

# 1961—2020年长江源区降水变化特征分析<sup>\*</sup>

马莲<sup>1</sup>, 司剑华<sup>2</sup>, 杨颖<sup>1</sup>, 刘增辉<sup>1</sup>, 高云鹤<sup>2</sup>, 李梦媛<sup>2</sup>, 卢素锦<sup>1</sup>, 金诚<sup>1</sup>, 祁玥<sup>1</sup>, 陈雨薇<sup>1</sup>, 李紫涵<sup>1</sup>

(1. 青海大学 生态环境工程学院; 2. 青海大学 农牧学院, 西宁 810016)

**摘要:**【目的】开展长江源区降水序列趋势及突变识别,为长江源区湿地生态保护、水资源开发利用等提供理论依据。【方法】以长江源区内具有代表性的8个气象站点即曲麻莱站、清水河站、玉树站、囊谦站、治多站、杂多站、沱沱河站和五道梁站为研究站点,基于1961—2020年有关气象资料,运用线性倾向估计、滑动平均、Mann-Kendall检验、滑动T检验等方法,识别与分析长江源区的降水序列变化特征。【结果】1) 1961—2020年,长江源区降水序列呈上升趋势,增加速率为 $0.809 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。2) 长江源区春季和冬季降水量呈明显增加趋势,夏季和秋季降水量增加趋势不明显。3) 当子序列为5时,长江源区降水序列于1970年发生突变;当子序列为7时,于1997年和1998年降水量发生突变,由下降变为上升趋势。4) 当子序列为5时,长江源区8个研究气象站点降水序列在1961—2020年间均出现突变点;当子序列为7时,仅有曲麻莱站、清水河站、治多站、沱沱河站和五道梁站的降水序列在上述60年间出现突变点。【结论】1961—2020年长江源区降水总量增多,有关长江源区的气候变化防御工作亟需加强。

**关键词:**长江源区; 降水趋势; 降水突变点

中图分类号:P426.61<sup>+4</sup>

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2023)02-0141-10

从1880至2013年,地球表面温度上升了大约 $0.85^{\circ}\text{C}$ 。自20世纪90年代以来,全球气候变化明显加速<sup>[1]</sup>。在此背景下,学者们对气温降水变化做了大量研究,例如:有研究发现葡萄牙科夫雷斯河流域降雨量有明显增加趋势<sup>[2]</sup>;Karpouzos等人<sup>[3]</sup>在对希腊地区气候要素的变化特征研究中肯定了Mann-Kendall检验(后简称M-K检验)和滑动T检验这两种方法相结合的优越性;在中国,不少学者利用M-K检验、Spearman秩次相关检验等研究方法对中国部分地区和流域的降水时空变化特征进行了分析和考察<sup>[4-8]</sup>。

长江源区地处青藏高原腹地,位于东经 $92^{\circ}07'05''\sim94^{\circ}01'27''$ ,北纬 $33^{\circ}43'56''\sim35^{\circ}34'57''$ 之间,它的生态地位极为重要。张小文等人<sup>[9]</sup>、刘海英等人<sup>[10]</sup>、白路遥等人<sup>[11]</sup>研究了长江源区降水、河流径流的多尺度时间变化及长江源区系统的平衡、降水序列的突变和识别等,对长江源区气候变化应对策略的提出起到了积极的作用。目前,对长江源区降水变化的研究主要集中在2014年以前,2015—2019年的相关研究未见报道,尤其是对长江源区不同站点降水序列突变点的研究还处于空白。

本研究以长江源区为研究对象,选取长江源区8个具代表性气象站点的降水资料进行统计分析,采用线性倾向估计、滑动平均、M-K检验、滑动T检验等方法分析了1961—2020年长江源区降水变化特征,以便为长江源区湿地生态保护、水资源开发利用等提供更为充分的科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 气象站点的选取

在长江源区选取五道梁、沱沱河、曲麻莱、治多、杂多、玉树、囊谦和清水河共8个气象站点,它们的经纬度如表1所示。

### 1.2 数据收集与测定

由青海省气象局和气候中心提供1961—2014年的有关降水量数据,降水量资料按日、月、季节、年际划分。2015—2020年的有关降水量数据来源于实地进行测定,按照文献[12]进行,采用德国Lambrecht公司出品的

\* 收稿日期:2021-03-31 修回日期:2022-05-27 网络出版时间:2022-12-08T16:13

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 31760147);青海省科学技术厅项目(No. 2021-ZJ-926; No. 2020-ZJ-763)

第一作者简介:马莲,女,研究方向为修复生态学,Email: malian313@163.com;通信作者:卢素锦,女,教授,Email: lusujin88@163.com

网络出版地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail//50.1165.n.20221207.1714.010.html>

15184 型称重式雨量计进行全年每天测量,每日人工定时(8:00 和 20:00)定点观测和统计降水量。

表 1 长江源区各气象站点经纬度

Tab. 1 Longitude and latitude of meteorological stations in the source region of the Yangtze River

站点	东经	北纬	站点	东经	北纬	站点	东经	北纬	站点	东经	北纬
五道梁	93.05°	35.13°	治多	95.37°	33.51°	清水河	97.08°	33.48°	玉树	96.58°	33.00°
沱沱河	92.26°	34.13°	杂多	95.17°	32.53°	曲麻莱	95.48°	34.07°	囊谦	96.28°	32.12°

### 1.3 分析方法

采用线性倾向估计、滑动平均、M-K 检验、滑动 T 检验等方法对降水量数据进行分析,有关具体内容参见文献[13-16]。

### 1.4 数据处理

采用 Origin 8.0 软件对长江源区 1961—2020 年各站点月降水数据作一元线性回归及滑动平均的趋势变化图;利用 Matlab 2016B 软件中的 M-K 突变检验程序和滑动 T 检验程序进行计算统计并绘制 M-K 检验图和滑动 T 检验图。

## 2 结果与分析

### 2.1 降水序列趋势分析

#### 2.1.1 年降水序列趋势分析

图 1 显示,长江源区夏季降水较为集中。从图 2 可知:1961—1980 年长江源区年降水量呈波动变化且偏低,并表现为不明显的波动减少;年降水量于 20 世纪 80 年代回升,之后逐渐减少;进入 21 世纪后又明显上升。1989 年、2001 年、2007 年、2011 年和 2019 年长江源区的年降水量明显增加,而 1965—1973 年及 1975—1981 年长江源区年降水量呈不明显增加趋势,增加速率为  $0.809 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。此外,1967—1975 年间长江源区年降水量也较多。由图 3 可知:长江源区北部、南部及东南部降水明显增加,增加速率为  $0.495 \sim 1.769 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ;五道梁、沱沱河、曲麻莱、治多等地年降水量明显增加,增加速率为  $1.050 \sim 1.797 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,杂多、清水河、玉树等地年降水量增加速率为  $0.260 \sim 0.495 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

