垫面导致各源区增温幅度不同,冰川和积雪反馈作用的速率存在差异,也可能间接影响降水^[30]。各源区降水总量呈增加态势,但降水日数呈不显著性降

低趋势,表明雨强增加,雨水的溅蚀作用可能会对土壤造成一定的破坏。运用重标极差分析得到的 Hurst 值均大于 0.5,表明未来降水量与过去变化趋势一致,降水量持续增加。而源区降水量的增加可提高浅层土壤含水量^[31],利于源区植被生长发育。但三江源地区降水也受控于全球气候变化^[32],作为敏感、脆弱的高原生态系统,微小波动的气候变化也可能导致三江源区生态系统的强烈响应^[19],降水量的变化对源区系统的影响(诸如植被、大气环流、径流等)需进一步研究。三江源区地处高原,气象站点较少,本研究通过反距离加权插值法,绘制的降水量的空间分布图,可能存在一定误差,随着中国气象局在三江源区布置站点的增加,在后续研究中会增加更多、更新观测资料,以准确地反映该区降水的时空分布规律。

4 结论

时间尺度上,1961–2019 年三江源区年平均降水量为 470.7 mm,多寡交替的波动状变化明显,整体呈现逐增趋势,但降水日数呈不显著性降低趋势。1961–2002 年降水量累积距平大致呈下降趋势,2003–2019 年呈上升趋势,2002 年为降水增加突变点。不同源区间,黄河源区春季降水量最大,其余三季以澜沧江源区最高,长江源区四季均处于最低值。空间尺度上,三江源区年降水量自西北向东南递增,黄河源区各站点降水量空间变化幅度最大;春、夏、秋三季的降水倾向率表现为由西北向东南减少的趋势,但冬季降水倾向率变化相反。降水量长程变化 Hurst 值大于 0.5,预测未来降水量变化亦呈增加趋势。

参考文献 References:

- [1] BAI Y F, GUO C C, DEGEN A A, AHMAD A A, WANG W Y, ZHANG T, LI W Y, MA L, HUANG M, ZENG H J, QI L Y, LONG R J, SHANG Z H. Climate warming benefits alpine vegetation growth in Three-River Headwater Region, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 742(22): 140574.
- [2] 李军乔. 三江源地区生态环境重建对策研究. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2002.
LI J Q. Study on countermeasures for rehabilitation of ecological environment in the source area of Three Rivers. Master Thesis. Yangling: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2002.
- [3] YAO T D, THOMPSON L, YANG W. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663-667.