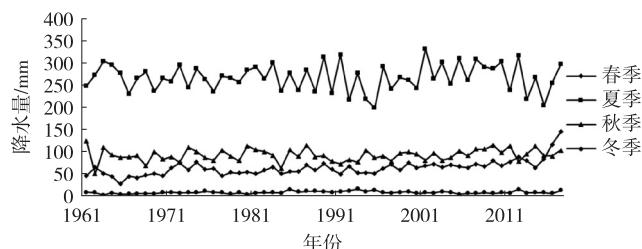


图 1 1961—2020 年长江源区四季降水量年变化

Fig. 1 The annual change of seasonal precipitation in the source region of the Yangtze River

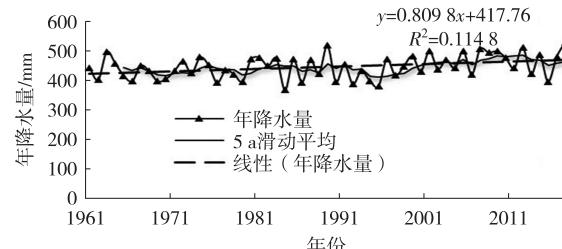


图 2 1961—2020 年长江源区年降水序列趋势变化

Fig. 2 The variation of precipitation trend in source region of the Yangtze River from 1961 to 2020

#### 2.1.2 降水序列季节性趋势分析

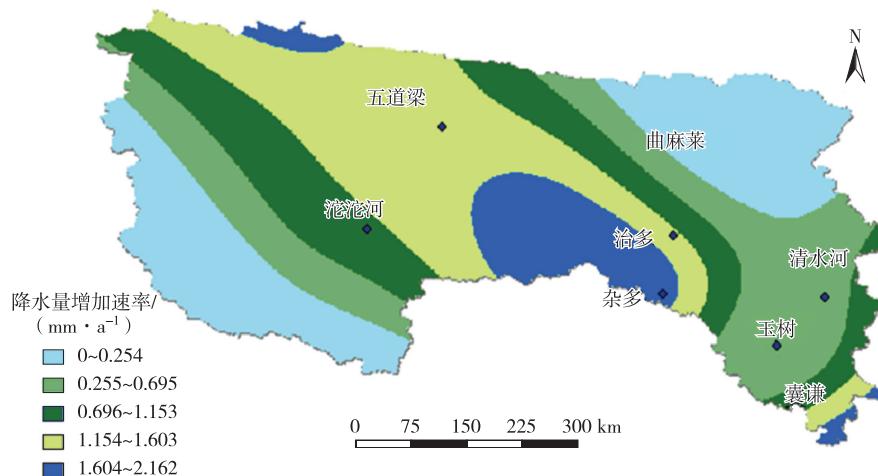
1961—2020 年长江源区春、夏、冬三季降水量增加速率分别  $0.708 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $0.046 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  和  $0.043 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ;秋季降水量呈不显著增加趋势(降水序列趋势系数  $\gamma=0.1406$  而  $\gamma_{0.01}=0.0261$ ,  $\gamma>\gamma_{0.01}$ ),增加速率为  $0.1406 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 4)。在整个研究时段中,长江源区春季降水量明显增加,呈波动上升趋势(图 4a);夏季降水充沛,但降水量年际变化较小(图 4b);与 1961 年相比 2020 年的秋季降水量略有减少(图 4c);2020 年冬季降水量与 1961 年相比有明显减小,但冬季降水量年际变化较小,且呈波动上升趋势(图 4d)。整体来看,1961—2020 年长江源区降水量的季节变化、年际变化均较大,且呈波动上升的趋势,这与杨建平等人<sup>[17]</sup>、刘光生等人<sup>[18]</sup>的研究结果基本相同。

#### 2.1.3 降水序列空间差异分析

由图 5 可知,1961—2020 年长江源区年降水量变化的空间差异均不明显。图 6 显示:五道梁、沱沱河、杂多、

曲麻莱、清水河、囊谦的年降水量呈上升趋势,增加速率较大,为 $0.494\text{--}1.796\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ;玉树在21世纪初的年降水量减少较为明显,减少速率达 $1.507\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ,其中夏季降雨量的减少是玉树年降水量减少的主要原因。通过对各站点降水量数据进行统计分析,发现夏季是长江源区降水最多的季节,而五道梁、沱沱河、曲麻莱、囊谦降水量的增加是长江源区年降水量增加的主要原因。

此外,对1961—2020年长江源区不同气象站点降水序列进行趋势检验,结果如表2所示。当自由度( $n-2$ )为55时,由 $\gamma$ 值表可知: $\gamma_{0.1}=0.220$ , $\gamma_{0.05}=0.261$ , $\gamma_{0.01}=0.339$ , $\gamma_{0.001}=0.425$ ;因此本研究选取的各气象站点的1961—2020年降水序列趋势系数( $\gamma$ )在统计学上是不显著的。



注:底图数据来源于青海省自然资源厅(<https://zrzyt.qinghai.gov.cn/text-?vid=34010>),审图号:青S(2018)004号。下同。

图3 1961—2020年长江源区年降水量空间分布

Fig. 3 Spatial variability of annual precipitation in the source region of the Yangtze River from 1961 to 2020

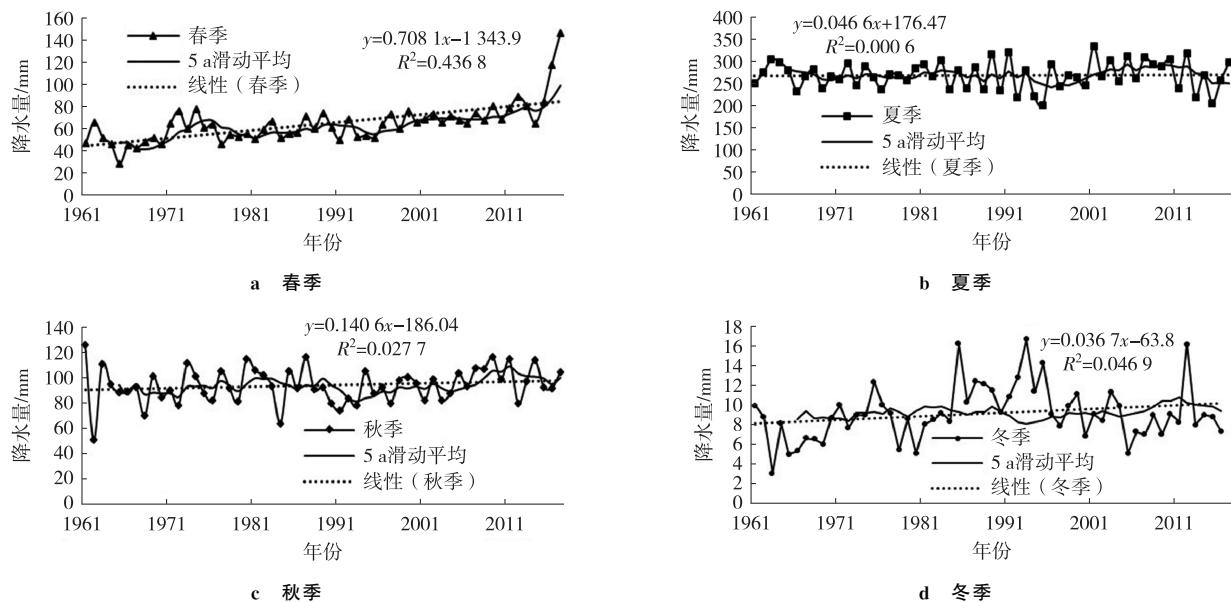


图4 长江源区四季降水序列变化

Fig. 4 Variation of precipitation sequences of different seasons in the source region of the Yangtze River

## 2.2 降水序列突变分析

### 2.2.1 年降水序列突变分析

从长江源区1961—2020年M-K检验的UF曲线(图7)可以看出,长江源区年降水量在1961—1992年一直

呈现相对稳定的波动上升趋势,且上升趋势较为明显,均超过  $\alpha=0.001$  的显著性水平;但到了 1994 年,长江源区年降水量开始持续下降,仍保持了不明显的上升水平;从 2004 年开始,长江源区年降水量明显减少,但这一趋势只维持了 5 a;自 2009 年起,长江源区年降水量开始回升。图 7 还显示,在 2001 年和 2002 年,UF 和 UB 曲线出现了交点,为可能的突变点。总的来看,由 UF 曲线的变化情况可知长江源区年降水量在 1961—1992 年呈现明显的波动上升趋势,在 2004—2009 年呈下降趋势,在 2009 年以后呈平稳上升趋势。多点突变检验需结合其他突变分析方法才可进行下一步的突变检验<sup>[19]</sup>。本研究利用 Matlab 2016B 分析软件,分别分析 2 至 15 个子序列,选取子序列为 5 和 7( $\alpha=0.01$ )对年降水量进行突变检验。通过滑动 T 检验可知:当子序列为 5 时,于 1970 年发生突变;子序列为 7 时,于 1997 年和 1998 年发生突变,年降水量从下降变为上升趋势。

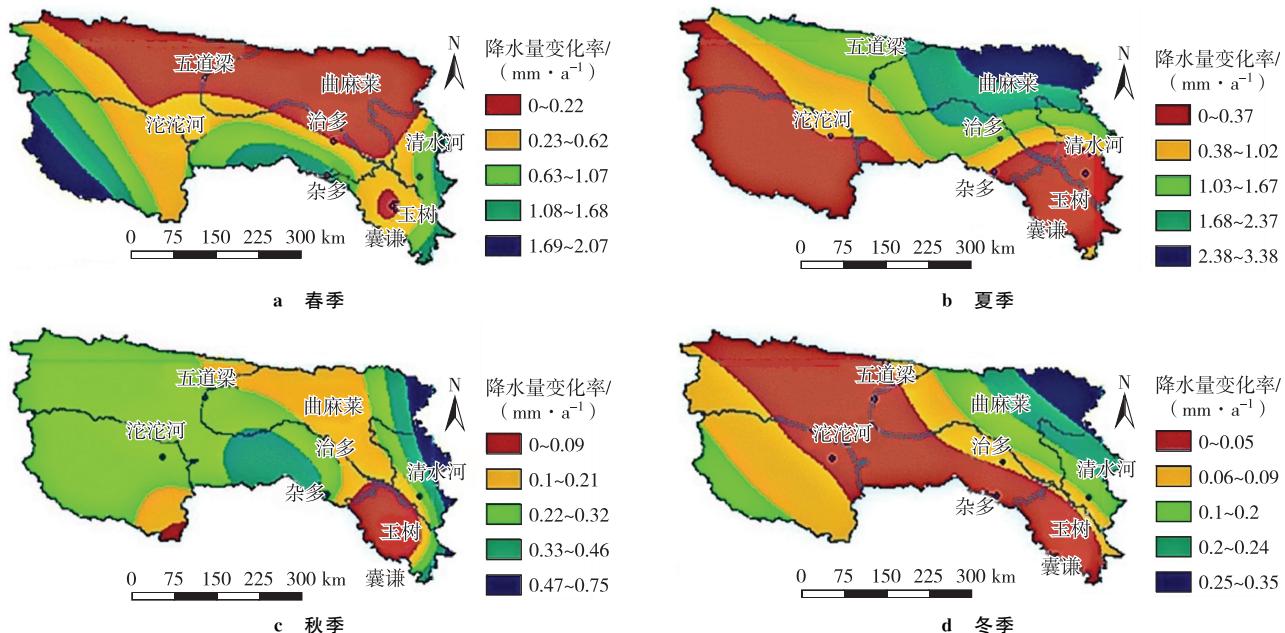


图 5 1961—2020 年长江源区四季降水量变化率的空间差异

Fig. 5 Variation of seasonal precipitation in the source region of the Yangtze River from 1961 to 2020

## 2.2.2 降水序列季节性突变分析

从图 8a 的 UF 曲线可以看出,1961—2020 年长江源区春季降水量呈明显上升趋势,但是这一趋势一直呈逐渐减缓的迹象,直至 2006 年低于 1.96( $\alpha=0.05$ ),并且在 1999 年 UF 和 UB 曲线出现仅有的 1 个交点,因此可以判定该点可能为突变点。再结合 5 a 滑动 T 检验结果即 1970 年、1975 年、1995 年和 2006 年的  $t$  值高于 2.74 ( $\alpha=0.01$ ),因此长江源区春季降水序列在上述几个年份发生突变,分别从上升变为下降、下降变为上升、上升变为下降以及上升变为下降。