- [4] 唐敏, 张勃, 张耀宗, 季定民, 马琼, 张国斌. 近 55 年三江源地区地表干燥度时空变化特征及其对气候因子的响应. 生态环境学报, 2016, 25(2): 248-259.
TANG M, ZHANG B, ZHANG Y Z, JI D M, MA Q, ZHANG G B. Characteristics of temporal and spatial variations of surface aridity index and climatic factors on the impact in Headwaters of the Three Rivers in recent 55 years. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(2): 248-259.
- [5] 唐红玉, 杨小丹, 王希娟, 史津梅, 徐亮. 三江源地区近 50 年降水变化分析. 高原气象, 2007, 26(1): 47-54.
TANG H Y, YANG X D, WANG X J, SHI J M, XU L. Analyses of precipitation change in the source Regions of Three Rivers during 1956–2004. Plateau Meteorology, 2007, 26(1): 47-54.
- [6] 李珊珊, 张明军, 汪宝龙, 李小飞, 骆书飞. 近 51 年来三江源区降水变化的空间差异. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2635-2643.
LI S S, ZHANG M J, WANG B L, LI X F, LUO S F. Spatial difference of precipitation variation in Three-River headwaters region of China in recent 51 years. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(10): 2635-2643.
- [7] 刘晓琼, 吴泽洲, 刘彦随, 赵新正, 芮昉, 张健. 1960–2015 年青海三江源地区降水时空特征. 地理学报, 2019, 74(9): 1803-1820.
LIU X Q, WU Z Z, LIU Y S, ZHAO X Z, RUI Y, ZHANG J. Spatial-temporal characteristics of precipitation from 1960 to 2015 in the Three Rivers' Headstream Region, Qinghai, China. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(9): 1803-1820.
- [8] 杜军, 马玉才. 青藏高原降水变化趋势的气候分析. 地理学报, 2004, 59(3): 375-382.
DU J, MA Y C. Climatic trend of rainfall over Tibetan Plateau from 1971–2000. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(3): 375-382.
- [9] ZHANG W X, ZHOU T J, ZHANG L X. Wetting and greening Tibetan Plateau in early summer in recent decades. Journal of Geophysical Research, 2017, 122(11): 5808-5822.
- [10] 李林, 朱西德, 周陆生, 汪青春. 三江源地区气候变化及其对生态环境的影响. 气象, 2004, 30(8): 18-22.
LI L, ZHU X D, ZHOU L S, WANG Q C. Climatic changes over Headwater of the Three-River area and its effect on ecological environment. Meteorology, 2004, 30(8): 18-22.
- [11] 窦睿音. 近半个世纪三江源地区气候变化与可持续发展适应对策研究. 生态经济, 2016, 32(2): 165-171.
DOU R Y. The climate change and adaptation strategies for sustainable development in the Three-River Headwaters Region in Qinghai Province in recent half century. Ecological Economy, 2016, 32(2): 165-171.
- [12] 魏凤英. 气候统计诊断与预测方法研究进. 应用气象学报, 2006, 17(6): 736-742.
WEI F Y. Progresses on climatological statistical diagnosis and prediction methods. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(6): 736-742.
- [13] 强安丰, 魏加华, 解宏伟. 青海三江源地区气温与降水变化趋势分析. 水电能源科学, 2018, 36(2): 10-14.
QIANG A F, WEI J H, XIE H W. Trend analysis of temperature and precipitation in Sanjiangyuan Region of Qinghai Province. Water Resources and Power, 2018, 36(2): 10-14.
- [14] 戴声佩, 李海亮, 罗红霞, 赵一飞. 1960–2011 年华南地区界限温度 10 °C 积温时空变化分析. 地理学报, 2014, 69(5): 651-653.
DAI S P, LI H L, LUO H X, ZHAO Y F. The spatio-temporal change of active accumulated temperature $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ in southern China from 1960 to 2011. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(5): 651-653.
- [15] REHMANN S. Study of Saudi Arabian climatic conditions using Hurst exponent and climatic predictability index. Chaos Solitons & Fractals, 2009, 39(2): 499-509.
- [16] 赵晶, 王乃昂. 近 50 年来兰州城市气候变化的 R/S 分析. 干旱区地理, 2002, 25(1): 91-96.
ZHAO J, WANG N A. R/S analysis of urbanization effect on climate in Lanzhou. Arid Land Geography, 2002, 25(1): 91-96.
- [17] 郭嘉兵, 李金文, 马金珠, 俞巧. 甘肃省 1961–2018 年降水量时空分布与变化研究. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 142-148.
GUO J B, LI J W, MA J Z, YU Q. Spatiotemporal variation in precipitation over Gansu Province from 1961 to 2018. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3): 142-148.
- [18] 邵月红, 刘玲, 刘俊杰, 吴俊梅. 海河流域近 60a 降水极值的频率分析及时空分布特征/S 分析. 大气科学学报, 2020, 43(2): 381-391.
SHAO Y H, LIU L, LIU J J, WU J M. Frequency analysis and its spatiotemporal characteristics of precipitation next remes in the Haihe River Basin during 1951–2010. Transactions Atmospheric Sciences, 2020, 43(2): 381-391.
- [19] 冯晓莉, 申红艳, 李万志, 汪青春, 段丽君, 李红. 1961–2017 年青藏高原暖湿季节极端降水时空变化特征. 高原气象, 2020, 39(4): 694-705.