图 8b 中 UF 曲线显示:长江源区夏季降水量在 1961—1995 年呈现较为明显的波动上升的趋势;1995—2015 年,长江源区夏季降水量呈现波动下降趋势,但是均未超过 1.96( $\alpha=0.05$ ),下降趋势不明显;2015—2019 年长江源区夏季降水量呈现上升趋势。UF 和 UB 曲线于 1961 年、1966 年、1983 年、1989 年、1998 年和 2015 年出现交点,结合滑动 T 检验结果可知,长江源区夏季降水序列于 2010 年产生突变,从下降变为上升。

由图 8c 中 UF 曲线可知,长江源区秋季降水序列在 1961—1988 年呈现不明显的波动上升趋势;在 1989—1993 年呈现明显上升趋势;之后秋季降水量依旧在上升,但上升趋势逐年减缓;直至 2004 年,秋季降水量开始呈现下降趋势。UF 和 UB 曲线于 2004 年出现仅有的 1 个交点,故 2004 年为可能的突变点。结合滑动 T 检验结果可知,2004—2006 年长江源区秋季降水序列产生突变,由上升变为下降。

图 8d 中 UF 曲线显示,长江源区在 20 世纪 60—70 年代的冬季降水量呈不明显的波动上升趋势;在 1970—2002 年,长江源区冬季降水量呈现持续下降的趋势,甚至于 1980—1994 年呈现明显下降的趋势。UF 和 UB 曲线仅于 1971 年出现 1 个交点,因此该点为可能的突变点。对照滑动 T 检验结果可知,长江源区冬季降水量在 1969—1972 年发生了突变,由上升变为下降趋势。

### 2.2.3 降水序列空间突变分析

图9a显示:五道梁站降水序列在1961—1994年波动上升,但逐年减缓;在2007—2013年整体呈下降趋势,在2012年后开始回升;UF和UB曲线在2001年出现交点,表明该地降水序列于2001年发生突变。沱沱河站降水序列在1961—1993年呈明显波动上升趋势;在1993年后该地年降水量有所增加,从1997年呈波动下降的趋势;UF和UB曲线在2001年和2004年出现交点(图9b)。治多站降水序列于1961年开始一直呈波动平缓下降的趋势;在20世纪90年代至21世纪初开始回升;在2003—2013年又呈波动上升趋势,并于2014年后轻微下降(图9c)。从图9d可见,杂多站降水序列在1961—1964年和1964—1973年分别表现为上升趋势和持续下降趋势;直到1974年以后,该地年降水量趋于稳定,并呈波动上升趋势。清水河站降水序列于1961—1979年呈大幅波动下降趋势,并于1980年回升;至1975年又呈有波动降低的趋势并从2008年开始回升;之后该地年降水量持续上升(图9e)。曲麻莱站降水序列从1961年起至20世纪70年代中期呈较明显的波动趋势;在20世纪70年代末到90年代末则一直呈波动上升趋势;2001—2007年有短暂的下降,但在2008年后持续上升(图9f)。囊谦站降水序列于1961—1986年呈波动下降趋势;之后呈现增加趋势;于1991年持续下降,直至2005年又开始回升(图9g)。玉树站降水序列于1961—1979年呈波动下降趋势;1980年以后整体上呈波动上升趋势(图9h)。

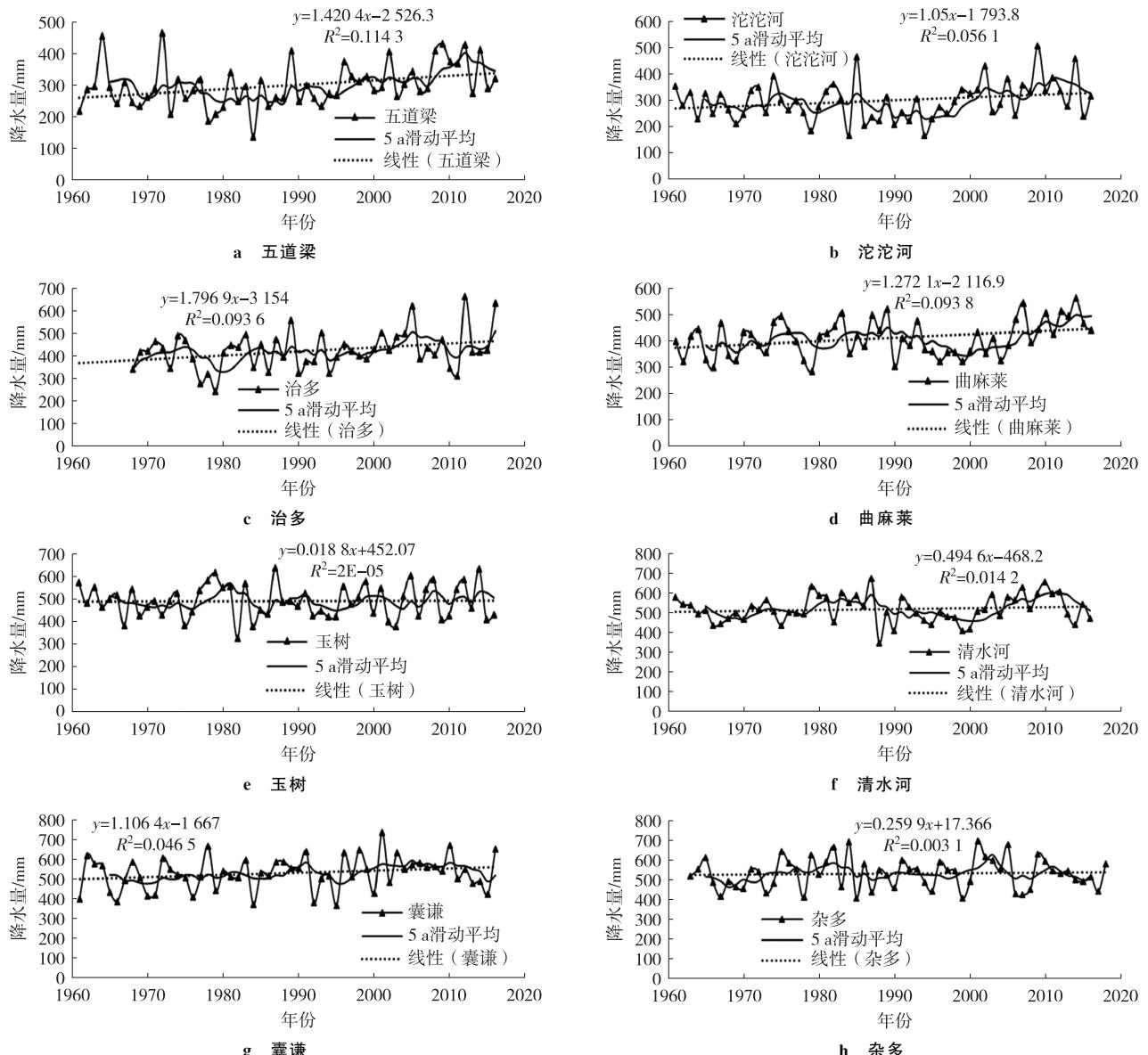


图6 1961—2020五道梁、沱沱河、治多、曲麻莱、玉树、清水河、囊谦和杂多降水序列变化

Fig. 6 Variation of precipitation sequences in Wudaoliang, Tuotuohe, Zhiduo, Qumalai, Yushu, Qingshuihe, Nangqian, and Zaduo from 1961 to 2020

结合滑动 T 检验结果可知:1) 当子序列为 5 时,曲麻莱站降水序列于 1995 年和 2005 年出现突变点;玉树站降水序列于 1976 年和 1981 年出现突变点;清水河站降水序列于 1965 年、1978 年、1987 年和 2000 年出现突变点;囊谦站降水序列于 2000 年出现突变点;治多站降水序列于 1999—2000 年出现突变点;杂多站降水序列于 1998 年和 2003 年出现突变点;沱沱河站降水序列于 1996—1998 年出现突变点;五道梁站降水序列于 1994 年、1995 年和 2007 年出现突变点。2) 当子序列为 7 时,曲麻莱站降水序列于 2000—2008 年出现突变,清水河站降水序列于 2000—2005 年出现突变;治多站降水序列于 2000—2001 年出现突变,沱沱河降水序列于 1995—1998 年出现突变;五道梁站降水序列于 2007 年出现突变;玉树站、囊谦站和杂多站的降水序列在 1961—2020 年均没有突变点出现。

表 2 1961—2020 年长江源区不同气象站点降水序列趋势检验

Tab. 2 The significant test of precipitation sequence tendency at different meteorological stations in the source region of the Yangtze River from 1961 to 2020

站点	气候倾向率( $b$ )	趋势系数( $\gamma$ )	是否具有统计学显著性	站点	气候倾向率( $b$ )	趋势系数( $\gamma$ )	是否具有统计学显著性
五道梁	1.42	0.0209	否	清水河	0.49	0.0189	否
沱沱河	1.05	0.0147	否	曲麻莱	1.27	0.0002	否
治多	1.80	0.0216	否	玉树	0.27	0.0073	否
杂多	0.26	0.0034	否	囊谦	1.10	0.0136	否

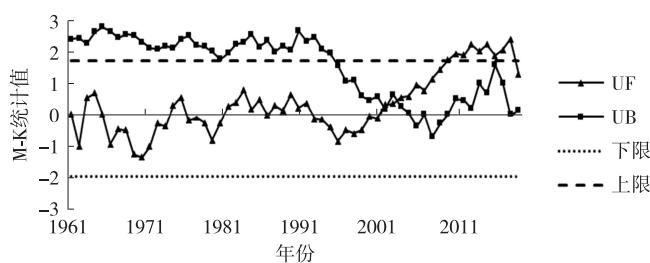


图 7 1961—2020 年长江源区降水序列 M-K 突变检验

Fig. 7 M-K test of precipitation series in the source region of the Yangtze River from 1961 to 2020

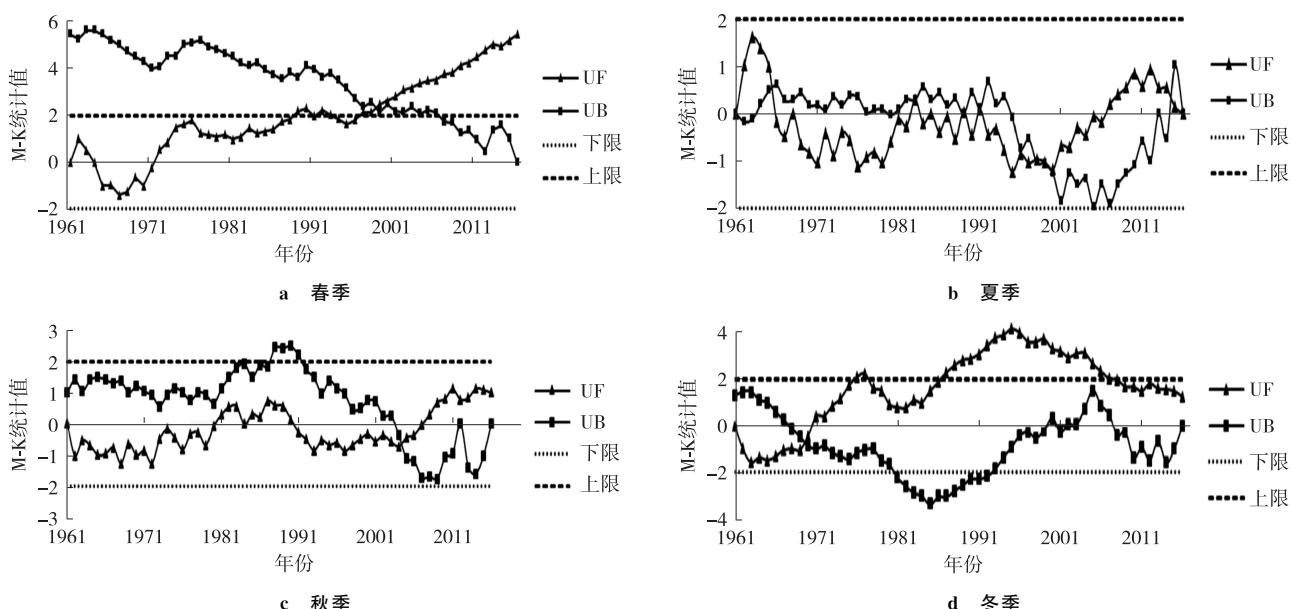


图 8 长江源区四季降水序列 M-K 检验

Fig. 8 M-K test of precipitation series of different seasons in the source region of Yangtze River

### 3 讨论与结论

本研究发现,1960—2020年长江源区的曲麻莱、玉树、清水河等地降水增加速率为 $0\sim0.695 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,源区降水总体呈现微弱增加趋势。梁川等人<sup>[20]</sup>研究得出三江源降水增加速率为 $0.870 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,高于本研究所得结果 $0.809 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。出现这一差异的原因可能与两者研究的时间尺度、位置参数不同有关:梁川等人<sup>[20]</sup>的研究时间为1970—2000年,年际尺度较小。在本研究中,1960—2020年长江源区降水序列在季节、空间因素影响下变化较大,呈现分布不均匀的特点;降水量在夏季明显高于在冬季,且在空间上差距明显。这与李珊珊等人<sup>[21]</sup>和王根绪等人<sup>[22]</sup>的研究结果一致。