- FENG X L, SHEN H Y, LI W Z, WANG Q C, DUAN L J, LI H. Spatiotemporal changes for extreme precipitation in wetseason over the Qinghai-Tibetanplateau and the surroundings during 1961–2017. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(4): 694-705.
- [20] 刘彩红, 王朋岭, 温婷婷, 余迪, 白文蓉. 1960–2019年黄河源区气候变化时空规律研究. *干旱区研究*, 2021, 38(2): 293-302.
- LIU C H, WANG P L, WEN T T, YU D, BAI W R. Spatio-temporal characteristics of climate change in the Yellow River source area from 1960 to 2019. *Arid Zone Research*, 2021, 38(2): 293-302.
- [21] DENG M S, MENG X H, LI Z G, LYU Y Q, LEI H J, ZHAO L, ZHAO S N, GE J, JING H. Responses of soil moisture to regional climate change over the Three Rivers Source Region on the Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*, 2019, 40(4): 2403-2417.
- [22] 徐东坡, 李金明, 周祖昊, 刘佳嘉, 严子奇, 汪党献. 1956–2018年中国降水特征的时空分布规律研究. *水利水电技术*, 2020, 51(10): 20-27.
- XU D P, LI J M, ZHOU Z H, LIU J J, YAN Z Q, WANG D X. Study on the spatial and temporal distribution of precipitation characteristics in China from 1956 to 2018. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(10): 20-27.
- [23] 郭连云, 赵年武, 田辉春. 气候变暖对三江源区高寒草地牧草生育期的影响. *草业科学*, 2011, 28(4): 618-625.
- GUO L Y, ZHAO N W, TIAN H C. Impacts of climatic warming on reproductive stages of forages growing in alpine grassland of the Three River Sources Areas. *Pratacultural Science*, 2011, 28(4): 618-625.
- [24] 陈忠, 陈华芳, 王建力, 李艳娜. 重庆市降水量的时空变化. *西南师范大学学报 (自然科学版)*, 2003, 28(4): 644-649.
- CHEN Z, CHEN H F, WANG J L, LI Y N. Temporal-spatial distribution of precipitation in Chongqing. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)*, 2003, 28(4): 644-649.
- [25] 靳铮, 游庆龙, 吴芳莹, 孙博, 蔡子怡. 青藏高原三江源地区近 60 a 气候与极端气候变化特征分析. *大气科学学报*, 2020, 43(6): 1042-1055.
- JIN Z, YOU Q L, WU F Y, SUN B, CAI Z Y. Changes of climate and climate extremes in the Three-Rivers Headwaters' Region over the Tibetan Plateau during the past 60 years. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(6): 1042-1055.
- [26] SUN B, WANG H J. Enhanced connections between summer precipitation over the Three-River-Source region of China and the global climate system. *Climate Dynamics*, 2019, 52(5): 3471-3488.
- [27] 李栋梁, 魏丽, 蔡英, 张存杰, 冯建英. 中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 135-142.
- LI D L, WEI L, CAI Y, ZHANG C J, FENG J Y. The present fact sand the future tendency of the climate change in northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 135-142.
- [28] XU X K, CHEN H, LEVY J K. Spatiotemporal vegetation cover variations in the Qinghai-Tibet Plateau under global climate change. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(7): 915-922.
- [29] 郭佩佩, 杨东, 王慧, 程军奇. 1960–2011年三江源地区气候变化及其对气候生产力的影响. *生态学杂志*, 2013, 32(10): 2807-2813.
- GUO P P, YANG D, WANG H, CHENG J Q. Climate change and its effects on climatic productivity in the Three-River Headwaters Region in 1960–2011. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(10): 2807-2813.
- [30] 易湘生, 尹衍雨, 李国胜, 彭景涛. 青海三江源地区近 50 年来的气温变化. *地理学报*, 2011, 66(11): 1451-1465.
- YI X S, YIN Y Y, LI G S, PENG J T. Temperature variation in recent 50 years in the Three-River Headwaters Region of Qinghai Province. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(11): 1451-1465.
- [31] 蒋元春, 李栋梁, 郑然. 1971–2016年青藏高原积雪冻土变化特征及其与植被的关系. *大气科学学报*, 2020, 43(3): 481-494.
- JIANG Y C, LI D L, ZHENG R. Variation characteristics of snow cover and frozen soil and their relationships with vegetation in the Tibetan Plateau from 1971 to 2016. *Transactions Atmospheric Sciences*, 2020, 43(3): 481-494.
- [32] LI S S, YAO Z J, WANG R, LIU Z F. Dryness/wetness pattern over the Three-River Headwater Region: Variation characteristic, causes, and drought risks. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(7): 3550-3566.

(责任编辑 苟燕妮)