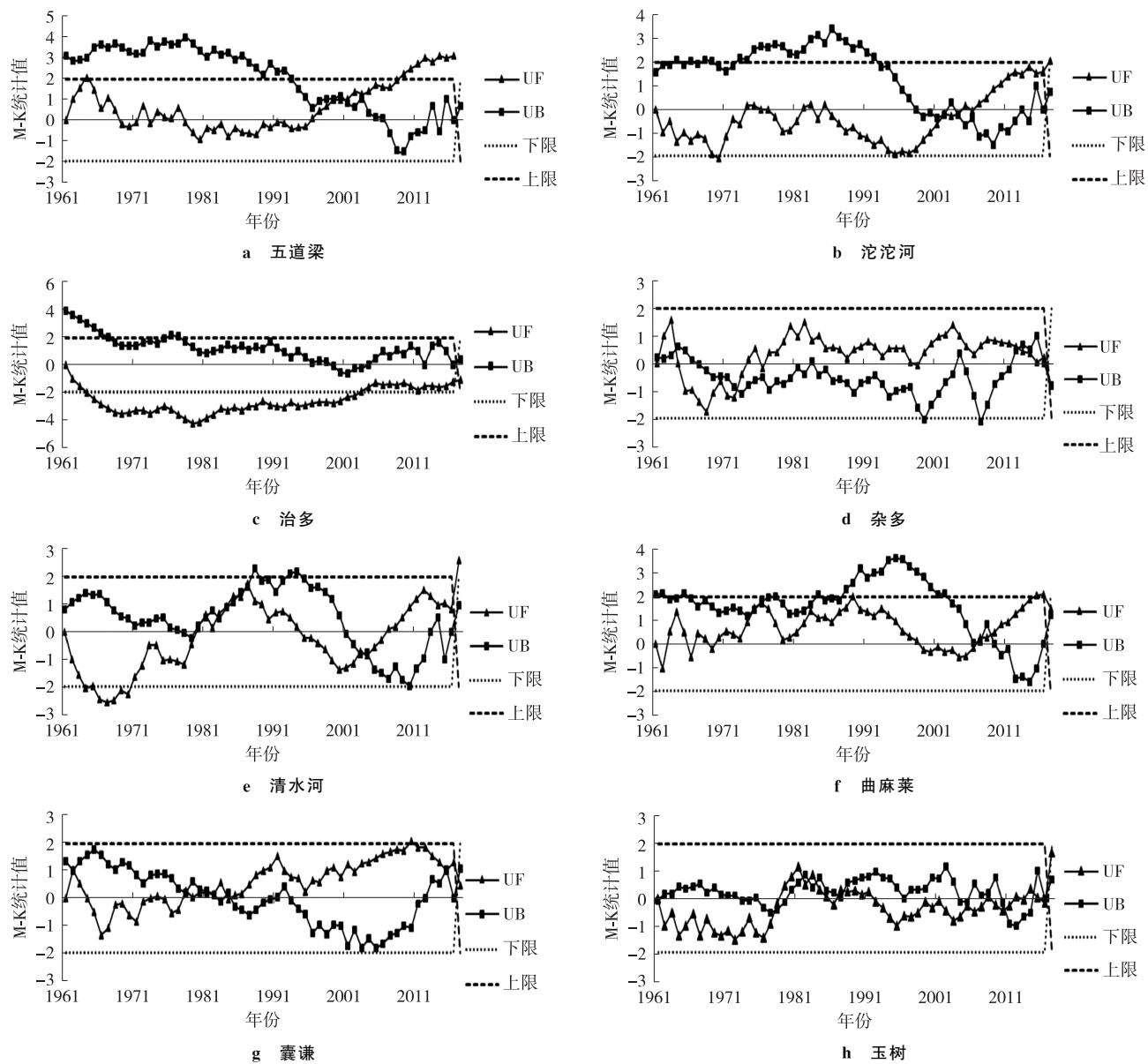


图9 1961—2020年五道梁、沱沱河、治多、杂多、清水河、曲麻莱、囊谦和玉树降水序列M-K检验

Fig. 9 The precipitation sequence of Wudaoliang, Tuotuohe, Zhiduo, Zaduo, Qingshuihe, Qumalai, Nangqian, and Yushu by M-K test from 1961 to 2020

在全球变暖背景下,有研究表明<sup>[23-26]</sup>,长江源区气温总体呈现出逐渐上升趋势,但是区域和季节气温变化却存在明显差异。从区域上看,长江源区气温存在空间分布上的差异性,不同地区升温速率不尽相同;从季节上看,长江源区冬季和秋季气温升高对区域整体升温贡献较大。长江源区降水变化对气候变暖的响应较为明显,降水年际变化呈波动上升趋势,这可能与源区气温增加导致区域水文循环加快存在一定的相关性<sup>[20]</sup>,但其中具

体机制有待于进一步研究。长江源区降水呈季节性变化,这可能与当地水汽循环和独特的季风气候有关:长江源区水汽输送和水汽含量存在明显的季节性变化,在气流和气压的双重控制下,使得夏季是当地一年中水汽含量最多的季节<sup>[27]</sup>;同时高原夏季季风日渐加强、季风提前降临也是雨季提前、降水增加的重要原因<sup>[28-29]</sup>。长江源区降水分布不均匀,这跟当地独特的地理地势和大气环流途径有关。区域水汽输送是降水形成与变化的重要源头,季风驱动的气流方向对长江源区的水文因素的影响较大,它的风力强弱与源区降水量的变化特点息息相关<sup>[30-31]</sup>。

本研究中,长江源区春季降水序列存在 1970 年、1975 年、1995 年和 2006 年发生突变现象,分别由上升变为下降、下降变为上升、上升变为下降和上升变为下降;长江源区内夏季降水序列于 2010 年产生突变,由下降变为上升趋势;2004—2006 年长江源区秋季降水序列产生突变;冬季降水序列在 1969—1972 年有突变,从上升变为下降趋势。这一结果与姜永见等人<sup>[32]</sup>的研究基本一致。长江源区降水序列突变点在地域上存在差异。当子序列为 5 时,曲麻莱站、清水河站、玉树站、囊谦站、治多站、杂多站、沱沱河站、五道梁站等站点的降水序列在 1960—2020 年均出现突变点;当子序列为 7 时,只有曲麻莱站、清水河站、治多站、沱沱河站和五道梁站的降水序列在本研究选取的 60 年间出现突变点。这与朱延龙等人<sup>[33]</sup>的研究结果基本一致。长江源区降水突变的季节和空间差异可能与气候变化导致的极端天气明显增加有关,但是否如此有待于进一步研究。

总而言之,本研究发现:1961—2020 年长江源区年降水序列趋势呈上升趋势,上升速率为  $0.809 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ;长江源区降水主要集中在夏季,夏季降雨量充沛,但年际变化较小,增加速率为  $0.0466 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ;春、冬两季降水增加明显,呈波动上升趋势;秋季降水呈现不明显增加现象,年际变化较小,降水序列变化趋势不明显。长江源区降水序列于 1969—1972 年发生突变,降水量由下降变为上升趋势。在 1961—2020 年且子序列为 7 时,曲麻莱站、清水河站、治多站、沱沱河站和五道梁站的降水序列出现突变点,杂多站、囊谦站、玉树站的降水序列无突变点出现。由上述结果可知,1961—2020 年长江源区降水存在明显的气候变化,源区年降水量增多,有益于源区生态环境改善;但与此同时也伴随着冰川退化和极端降水概率的增大,并使生态环境遭到破坏的风险增加。因此,有关长江源区生态环境的研究和保护工作还需要持续不断的进行和深入。

## 参考文献:

- [1] IPCC, Working Group I. Climate change 2013: the physical science basis-conclusions[J]. Bulletin fur Angewandte Geologie, 2013, 18(2):5-19.
- [2] da SILVA R M, SANTOS C A G, MOREIRA M, et al. Rainfall and river flow trends using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in the Cobres River Basin[J]. Natural Hazards, 2015, 77(2):1205-1221.
- [3] KARPOUZOS D K, KAVALIERATOU S, BABAJIMOPOULOS C. Trend analysis of precipitation data in Pieria Region (Greece)[J]. European Water, 2010, 30:31-40.
- [4] 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 K L, CHENG G D, DING Y J, et al. Characteristics of water vapor transport and atmospheric circulation for precipitation over the source regions of the Yellow and Yangtze Rivers[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(1):8-14.
- [5] 唐国利,任国玉.近百年中国地表气温变化趋势的再分析[J].气候与环境,2005,10(4):791-798.  
TANG G L, REN G Y. Reanalysis of surface air temperature change of the last 100 years over China[J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(4):791-798.
- [6] 邱临静,郑粉莉,尹润生.1952—2008 年延河流域降水与径流的变化趋势分析[J].水土保持学报,2011,25(3):49-53.  
QIU L J, ZHENG F L, YIN R S. Trend analysis of precipitation and streamflow during 1952—2008 in Yanhe River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3):49-53.
- [7] 刘勇,王银堂,陈元芳,等.太湖流域梅雨时空演变规律研究[J].水文,2011,3(31):36-43.  
LIU Y, WANG Y T, CHEN Y F, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of plum rains in Taihu Lake Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2011, 3(31):36-43.
- [8] 何文平.动力学结构突变检测方法的研究及其应用[D].兰州:兰州大学,2008.  
HE W P. The research and application of the abrupt detecting methods in dynamical structures [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008.
- [9] 张小文,晏玲,张世强,等.长江源区未来气候变化情景降尺度[J].兰州大学学报(自然科学版),2012,48(2):29-35.  
ZHANG X W, YAN L, ZHANG S Q, et al. Downscale projection of climate change scenarios in the source region of the Yangtze River[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2012, 48(2):29-35.
- [10] 刘海英,唐仲丽,张欣.青海省海晏地区 1976~2015 年降水变化分析[J].青海草业,2017,26(4):35-37.

- LIU H Y, TANG Z L, ZHANG X. Analysis of precipitation change of Haiyan County during 1976 to 2015 [J]. Qinghai Prataculture, 2017, 26(4): 35-37.
- [11] 白路遥,荣艳淑. 气候变化对长江、黄河源区水资源的影响[J]. 水资源保护, 2012, 28(1): 46-50.
- BAI L Y, RONG Y S. Impacts of climate change on water resources in source regions of Yangtze River and Yellow River [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(1): 46-50.
- [12] 中华人民共和国水利部水文司. 中华人民共和国水利水电行业标准 SL21—90 降水量观测规范[S]. 北京: 中华人民共和国水利部, 1991.
- Hydrology Department of Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Water resources and hydropower industry standard of the People's Republic of China SL21—90 specification for precipitation observation [S]. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 1991.
- [13] 刘梅. 我国东部地区气候变化模拟预测与典型流域水文水质响应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- LIU M. Simulation and prediction of climate change in Eastern China and assessment of the response of hydrology and water quality in a typical watershed [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [14] 魏凤英. 气候统计诊断与预测方法研究进展: 纪念中国气象科学研究院成立 50 周年[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 736-742.
- WEI F Y. Progresses on climatological statistical diagnosis and prediction methods: in commemoration of the 50 anniversaries of CAMS establishment [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(6): 736-742.
- [15] 康颖, 张磊磊, 张建云, 等. 近 50a 来黄河源区降水、气温及径流变化分析[J]. 人民黄河, 2015, 37(7): 9-12.
- KANG Y, ZHANG L, ZHANG J Y, et al. Analysis of change of precipitation, temperature and streamflow in source region of the Yellow River in recent 50 years [J]. Yellow River, 2015, 37(7): 9-12.
- [16] 郝振纯, 江微娟, 鞠琴, 等. 青藏高原河源区气候变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(6): 1130-1135.
- HAO Z C, JIANG W J, JU Q, et al. The features of climate changes in the five river source regions of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(6): 1130-1135.
- [17] 杨建平, 丁永建, 刘时银, 等. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响[J]. 自然资源学报, 2003(5): 595-602.
- YANG J P, DING Y J, LIU S Y, et al. Glacier change and its effect on surface runoff in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers [J]. Journal of Natural Resources, 2003(5): 595-602.
- [18] 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 G S, WANG G Y, HU H C, et al. Climate change characteristics in the source regions of the Yangtze River and Yellow River over the past 45 years [J]. Resources Science, 2010, 32(8): 1486-1492.
- [19] BUI SHAND T A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records [J]. Journal of Hydrology, 1982, 58(1/2): 11-27.
- [20] 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, 2011, 9(1): 53-59.
- LIANG C, HOU X B, PAN N. Spatial and temporal variations of precipitation and runoff in the source region of the Yangtze River [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(1): 53-59.
- [21] 李珊珊, 张明军, 汪宝龙, 等. 近 51 年来三江源区降水变化的空间差异[J]. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2635-2643.
- LI S S, ZHANG M J, WANG B L, et al. Spatial difference of precipitation variation in Three-River Headwaters Region of China in recent 51 years [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(10): 2635-2643.
- [22] 王根绪, 李琪, 程国栋, 等. 40a 来江河源区的气候变化特征及其生态环境效应[J]. 冰川冻土, 2001, 23(4): 346-352.
- WANG G Y, LI Q, CHENG G D, et al. Climate change and its impact on the eco-environment in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers in recent 40 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(4): 346-352.
- [23] 孟宪红, 陈昊, 李照国, 等. 三江源区气候变化及其环境影响研究综述[J]. 高原气象, 2020, 39(6): 1133-1143.
- MENG X H, CHEN H, LI Z G, et al. Review of climate change and its environmental influence on the Three-Rivers Regions [J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(6): 1133-1143.
- [24] 谭立渭. 长江源区气温降水及径流变化特征[J]. 山西建筑, 2017, 43(19): 193-195.
- TAN L W. On features of temperature, rainfalls and runoff changes in source region of Yangtze River [J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(19): 193-195.
- [25] 马莲, 杨颖, 刘增辉, 等. 长江源区气温序列趋势变化及突变年份识别[J]. 青海大学学报, 2021, 39(4): 1-10.
- MA L, YANG Y, LIU Z H, et al. Temperature sequence trend and identification of mutation year in the source region of the Yangtze River [J]. Journal of Qinghai University, 2021, 39(4): 1-10.
- [26] 孙可可, 许继军, 许斌, 等. 长江源区气温降水变化趋势及其对区域干旱的影响[J]. 水利水电快报, 2021, 42(9): 15-20.
- SUN K K, XU J J, XU B, et al. Variation trend of temperature and precipitation in source region of Yangtze River and its influence on regional drought [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2021, 42(9): 15-20.

- [27] 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 J. Water cycle mechanism in the source region of Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(4): 1-5.
- [28] 李林, 戴升, 申红艳, 等. 长江源区地表水资源对气候变化的响应及趋势预测[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 941-950.  
LI L, DAI S, SHEN H Y, et al. Response of water resources to climate change and its future trend in the source region of the Yangtze river[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(7): 941-950.
- [29] 李林, 李红梅, 申红艳, 等. 青藏高原气候变化的若干事实及其年际振荡的成因探讨[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1079-1089.  
LI L, LI H M, SHEN H Y, et al. The truth and inter-annual oscillation causes for climate change in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1079-1089.
- [30] 唐见, 曹慧群, 陈进. 长江源区水文气象要素变化及其与大尺度环流因子关系研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(5): 840-852.  
TANG J, CAO H Q, CHEN J. Changes of hydro-meteorological factors and the relationships with large-scale circulation factors in the source region of Yangtze River[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 840-852.
- [31] 张宇, 李铁键, 李家叶, 等. 西风带和南亚季风对三江源雨季水汽输送及降水的影响[J]. 水科学进展, 2019, 30(3): 348-358.  
ZHANG Y, LI T J, LI J Y, et al. Influence of westerlies and the south Asia monsoon on water vapor transport and precipitation in the Three-River Headwaters Region during the rainy season[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(3): 348-358.
- [32] 姜永见, 李世杰, 沈德福, 等. 青藏高原江河源区近 40 年来气候变化特征及其对区域环境的影响[J]. 山地学报, 2012, 30(4): 461-469.  
JIANG Y J, LI S J, SHEN D F, et al. Climate change and its impact on the regional environment in the source regions of the Yangtze, Yellow and Lantsang Rivers in Qinghai-Tibetan Plateau during 1971—2008[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(4): 461-469.
- [33] 朱延龙, 陈进, 陈广才, 等. 长江源区近 32 年径流变化及影响因素分析[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(6): 1-4.  
ZHU Y L, CHEN J, CHEN G C, et al. Runoff variation and its impacting factors in the headwaters of the Yangtze River in recent 32 years[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(6): 1-4.

## Analysis on the Characteristics of Precipitation Changes in the Source Region of the Yangtze River from 1961 to 2020

MA Lian<sup>1</sup>, SI Jianhua<sup>2</sup>, YANG Ying<sup>1</sup>, LIU Zenghui<sup>1</sup>, GAO Yunhe<sup>2</sup>, LI Mengyuan<sup>2</sup>,  
LU Sujin<sup>1</sup>, JIN Cheng<sup>1</sup>, QI Yue<sup>1</sup>, CHEN Yuwei<sup>1</sup>, LI Zihan<sup>1</sup>

(1. College of Eco-Environmental Engineering, Qinghai University;

2. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xi'ning 810016, China)

**Abstract:** [Purposes] The trend and sudden change identification of precipitation series in the source region of the Yangtze River are carried out, which provides a theoretical basis for the ecological protection of wetlands and water resources development and utilization in the source region of the Yangtze River. [Methods] Taking 8 representative meteorological stations in the source region of the Yangtze River as the research object, namely Qumalai, Qingshuihe, Yushu, Nangqian, Zhiduo, Zaduo, Tuotuohe and Wudaoliang, based on the meteorological data from 1961 to 2020, using linear tendency estimation, sliding average, Mann-Kendall test, sliding T test and other methods to identify and analyze the change characteristics of precipitation series in the source region of the Yangtze River. [Findings] 1) From 1961 to 2020, the precipitation series in the source region of the Yangtze River shows an upward trend, with an increase rate of  $0.809 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ . 2) The precipitation in spring and winter shows a significant increasing trend, while the increasing trend in summer and autumn is not obvious. 3) When the subsequence was 5, the precipitation sequence in the source region of the Yangtze River was abruptly changed in 1970. When the subsequence was 7, it abruptly mutated in 1997 and 1998, changing from a downward to an upward trend. 4) When the subsequence was 5, the precipitation sequences of the eight research meteorological stations in the source region of the Yangtze River all had mutation points from 1961 to 2020. When the subsequence was 7, only the precipitation sequences of Qumalai, Qingshuihe, Zhiduo, Tuotuohe and Wudaoliang have mutation points during the above 60 years. [Conclusions] From 1961 to 2020, the total amount of precipitation in the source region of the Yangtze River increased, and the climate change prevention work about the source region of the Yangtze River urgently needs to be strengthened.

**Keywords:** the source region of Yangzi River; precipitation trend; precipitation mutation point

(责任编辑 方 兴)